

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



Представлено к печати
зам. директора ИКИ РАН
Е.А. Лупяном

Пр-2137

В.С. Антонов, И.Н. Садовский

**ИЗМЕРИТЕЛЬ ВОЛНЕНИЯ МОРСКОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ИВМП-1: ОПИСАНИЕ
УСТРОЙСТВА И ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ
НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА SARMOС'05**

Москва, 2007

V.S. Antonov, I.N. Sadovsky

**Sea surface wave gauge IVMP-1:
Design description and CAPMOS'05 field experiment data**

The paper describes the 5-strings wavegauge IVMP-1 developed in 2005 and modified in 2006. Starting from faults of its precursor IUUV-1, the principal requirements for the design and the signal processing scheme are defined. The functional and circuit diagram of the wavegauge electronic unit are described, the schematic solution is substantiated. The algorithm of the experimental data processing is described. The results of the international field experiment CAPMOS'05 where the developed wavegauge was used are presented. The work was supported by RFBR (grant N. 05-05-64451) and INTAS 03-51-4789.

В работе приводится описание пятиструнного волнографа ИВМП-1 (измеритель волнения морской поверхности), разработанного в 2005 г. и модернизированного в 2006 г., приводятся основные требования, предъявляемые к конструкции и схеме обработки сигнала, исходя из погрешностей измерения более раннего прибора ИУВ-1. Дается описание функциональной и принципиальной электрической схемы электронной части волнографа, обосновывается выбор схемотехнического решения. Также представлен алгоритм обработки полученных с его помощью данных и приведены результаты измерений международного натурного эксперимента CAPMOS'05, в котором применялся разработанный прибор. Работа выполнена при поддержке Фонда содействия отечественной науке, гранта РФФИ 05-05-64451 и гранта INTAS 03-51-4789.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования океана и атмосферы с помощью микроволновых систем космического зондирования имеют неоспоримое преимущество перед традиционными контактными и оптическими методами, поскольку предоставляют возможность получать информацию с обширных территорий независимо от освещенности и облачного покрытия. Применение спутниковых средств измерений позволяет многократно увеличить объём информации о состоянии и параметрах взаимодействия природных сред.

В последнее время методы дистанционного зондирования морской поверхности широко развиваются во всем мире и используются для изучения различных процессов, происходящих в океане, а также явлений, воздействующих на его поверхность: внутренних гравитационных волн в океане и в атмосфере, поверхностного волнения и солёности, гидрологических фронтов, течений, природных и антропогенных загрязнений, корабельных следов, областей развития атмосферной конвекции, ледового покрытия, рельефа дна и др.

Более эффективное использование данных дистанционного зондирования возможно на основе физических моделей, количественно связывающих вариации интенсивности микроволнового сигнала с параметрами тех или иных физических процессов. Ныне существующие модели, как правило, не приспособлены для универсального применения и требуют значительных усилий по адаптации к каждому конкретному случаю. Это обуславливает использование контактных методов для правильной интерпретации и валидации данных дистанционного зондирования.

Одной из проблем является отсутствие качественной информации о структуре волн при проведении исследований. Опыт,

полученный сотрудниками ИКИ РАН в ходе экспедиций серии «Геленджик» (1999–2004), показал, что использование в этих целях однострунной схемы измерителя волнения, которая реализует контактный метод измерения, не позволяет восстанавливать пространственную структуру волнового поля. Для точного определения параметров поверхностного волнения необходимо использовать многострунный измеритель уровня с определенной расстановкой датчиков в пространстве.

Таким образом, проектирование многострунного измерителя волнения является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит измерять пространственно-временные характеристики гравитационно-капиллярных волн в натуральных условиях. А это, в свою очередь, даст возможность разработать универсальную методику восстановления параметров волнения дистанционными методами.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИБОРА

Измеритель волнения морской поверхности является законченным устройством и состоит из блока управления (рис. 1), системы измерительных струн (рис. 2), сетевого источника питания и комплекта соединительных кабелей. Блок управления выполнен в металлическом герметичном корпусе и имеет габариты 171×121×55 мм. Измерительные струны изготовлены из нихрома диаметром 0,25 мм и имеют длину порядка 4 м. Струны фиксируются параллельно друг другу с помощью стальной конструкции, состоящей из двух (надводного и подводного) треугольников, жестко соединенных между собой несущей трубой (см. рис. 2).

