

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4 — 1971

УДК 551.465.15

Е. Г. АНДРЕЕВ, В. С. ЛАВОРКО, А. А. ПИВОВАРОВ,
Ф. Е. ТЕМНИКОВ, Л. В. ХАЛИЛОВ, Г. Г. ХУНДЖУА

К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ В ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

На основании экспериментальных данных о турбулентных флуктуациях температуры сформулированы основные требования к системе автоматического сбора и накопления информации при исследовании турбулентности. Дается описание основных узлов и принципа работы системы, приводятся результаты ее лабораторных испытаний.

Движение водных масс в океане носит турбулентный характер. Это существенно влияет на процессы переноса количества движения, тепла и вещества. Таким образом, морская турбулентность является одним из определяющих факторов формирования основных физических полей в океане.

Масштабы турбулентных движений в океане различны. Что касается пространственных масштабов, то они изменяются от долей сантиметра до размеров радиуса Земли, а временные — от миллисекунд до годовых интервалов. В настоящее время принято различать следующие виды движения в океане: крупномасштабные (до 10^6 м), среднемасштабные (до 10^4 м) и мелкомасштабные (до 10 м). Вертикальная и горизонтальные компоненты турбулентности в океане значительно различаются по интенсивности и масштабам. Это дает основание рассматривать горизонтальную и вертикальную турбулентность раздельно.

Большая теплоемкость океанов и интенсивное перемешивание водных масс делают температурное поле в деятельном слое океана в значительной степени однородным как в пространстве, так и во времени. Между тем детальные исследования вертикального распределения температуры [1, 2, 3] показывают сложную структуру температурного поля и наличие значительных градиентов в тонком поверхностном слое. Эти особенности имеют определяющее значение в процессах турбулентного тепло- и массообмена между морем и атмосферой.

Турбулентный перенос энергии, количества движения и вещества в океане может быть рассмотрен лишь методами математической статистики. Однако получение статистических характеристик морской турбулентности без применения современных методов вычислительной техники малоэффективно и бесперспективно.

При изучении крупномасштабных движений необходимо обеспечить сбор массовых данных на обширных акваториях морей и океанов. В связи с этим очень важно длительное накопление, передача и автоматическая обработка результатов наблюдений. Изучение же мелкомасштабных движений требует получения информации при помощи быстродействующих систем, причем в форме, удобной для автоматической обработки результатов наблюдений.

Мы имеем некоторые данные для оценки спектрального состава турбулентных флуктуаций температуры и солености в деятельном слое моря [4, 5, 6, 7]. Более полные данные были получены¹ путем прямых регистраций турбулентных флуктуаций температуры в двухметровом поверхностном слое моря и таком же по толщине придном слое атмосферы.

На рис. 1 приведены спектральные кривые, соответствующие верхним границам спектров, полученным по результатам наших измерений. Из рисунка видно, что для кривой 1, соответствующей наиболее широкому спектру флуктуаций температуры в воздухе, на уровне спектральной плотности, равной 0,2 ее максимального значения, верхняя частота исследуемых флуктуаций не превышает 0,1 гц. Соответствующая характеристика кривой 2, построенной для случая наиболее широкого спек-

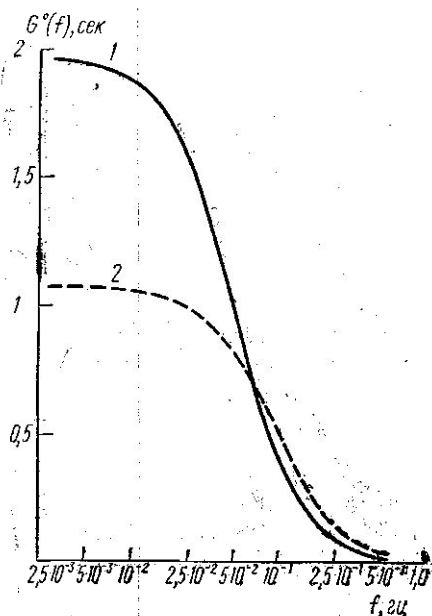


Рис. 1. Спектральные кривые, соответствующие верхним границам спектров, полученным по данным регистрации флуктуаций температуры в воздухе (1) и в воде (2)

пературы в воде, составляет 0,2 гц.

Построенные спектральные кривые дают возможность оценить полосу пропускания измерительной системы автоматического сбора информации для исследования турбулентности вблизи границы раздела море — атмосфера.