Анализ функциональных особенностей схемы

В ходе экспедиции «Геленджик-2004» проводились исследования по дистанционному определению параметров морского волнения поляризационными радиотепловыми методами. В данной серии экспериментов были задействованы радиометры-поляриметры частотного диапазона от 3,75 до 37,5 ГГц. Приборы были установлены на сканирующей платформе для получения данных об угловом распределении радиояркостной температуры взволнованной поверхности. Как известно, для разработки методов дистанционного зондирования



Рис. 1. Блок управления пятиструнного волнографа ИВМП-1

(в данном случае — методов восстановления параметров волнения) обязательным является наличие объективной информации об изучаемом объекте. В экспедициях прошлых лет для определения параметров волнения использовался однострунный измеритель волнения. Исследования показали, что получаемая с его помощью информация о структуре волнового поля не является полной. Кроме этого, схема работала на постоянном токе, что приводило к искажению результатов за счет осаждения на струне солей и, соответственно, изменению коэффициента смачивания и контактного сопротивления струны.

Использование в экспедиции «Геленджик-2004» новой схемы измерителя ИУВ-1 (предшественника описанного в данной работе устройства) позволило получать информацию о пространственной структуре волнения. Данная схема позволяла определять направление прихода волн, мгновенные значения уклонов поверхности и, соответственно, направление волнового вектора. Но использование двухполярного источника тока для измерения сопротивления струны привело не только к обрастанию струны солями, но и к разъеданию струны (во время протекания положительного тока от струны к воде), в результате чего в течение достаточно короткого времени появлялись и нарастали погрешности измерения, вызванные изменениями

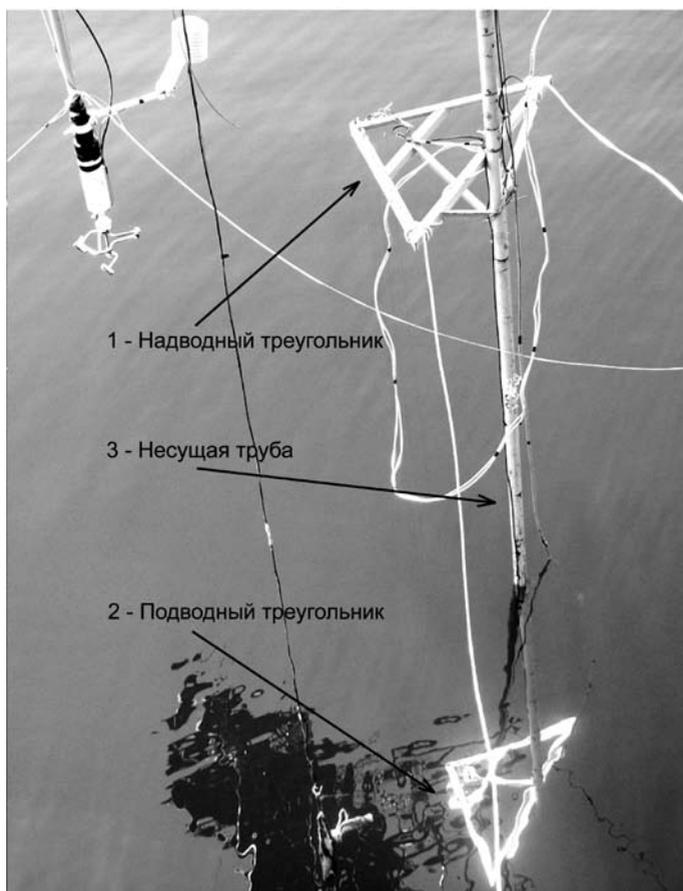


Рис. 2. Система измерительных струн (на фотографии справа)

коэффициента смачивания и погонного сопротивления струн, и затем последовал обрыв струны. Использование независимых и несинхронизированных измерительных блоков приводило к взаимному влиянию струн и появлению ложных сигналов на выходе ИУВ-1. На начальном этапе исследований обрабатывались данные, полученные с помощью прибора ИУВ-1, для определения схмотехнического решения и основных требований к разрабатываемому пятиструнному волнографу ИВМП-1 (измеритель волнения морской поверхности).

В ходе составления технического задания на основании вышеописанных недостатков ИУВ-1 и предъявляемых требований к измерениям волнения были заданы следующие основные технические характеристики разрабатываемого пятиструнного волнографа:

Напряжение питания	$\pm 15 \text{ В} \pm 15 \%$
Количество измерительных каналов	6 (5 + 1 запасной)
Сопротивление струн (соответствующее длине 4 м)	60 Ом
Ток измерения, не более	1 мА
Коэффициент усиления по напряжению	250
Диапазон выходных напряжений, не более	$\pm 10 \text{ В}$
Потенциал нижней части струн	потенциал земли
Переходное затухание между каналами, не менее	50 дБ
Частота среза выходных фильтров низких частот (ФНЧ)	10 Гц
Спад выходных ФНЧ после частоты среза, не менее	20 дБ/октава

Из этих характеристик следовало, что необходимо обеспечить широкий динамический диапазон измерения, а именно — регистрацию волн как гравитационных высотой до четырех метров, так и капиллярных размером от нескольких миллиметров. Это требовало применения малошумящих и прецизионных каскадов усиления. Сложность состояла также в обеспечении малой величины тока измерения (для уменьшения эффекта осаждения солей на струны), а значит, требовалась высокая чувствительность прибора. Наличие шести независимых каналов обуславливало необходимость добиться отсутствия взаимного влияния между ними, несмотря на непосредственную гальваническую связь и то, что расстояние между измерительными струнами составляет единицы сантиметров.

Анализ условий эксплуатации прибора

Измеритель волнения морской поверхности предназначен для эксплуатации по группе №2 ГОСТ16019-2001 и является стационарным, устанавливаемым на открытом воздухе устройством [1].

При данной группе эксплуатации опасным фактором является повышенная влажность окружающей среды, особенно если учесть близкое расположение к морской воде с повышенным содержанием солей и наличие над ней брызг и тумана.

Чтобы избежать воздействия влаги и солей на электронную часть прибора, был применен герметичный корпус с коррозионностойким покрытием на основе эпоксидной смолы.

Так как прибор устанавливается на пирсе или платформе с большим количеством измерительного оборудования, для обеспечения хорошей защиты от внешних наводок на чувствительные части волнографа применяется заземленный металлический корпус.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Струнные преобразователи нашли широкое применение как в серийных преобразователях, так и в экспериментальных разработках в связи с достаточной простотой их эксплуатации и минимальной погрешностью преобразования. Струнные преобразователи при тщательном их исполнении весьма перспективны для исследований волнения как в низкочастотной, так и в высокочастотной областях спектра практически в любых природных условиях, что является одним из главных требований к разрабатываемому устройству. Это позволяет осуществлять контроль как гравитационных, так и капиллярных волн при обеспечении достаточной точности измерения. Поэтому для разработанного измерителя волнения морской поверхности выбран струнный тип преобразователя.

Основным элементом струнных преобразователей ординат взволнованной поверхности моря в аналоговый сигнал является полупогруженный в воду отрезок безоxygenного неизолированного провода, который принято называть струной. Требования к материалу провода предъявляются вполне определенные. Материал должен обладать большой прочностью на растяжение (временным сопротивлением при растяжении), высоким модулем нормальной упругости, высоким удельным сопротивлением и малыми температурными коэффициентами сопротивления и линейного расширения.

Характеристики некоторых применяемых на практике материалов приведены в табл. 1 [2]. Наибольшее распространение получил нихромовый сплав типа Н41-ХТА и его модификации как в силу достаточного соответствия указанным требованиям, так и из-за сравнительно высокой доступности.

Принцип действия струнных преобразователей заключается в том, что за счет электрической проводимости морской воды обеспечивается шунтирование погруженной части проволоки. В результате этого ее полное сопротивление оказывается функцией уровня погружения, а при отсутствии перемещений самого преобразова-

теля — функцией мгновенных значений ординат взволнованной поверхности моря.

Таблица 1

Характеристики материалов,
используемых для струнных преобразователей

Характеристика	Сплав ЭИ-702 Гост 1050-60	Сталь углеродистая струнная	Сплав нихромовый Н41-ХТА	Сплав ко- бальтовый К40НХМВ
Временное сопротивление при растяжении, Н/мм ²	1220	3000	1400	3000
Модуль нормальной упругости, Н/мм ²	21·10 ⁴	20·10 ⁴	18·10 ⁴	21·10 ⁴
Предел прочности при растяжении, Н/мм ²	1000		1250	
Допустимое напряжение в материале струны, Н/мм ²	300	800	620	1000
Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм ² /м	1,0	0,7	0,9	1,0
Температурный коэффициент линейного расширения, К ⁻¹	12·10 ⁻⁶	12·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁶	15·10 ⁻⁶
Температурный коэффициент сопротивления (ТКС), К ⁻¹			0,25·10 ⁻³	

В связи с описанным принципом действия оказываются вполне естественными указанные выше требования. При этом определяющим из них является высокое удельное сопротивление материала — только в этом случае удастся обеспечить значительный эффект шунтирования. Абсолютные изменения сопротивления обычно невелики, поэтому для уменьшения влияния температуры целесообразен материал с малым ТКС. Высокие требования к механическим характеристикам обеспечивают стабильность натяжения струны, т. е. отсутствие ее собственных перемещений, а также способствуют повышению надежности при эксплуатации в натуральных условиях. Задачи, возникающие в ходе натуральных исследований морского волнения,

требуют существенного улучшения характеристик преобразователя в двух направлениях:

- а) уменьшение статической погрешности измерений;
- б) уменьшение динамических погрешностей.