Что касается амплитуд флуктуаций температуры, то для воздуха они ~ 1 град., а для воды — $\sim 0,1$ град.

При регистрации турбулентных флуктуаций различных гидрофизических элементов от датчиков, как правило, поступают аналоговые сигналы. Из природы реальных физических процессов в море следует, что спектры исследуемых сигналов содержат ограниченную полосу частот. Это дает возможность применить теорему отсчетов Котельникова [8].

По Котельникову, величина шага дискретности τ_0 определяется из соотношения

$$\tau_0 \leq \frac{T_{\min}}{2} = \frac{1}{2f_{\max}}, \quad (1)$$

¹ Имеются в виду исследования по созданию быстродействующих измерительных систем, которые начиная с 1967 г. проводит кафедра физики моря и вод суши физического факультета МГУ и кафедра системотехники МЭИ.

где T_{\min} — величина периода, соответствующего наибольшей частоте f_{\max} в спектре исследуемого процесса.

Основным инерционным звеном при измерении температуры является сам датчик. Нами были использованы термисторы МТ-54. Оценки показали, что верхняя граница полосы пропускания термистора с амплитудными искажениями, не превышающими 10%, около 0,8 гц. Тогда согласно (1) величина шага дискретности будет $\tau_0 \approx 0,6$ сек. Однако предварительные расчеты показали, что наибольшие значения частот в спектре исследуемых процессов были меньше 0,8 гц, вследствие чего оказалось возможным в большинстве случаев взять значение $\tau_0 = 3$ сек.

Оценим значение нижней частоты в спектре исследуемых процессов. Как известно, при расчете реальных спектров турбулентных флуктуаций пользуются выражением

$$\tilde{G}(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\tau_{\max}} \tilde{K}(\tau) \cos \omega \tau d\tau, \quad (2)$$

где τ_{\max} — интервал времени, на котором определена автокорреляционная функция $\tilde{K}(\tau)$. Конечность верхнего предела интегрирования не дает возможности точно определить значения $G(\omega)$ в области низких частот.

В общем случае соотношение между длиной реализации ΔT_p и шириной спектральной полосы Δf устанавливается известным в механике соотношением неопределенности

$$\Delta T_p \Delta f \geq \frac{1}{4\pi}. \quad (3)$$

Смысл этого соотношения применительно к значениям спектральной плотности состоит в том, что более точное определение $G(\omega)$ путем сужения полосы Δf возможно только при соответствующем увеличении длины реализации ΔT_p . При заданной длине реализации можно определить нижнюю границу ω_{\min} области определения $\tilde{G}(\omega)$:

$$\omega_{\min} = 2\pi f_{\min} = \pi \Delta f \geq \frac{1}{4\Delta T_p}. \quad (4)$$

Следуя [9], отметим, что для

$$\Delta T_p \approx 10T_{\max} \quad (5)$$

значение спектральной плотности $\tilde{G}(\omega)$ при $\omega = \omega_{\min} = \frac{2\pi}{T_{\max}}$ с доверительной вероятностью 0,8 отличается от истинного не более чем на $\pm 30\%$. Расширение доверительного интервала до $\pm 40\%$ дает

$$\Delta T_p \approx 5T_{\max}. \quad (6)$$

В наших исследованиях при регистрации флуктуаций температуры в течение 30 мин значение нижней частоты в спектре флуктуаций было около $3 \cdot 10^{-3}$ гц.

Проведенные исследования позволили сформулировать основные требования к системе автоматического сбора и накопления информации о турбулентных флуктуациях.

При решении задач получения объемных характеристик турбулентности необходима одновременная регистрация турбулентных флуктуаций по крайней мере в четырех пространственно разнесенных точках.

Исходя из величины шага дискретности $\tau_0 = 0,6$ сек, соответствующего верхней границе полосы пропускания термистора (0,8 гц), можем заключить, что промежуток времени, необходимый для измерения и регистрации системой сигнала с одного датчика, не должен превышать величину $0,6 \text{ сек} : 4 = 0,15 \text{ сек}$.

При регистрации флуктуаций температуры с термистором в качестве датчика величина выходного сигнала с мостовой схемы составляет ~ 10 мв/град. Как было отмечено, амплитуда флуктуаций температуры в воздухе достигает значений ~ 1 град, а в воде — $\sim 0,1$ град. Это позволяет заключить, что при точности регистрации флуктуаций $\pm 10\%$ чувствительность схемы должна быть не менее 0,1 мв. Для обеспечения регистрации флуктуаций разной величины необходимо предусмотреть возможность изменения диапазона измерений.