Основной подход к поставленной задаче заключается в совершенствовании методов преобразования сигнала в измерительных схемах волнографа, а сам первичный преобразователь (измерительная струна) оставляется практически без изменений. При необходимости использовать одно и то же измерительное устройство для исследований в широкой области спектра волнения возникают серьезные затруднения, связанные с обеспечением чрезвычайно широкого динамического диапазона.

Сопротивление i -го участка струны, шунтированного морской водой, с незначительными упрощениями определяется в виде [2]:

$$R_{is} = \frac{R_i \sqrt{\omega^2 R_{\omega i}^2 C_i^2 + 1}}{\omega R_i C_i + \sqrt{\omega^2 R_{\omega i}^2 C_i^2 + 1}}, \quad (1)$$

где R_i — распределенное сопротивление струны; ω — круговая частота питающего напряжения (измерительного тока); $R_{\omega i}$ — распределенное сопротивление области морской воды, шунтирующей струну; C_i — распределенная электрическая емкость двойного электрического слоя, образующегося в зоне контакта струна — морская вода.

Изменения сопротивления i -го участка вследствие шунтирования:

$$\Delta R_{is} = \frac{\omega R_i^2 C_i}{\omega R_i C_i + \sqrt{\omega^2 R_{\omega i}^2 C_i^2 + 1}} = R_i - R_{is}. \quad (2)$$

Очевидно, что $\sum \Delta R_{is}$ является тем изменением сопротивления струны, которое подлежит определению.

Удельная эквивалентная емкость двойного электрического слоя $C_{уд}$ может изменяться в пределах 1...100 мкФ/см² в зависимости от типа контактирующих сред, и для контакта металл — морская вода обычно оценивается в 10...20 мкФ/см².

При радиусе струны r_c и длине i -го участка h_i :

$$C_i = 2\pi r_c h_i C_{уд}. \quad (3)$$

Объём морской воды, обуславливающий шунтирование струны, аппроксимируем в виде некоторого условного цилиндра радиусом r_{ω} . Сопротивление этой области:

$$R_{\omega i} \approx \frac{h_i}{\pi r_{\omega i}^2 \sigma_{\omega}}, \quad (4)$$

где σ_{ω} — удельная электрическая проводимость воды.

Запишем выражение (2) в относительном виде с учетом зависимостей (3) и (4)

$$\frac{\Delta R_{is}}{R_i} = k_i = \frac{1}{1 + \frac{1}{R_i} \sqrt{\frac{h_i^2}{\pi^2 r_{\omega i}^4 \sigma_{\omega}^2} + \frac{1}{4\pi^2 \omega^2 r_c^2 h_i^2 C_{уд}^2}}}. \quad (5)$$

Безразмерная величина k_i , которую удобно называть коэффициентом шунтирования, может принимать значения от нуля до единицы. Увеличение k_i , несмотря на большое количество входящих в выражение (5) элементов, оказывается достаточно эффективным только за счет R_i и σ_{ω} , то есть чувствительность выше при измерениях в теплой и соленой воде струнами с большим погонным сопротивлением.

При этом представляет интерес оценка влияния частоты питающего напряжения. Во-первых, очевидно, что частоту целесообразно увеличивать — это снижает влияние емкостного сопротивления двойного слоя и, что особенно важно, влияние вариаций этого сопротивления на результирующую погрешность преобразования. Однако следует учитывать, что при этом одновременно уменьшается значение

$$r_{\omega i} \approx \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma_{\omega} \mu_a}}, \quad (6)$$

где μ_a — магнитная проницаемость среды. Тем самым, в результате возрастает $R_{\omega i}$ в соответствии с выражением (4) и уменьшается чувствительность. Обычно частоту питающего напряжения устанавливают в диапазоне 2...10 кГц.

С учетом выражения (6) реальное значение шунтирующего сопротивления воды оказывается достаточно малым:

$$R_{\omega} \approx R_{\omega i} \xi, \quad (7)$$

и при длине погруженной части струны $\xi \approx 5$ м для $f_{\text{изм}} = 10$ кГц составляет 0,4...0,6 Ом.

При этих же условиях емкостное сопротивление двойного слоя $Z \approx 0,1...0,2$ Ом, т. е. составляет существенную часть общего шунтирующего сопротивления. Тем самым при погонном сопротивлении струны 15 Ом/ м погрешность измерений ξ за счет случайных изменений Z_c и R_o может достигать нескольких сантиметров.

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Функциональная схема пятиструнного волнографа представлена на рис. 3. Управляющая часть прибора состоит из генератора импульсов (ГИ), делителя частоты (ДЧ 1/6) и коммутационных аналоговых ключей (К1-К6). Генератор импульсов вырабатывает импульсы с частотой следования 10 кГц. Частота выбрана как компромисс при обеспечении необходимой точности измерения и допустимых скоростей устройств выборки-хранения и других аналоговых узлов. Импульсы с генератора поступают на делитель частоты 1/6, который по приходе каждого импульса выдает напряжение на одном из своих выходов (1–6), сначала на первом, потом на втором и т.д. Эти напряжения управляют коммутационными аналоговыми ключами и устройствами выборки-хранения (УВХ1-УВХ6). С помощью коммутационных аналоговых ключей к соответствующим измерительным струнам (ИС1-ИС6) подключается источник стабильного тока (ИСТ).

В зависимости от уровня погружения струн в воду, а также вследствие изменения их сопротивления, напряжения на струнах меняются пропорционально волнению. Эти напряжения поступают на сумматор напряжения. На сумматор поступает также сигнал устройства формирования опорного нуля (ФОН) для установки середины динамического диапазона измерения. На выходе сумматора формируется общий информационный сигнал (ОИС). Следующий за сумматором усилитель усиливает поступающий на него общий информационный сигнал по амплитуде и подает его на аналоговые входы устройств выборки-хранения. Устройства выборки-хранения формируют из общего информационного сигнала посредством синхронизации с выходными сигналами делителя частоты шесть индивидуальных информационных сигналов.