Более жесткие требования к классу точности системы должны быть предъявлены при регистрации средних значений температуры в поверхностном и приводном слоях моря и атмосферы. При точности регистрации этих значений $\pm 0,01$ град и диапазоне изменения температуры 10 град класс точности измерительной системы должен быть не хуже 0,1. Для обеспечения измерений в больших диапазонах необходимо предусмотреть возможность изменения начала отсчета.

При выборе структуры системы автоматического сбора и накопления информации за основу была взята базисная схема центральных развертывающих систем второго типа (варианта) [10, 11], представленная блок-схемой на рис. 2. Как видно из рисунка, система функцио-

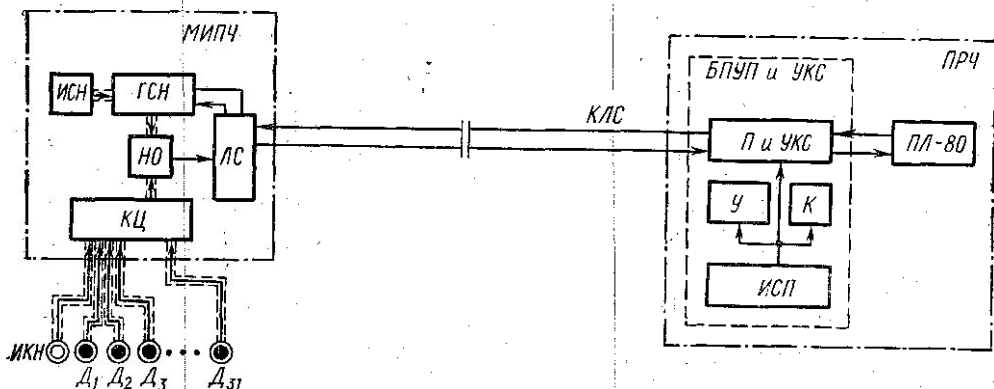


Рис. 2. Блок-схема системы автоматического сбора и накопления информации для исследования турбулентности

нально разделена на две части: многоканальную измерительно-передающую часть (МИПЧ) и приемно-регистрающую часть (ПРЧ), соединенные между собой девятнадцатизильным морским кабелем (КЛС).

Система является дальнейшим развитием принципа динамического преобразования, впервые предложенного в 1933 г. проф. Ф. Е. Темниковым [10]. Сущность принципа заключается в следующем. Измеряемый сигнал $x(t)$ уравнивается вспомогательным (компенсирующим) сигналом $s(t)$, величина которого по заданной счетной функции пробегает всю область возможного существования $x(t)$. В момент компенсации $x(t) \simeq s(t)$ сравнивающее устройство (нуль-орган) обрабатывает импульс $i(t)$, засекающий отсчитанное значение $s_i(t) \simeq x_i(t)$.

Измерительно-передающая часть конструктивно выполнена в виде стойки, смонтированной из импульсно-потенциальных модулей типа