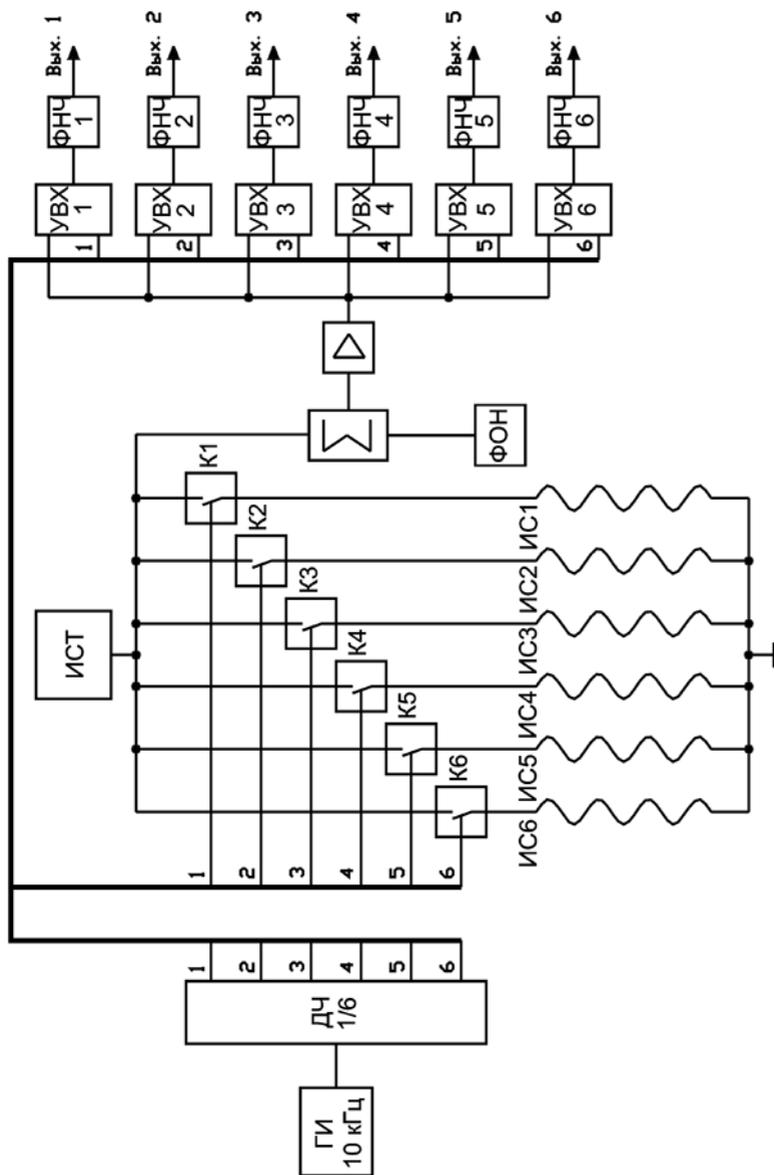


Рис. 3. Функциональная схема пятиструнного волнографа ИВМП-1

В результате работы схемы сначала опрашивается первая струна и одновременно запоминается напряжение на соответствующем устройстве выборки-хранения, затем опрашивается вторая струна и т.д. в циклическом порядке. Индивидуальные информационные сигналы поступают на ФНЧ для очистки выходного сигнала от шумов работы схемы и от возможных паразитных наводок 50 Гц. На выходах ФНЧ вырабатываются напряжения, пропорциональные вариациям уровня воды вокруг соответствующих измерительных струн.

ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Управляющая часть

Перечень элементов указан в приложении 1, электрическая принципиальная схема приведена в приложении 2.

Управляющая часть электронного измерителя волнения морской поверхности, состоящая из резисторов R1–R8, конденсаторов C1–C8, диодов VD1–VD6, микросхем D1–D5, работает следующим образом. При включении источника питания конденсатор C1 начинает заряжаться через резисторы R1 и R2, в это время на выводе 7 микросхемы D1 отмечается высокий уровень напряжения, а именно — напряжение питания $U_{\text{п}}$ (10 В). Когда конденсатор C1 зарядится до уровня $(2/3) U_{\text{п}}$ (6 В), выходной сигнал переключится в состояние низкого уровня напряжения (0 В) и вывод 7 микросхемы D1 оказывается подключенным к земле схемы при помощи открытого транзистора в микросхеме D1, а конденсатор C1 начинает разряжаться через резистор R2. Как только напряжение на нем станет меньше $1/3 U_{\text{п}}$, выходное напряжение опять будет равно $U_{\text{п}}$ (10 В). Схема переходит в периодический режим работы, и напряжение на конденсаторе C1 колеблется между значениями $(2/3) U_{\text{п}}$ и $(1/3) U_{\text{п}}$ с периодом

$$T = 0,693(R1 + 2R2)C. \quad (8)$$

Так как конденсатор C1 заряжается через резисторы R1 и R2, а разряжается только через R2, то скважность импульсов будет равна

$$Q = \frac{(t_{\zeta} + t_{\delta})}{t_{\zeta}} = \frac{T}{t} = \frac{0,693(R1 + 2R2)C1}{0,693R2C1} = \frac{(R1 + 2R2)}{R2}. \quad (9)$$

На выводе 3 микросхемы D1 получаются прямоугольные колебания с частотой $f = 1/T$ и амплитудой $U_{\text{п}}$. Эти колебания поступают на счетный вход микросхемы D2 (14-й вывод), а также на входы триггеров Шмидта блока формирования укороченных импульсов. Микросхема D2 представляет собой десятичный счетчик, выполненный по КМОП-технологии. Разрешающий вход D2 (13-й вывод) подключен на землю питания, что соответствует разрешению счета.

При поступлении на счетный вход импульсов с генератора на выходах микросхемы D2 появляются импульсы с длительностью, равной периоду следования входных импульсов. Так как выход Q6 счетчика D2 (5 вывод) подключен на вход R (15-й вывод D2), период импульсов на каждом выходе равен шести периодам входных импульсов.

Выходные сигналы сдвинуты по времени относительно друг друга в следующем порядке: спад импульса на выходе Q0 соответствует по времени фронту импульса на выходе Q1, а спад импульса на выходе Q1 — фронту импульса на выходе Q2, и так далее, до выхода Q6. Импульс на выходе Q6 сбрасывает счетчик и цикл повторяется. Выходные сигналы Q0–Q5 микросхемы D2 управляют работой коммутационных аналоговых ключей D9, D10, а также поступают на формирователи укороченных импульсов.

Блок формирователей укороченных импульсов, входящий в управляющую часть прибора, состоит из элементов: VD1–VD6, R3–R8, C3–C8, D3–D5.

Так как каждый из шести формирователей работает идентично, рассмотрим работу одного из них, построенного на элементах VD1, C3, R3, D3.1, D3.2. При поступлении высокого уровня с 3-го вывода микросхемы D2 конденсатор C3 начинает заряжаться через резистор R3 (диод VD1 не влияет на работу узла); время зарядки равно

$$t_3 = RCn \frac{U_{\text{п}}}{U_{\text{пор}}}, \quad (10)$$

где: $U_{\text{пор}} = \frac{U_{\text{п}}}{2}$,

тогда $t_3 = 0,7RC$.

Вследствие того, что скважность импульсов, поступающих на вход 2 формирователя укороченного импульса (2-й вывод элемента D3.1), равна 3, то спад его на $(1/3)t$ длительности импульса происходит раньше, чем спад импульса на выходе счетчика. Когда напряже-

ние на первом входе формирователя (R3, VD3) станет равным нулю, конденсатор C3 быстро разряжается через диод VD3, что необходимо для работы узла во время прихода следующих импульсов. Триггер Шмидта (элементы D3–D5) можно представить как логический элемент И-НЕ с порогом срабатывания $(1/2)U_{п}$.

В результате работы формирователя укороченных импульсов на его выходе формируется сигнал, фронт которого на $(1/3)t$ позже фронта первого входного импульса (VD1, R3, 3 вывод D2), и спад на $(1/3)t$ раньше, чем спад на втором входе (2 вывод D3.1). Длительность этого короткого импульса также равна $(1/3)t$. Эти импульсы управляют работой устройств выборки-хранения, что будет описано далее.

Измерительная часть

Измерительная часть состоит из элементов: R9–R18, D6–D11, VD7–VD14. Функцией этого блока является опрос каждой струны по сигналам управления и формирование общего информационного сигнала. Аналоговые ключи D6, D7 при подаче на их управляющие входы (выводы 1, 8, 9) высокого уровня напряжения подключают источник стабильного тока D9 к соответствующей измерительной струне. Измерительные струны подключаются к разъему X1. Вследствие этого, через открытый аналоговый ключ и подключенную измерительную струну начинает протекать стабилизированный ток $J_{ст}$ отрицательной полярности, равный 1 мА. Уровень погружения струны в воду определяет ее сопротивление и соответственно напряжение на ней по закону Ома:

$$U_{стр} = J_{ст} R_{стр}, \quad (11)$$

где $J_{ст}$ — ток стабилизации.

Ключами управляет десятичный счетчик D2. В результате в каждый момент времени стабилизированный ток течет только через одну струну, сначала через первую, потом через вторую, и т. д. После шестой струны опять подключается первая. Это обусловлено двумя соображениями:

- 1) чтобы исключить взаимное влияние струн и тем самым уменьшить возможные ошибки измерения;
- 2) чтобы уменьшить средний ток, протекающий через струны, и тем самым снизить обрастание струны солями.

Средний ток через струны равен: $J_{\text{стр.ср}} = \frac{1}{6} J_{\text{ст}}$, т.е. $J_{\text{стр.ср}} = \frac{1}{6} \text{мА}$.

Напряжение, снимаемое с измерительных струн, подается на операционный усилитель D8. Схема включения операционного усилителя D8 представляет собой один из вариантов инвертирующего усилителя. Точка соединения резисторов R9, R12 имеет потенциальный нуль. Таким образом, выражение для выходного напряжения имеет вид

$$U_{\text{вых}} = -K \left[\sum_{i=1}^6 (U_{\text{вх}i} + R_{ON} (D7, D8) J_{\text{ст}1}) + (U_{R20} + R_{ON} (D7, D8) J_{\text{ст}2}) \right], \quad (12)$$

где $K = \frac{R10}{R9} = \frac{R10}{R12}$.

Источник стабильного тока D11, аналогично D9, создает ток, равный 1 мА, но положительной полярности (относительно общего провода питания), и предназначен для создания на резисторе R15 и открытых аналоговых ключах D6.4, D7.4 напряжения смещения. Резистор R15 подбирается при калибровке прибора и используется для установки нулей на выходах прибора при погружении измерительных струн наполовину в воду.

Так как значения токов $J_{\text{ст}1}$ и $J_{\text{ст}2}$ равны, но имеют разные знаки, падения напряжений на открытых аналоговых ключах взаимно компенсируются. Это не допускает появление температурного дрейфа, обусловленного температурной зависимостью сопротивлений ключей D7, D8.