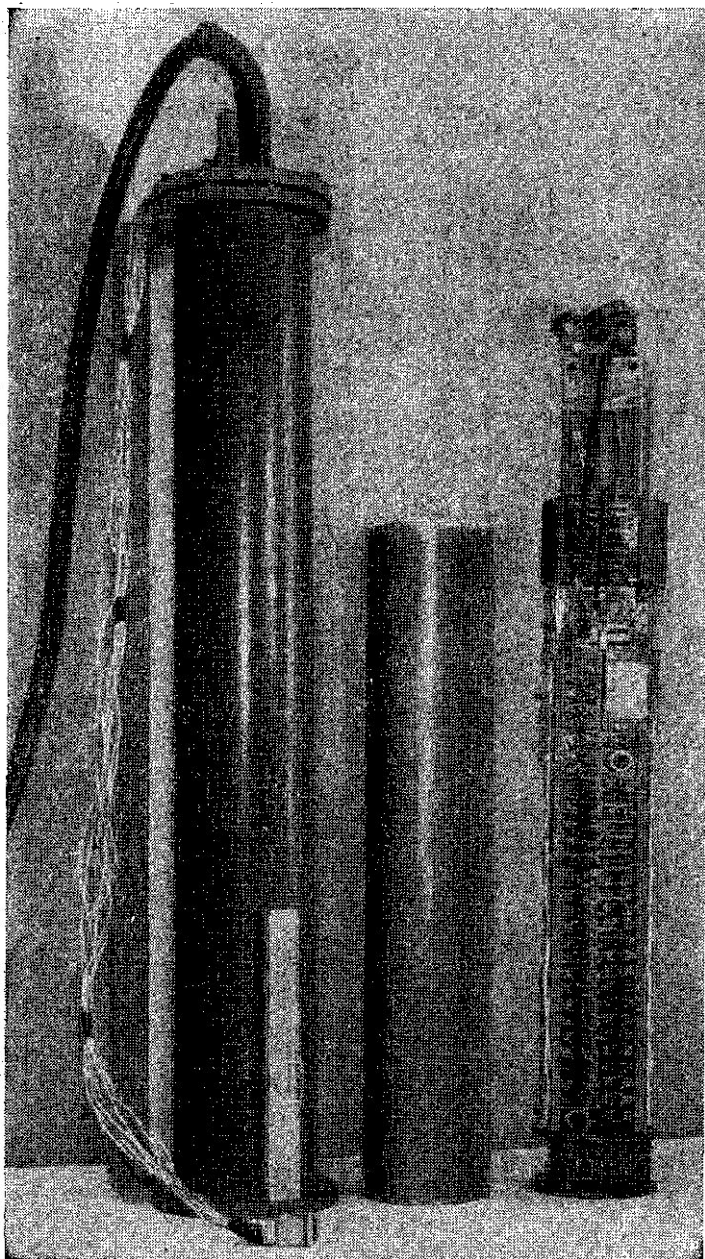


Рис. 3. Многоканальная измерительно-передающая часть системы автоматического сбора и накопления информации

«Урал-10» (см. рис. 3). Корпусом служит герметичный цилиндрический стальной контейнер.

Измерительно-передающая часть включает в себя генератор ступенчатого напряжения (ГСН), источник стабилизированного напряжения (ИСН), нуль-орган (НО), коммутатор циклический (КЦ), логику схемы (ЛС), источник контрольного напряжения (ИКН) и датчики (D_1, D_2, \dots, D_{31}).

Генератор ступенчатого напряжения служит для формирования вспомогательного (компенсирующего) сигнала по сигналам с тактового генератора. Сигналы тактового генератора суммируются десятиразрядным двоичным счетчиком (максимальная «емкость» счетчика — 1024 тактовых сигнала) и преобразуются в ступенчато-нарастающий сигнал посредством ключевых схем и матрицы активных резисторов.

Очевидно, разрешающая способность системы определяется минимальной величиной ступеньки ΔU_k ступенчато-нарастающего сигнала. В системе предусмотрена возможность изменения этой величины в следующих пределах: 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 мкв.

Для сокращения времени измерения в системе использован оригинальный способ поиска значения измеряемой величины. Измерение производится в два этапа. Вначале — большими ступеньками, величина каждой из которых равна $16 \Delta U_k$, а затем — маленькими ступеньками ΔU_k . Это позволило сократить весь цикл измерения до 80–100 тактов (в худшем случае) вместо 1024, т. е. увеличить скорость измерения более чем в 10 раз. Этим одновременно решена задача идентификации начальных условий при точном сравнении, вне зависимости от величины измеряемого сигнала $x(t)$, т. е. расширен динамический диапазон системы.

Ключевые схемы генератора ступенчатого напряжения выполнены на паре транзисторов типа МП-20 и МП-37Б, работающих в обратном режиме. Остаточное напряжение на коллектор-эмиттерном переходе компенсируется до уровня, не превышающего 1,5 мв, что при напряжении питания $U=19$ в составляет менее 0,01%.

Матрица активных резисторов собрана по типу $R/2R$, она обладает постоянным выходным сопротивлением, равным $2R$, вне зависимости от кодовой комбинации. Значения сопротивлений резисторов матрицы подобраны с точностью 0,01%.

Опорный уровень источника стабилизированного напряжения задается схемой, выполненной на стабилivolтах типа Д-818Е с температурным дрейфом 0,001 проц/град.

Нуль-орган выполнен по схеме активного трехполосника, состоящего из алгебраического сумматора сигналов $x(t)$ и $s(t)$, усилителя разности и нелинейного элемента. Усилитель разности выполнен по схеме модулятор — усилитель — демодулятор на базе автогенераторного усилителя постоянного тока [12]. Время, необходимое нуль-органу для сравнения сигналов $x(t)$ и $s(t)$ и обработки засекающего импульса $i(t)$, не превышает $2 \cdot 10^{-3}$ сек.

Полные временные и температурные изменения порога срабатывания (дрейф нуля) нуль-органа, приведенные ко входу, не превышают 60 мкв. Причем в первые 30 мин после включения нуль-органа они не превышают 1 мкв/мин, а потом значительно уменьшаются. В системе предусмотрена коррекция изменений порога срабатывания по разности между результатом измерения и величиной контрольного напряжения. Собственные шумы нуль-органа меньше 1 мкв.

Коммутатор циклический служит для последовательного подключения к нуль-органу измеряемых сигналов. Коммутатор состоит из пятиразрядного циклического счетчика, диодного дешифратора, тридцати двух ключевых схем, определяющих положение магнитоуправляе-

мых контактов (герконов) типа МКВ-1. Сопротивление замкнутых контактов не превышает 0,02 ом, сопротивление разомкнутых — не менее 10^{10} ом. Гарантируемая частота коммутации 500 гц.

Логика схемы (ЛС) определяет в соответствии с командой от приемно-регистрающей части режимы измерения и выдачи результатов на приемно-регистрающую часть.

При исследовании турбулентности вблизи границы раздела море — атмосфера измерительно-передающая часть системы вместе с датчиком располагается на плавающем буйе, удаленном от борта судна на достаточное большое расстояние, исключаяющее влияние возмущений, вносимых корпусом судна.

Приемно-регистрающая часть (см. рис. 4) располагается на борту судна. Она состоит из стандартного перфоратора ленточного типа ПЛ-80/8 и блока стабилизированного питания, управления, приема и усиления кодовых сигналов (БПУП и УКС). На переднюю панель блока вынесены все элементы контроля, регулирования и управления. Источники стабилизированного питания выдерживают заданные режимы работы при колебаниях напряжения сети $\pm 20\%$ и колебаниях температуры в пределах $5 \div 30^\circ\text{C}$.

Система функционирует следующим образом. В исходном положении нуль-орган подключен посредством коммутатора к источнику контрольного напряжения. По сигналу «пуск» с приемно-регистрающей части генератор ступенчатого напряжения начинает формировать сигнал с величиной ступеньки $16 \Delta U_k$. По первому сигналу с нуль-органа о моменте компенсации генератор ступенчатого напряжения «запоминает» его величину, счетчик генератора реверсируется, и начинается точное измерение компенсирующим сигналом с величиной ступеньки ΔU_k . По второму сигналу с нуль-органа о моменте компенсации генератор ступенчатого напряжения останавливается. По этому же сигналу результат измерения в двоичном коде снимается логикой системы со счетчика генератора и в два приема (по пять разрядов в каждом) передается по кабельной линии связи в приемно-регистрающую часть системы. После усиления кодовые сигналы регистрируются ленточным перфоратором.

Предусмотрена возможность работы системы в одном из трех режимов: непрерывно циклическом, одноциклическом и адаптивном.

При работе в непрерывно циклическом режиме система последовательно, в установленном порядке, опрашивает все подключенные датчики и регистрирует величину поступающих от них сигналов. Перед каждым циклом опроса датчиков регистрируется величина сигнала от источника контрольного напряжения.

При работе в одноциклическом режиме система один раз опрашивает подключенные датчики, регистрируя величину поступающих от них сигналов. Цикл опроса может быть повторен только по соответствующему сигналу с приемно-регистрающей части. Величина сигнала от источника контрольного напряжения также регистрируется перед циклом опроса датчиков.

В адаптивном режиме система регистрирует сигналы, поступающие в последовательные промежутки времени лишь от одного заданного датчика. Как и при других режимах, регистрируется и величина сигнала от источника контрольного напряжения.

Предусмотрены также режимы контроля регистрирующей части системы по постоянным знакоперевающимся сигналам и системы в целом посредством измерения величины контрольного напряжения.

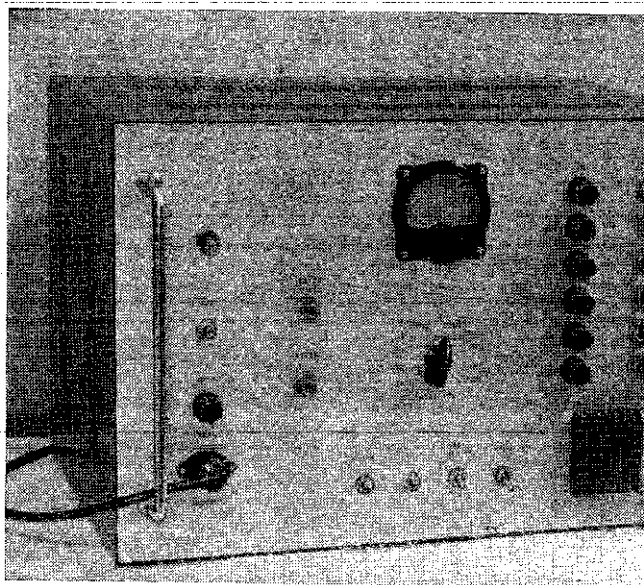


Рис. 4. Приемно-регистрающая часть системы автомат

Лабораторные испытания показали, что система имеет высокие информационно-измерительные характеристики. Результаты этих испытаний приведены в таблице.

Результаты лабораторных испытаний измерительной системы

Диапазоны измерений, мв	Максимальное время одного измерения, мсек	Минимальная величина ступеньки ΔU_{κ} , мкв	Максимальное отклонение (по результатам 500 измерений)	
			$R_{\text{вн}} = 100 \text{ ом}$	$R_{\text{вн}} = 2000 \text{ ом}$
0 ÷ 1	700	1	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\mp \Delta U_{\kappa}$
÷	5	2	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$
0 ÷ 3	425		$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$
0 ÷ 5	350	5	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$
0 ÷ 10	200	10	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$
0 ÷ 15	200	15	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$
0 ÷ 20	200	20	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$
0 ÷ 30	200	30	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$
0 ÷ 40	200	40	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$
0 ÷ 50	200	50	$\pm \Delta U_{\kappa}$	$\pm \Delta U_{\kappa}$

Приведенные данные показывают, что система имеет класс точности 0,1. Наличие нескольких диапазонов измерений позволяет регистрировать различные по амплитуде турбулентные флуктуации. Относительно быстродействия системы необходимо сказать следующее. В таблице приведены значения максимального времени одного измерения при величине ступеньки ΔU_{κ} , равной 10^{-3} от значения верхнего предела диапазона измерения. При регистрации турбулентных флуктуаций с заданной точностью $\pm 10\%$ нет необходимости использовать для измерений такие мелкие ступеньки. Для этих измерений достаточно иметь компенсирующий сигнал лишь с десятью ступеньками. Это позволило существенно увеличить быстродействие системы при регистрации турбулентных флуктуаций. Как было отмечено, время, необходимое нуль-органу для сравнения сигналов, равно $2 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$. При наличии в компенсирующем сигнале 10 ступенек максимальное время сравнения сигналов не превысит 20 мсек. Если учесть, что время регистрации сигнала перфоратором составляет 12,5 мсек, то можно заключить, что максимальное время одного измерения не превысит 32,5 мсек. Таким образом, при величине шага дискретность 0,6 сек система обеспечивает возможность сбора и регистрации данных одновременно от 18 датчиков турбулентных флуктуаций.

В заключение отметим, что разработанная система может быть с успехом применена не только в гидрофизических, но и в других исследованиях, где необходим сбор и накопление большого объема информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Evans F., Dickson C. N. J. Roy. Meteorol. Soc., 87, 374, 1961.
2. Преображенский Л. Ю. Тр. ГГО, вып. 150, 1964.
3. Андреев Е. Г., Лаворко В. С., Пивоваров А. А., Хунджуа Г. Г. «Океанология», 9, № 2, 1969.
4. Колесников А. Г. Сб. «Некоторые проблемы и результаты океанографических исследований», М., 1959.
5. Контобойцева Н. В. «Изв. АН СССР», сер. геофиз., № 1, 1958.
6. Хунджуа Г. Г., Христофоров Г. Н. «Океанология», 5, № 4, 1965.

7. Доброклонский С. В., Миркотан С. Ф., Худжуа Г. Г., Шелковников Н. К. «Изв. АН СССР», сер. физики и атмосферы и океана, 4, 1968.
8. Котельников В. А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи. Материалы к I Всесоюзному съезду ВЭК, 1933.
9. Blackman R. B., Tuckey J. W. Bell System Technical Journal, 37, 1958.
10. Темников Ф. Е. Устройство для измерения различных величин, преобразованных в напряжение постоянного тока. Авторское свидетельство № 49959 по заявке от 10.VII.35.
11. Темников Ф. Е. Теория развертывающих систем. М., Госэнергоиздат, 1963.
12. Певзнер В. В. «Приборы и системы управления», № 6, 1967.

Поступила в редакцию
13.5 1970 г.

Кафедра
физики моря и вод суши