Далее, с выхода операционного усилителя D8 усиленный в 10 раз по напряжению и инвертированный сигнал поступает на еще один инвертирующий усилитель, построенный на операционном усилителе D10. Коэффициент усиления выбирается резистором R16 из зависимости: $U_{\text{вых}} = -(K \cdot U_{\text{вх}})$, $K = R16/R14$, что обеспечивает дополнительное усиление сигнала в 10 раз.

Применение второго усилителя на операционном усилителе D10 обусловлено необходимостью в дополнительном инвертировании, чтобы повышение уровня воды соответствовало повышению выходных напряжений, а также для повышения общего быстродействия работы измерителя, так как быстродействие операционного усилителя

повышается при уменьшении коэффициента усиления. Таким образом, на выходе D10 формируется общий информационный сигнал. Для выделения из него шести индивидуальных информационных сигналов применяются устройства выборки-хранения.

Устройства выборки-хранения

Устройства выборки хранения, состоящие из элементов D12–D17, R19–R30, C9–C14, производят захват и фиксацию напряжения по сигналу на управляющем входе (8-й вывод микросхем D12–D17). Фиксация напряжения осуществляется на конденсаторах C9–C14. Величины емкостей этих конденсаторов подобраны из компромисса между необходимым временем их заряда во время выборки (захвата) и наименьшим изменением на них напряжения во время хранения (опроса других струн). Необходимым условием выбора этих конденсаторов является также тип их диэлектрика, который должен иметь наименьшее диэлектрическое поглощение. В связи с этим выбраны конденсаторы с пленочными диэлектриками типа K73-17; по диэлектрическому поглощению они уступают конденсаторам с тефлоновым диэлектриком, но являются более доступными и позволяют достичь предъявленных требований к прибору. Резисторы, подключенные к 7-м выводам микросхем D12–D17, определяют порог срабатывания от управляющего сигнала. Так как управляющий сигнал, поступающий с формирователей укороченного импульса, по амплитуде равен напряжению питания (10 В), порог устанавливается по формуле

$$U_{\text{пор}} \approx 0,6U_{\text{п}} + 1,4 = 7,4 \text{ В.}$$

Сигнал, поступающий с формирователей укороченного импульса, имеет длительность $1/3$ времени опроса струн, вследствие чего переходные процессы (установка стабильного тока, включение и выключение аналоговых ключей, временные задержки сигналов управления) не влияют на точность измерения. Это значительно снижает погрешности прибора при измерениях.

В результате работы схемы на выходах устройств выборки-хранения (5-е выводы микросхем D12–D17) появляются индивидуальные информационные сигналы, уровень которых пропорционален изменениям уровня воды на соответствующих измерительных струнах. Так

как характерная частота колебаний даже мелких капиллярных волн не превышает 10 Гц, то следующим этапом обработки следует фильтрация напряжения от всевозможных помех с частотой сети (50 Гц) и шума работы измерителя (10 кГц и выше).

Фильтры нижних частот

Для начала опишем, почему был выбран применяемый тип фильтра низких частот. Существует несколько типов фильтров, каждый из которых обладает своими характеристиками. Фильтр Бесселя обладает очень хорошими фазо-частотными свойствами по сравнению с фильтрами Баттерворта и Чебышева. Фильтр Чебышева при его самом остром наклоне после частоты среза амплитудно-частотной характеристики имеет небольшую неравномерность в полосе пропускания и наихудшие параметры во временной области (ФЧХ) из всех трех типов фильтров. Фильтр Баттерворта обеспечивает наиболее плоскую характеристику в полосе пропускания, что достигается ценой плавности в переходной области, но у него плохая фазо-частотная характеристика. Фильтр Баттерворта обеспечивает компромисс между частотными и временными характеристиками. В табл. 2 приведены характеристики всех трех типов фильтров [3].

В нашем случае главным требованием к фильтру является равномерность характеристики в области пропускания для минимизации влияния фильтра на точность измерения; неоспоримым преимуществом в этом обладает фильтр Баттерворта. Поэтому данный тип фильтра был выбран при проектировании пятиструнного волнографа ИВМП-1 (выделен в табл. 2 полужирным шрифтом).

Фильтры нижних частот состоят из операционных усилителей D18–D29, конденсаторов C15–C38 и резисторов R31–R84. Рассмотрим работу одного из них. Прибор представляет собой фильтр Баттерворта нижних частот 4-го порядка. Данная схема состоит из двух двухполюсных фильтров нижних частот с источником напряжения, управляемым напряжением (ИНУН). Характеристики по частоте среза и коэффициенту усиления каждого из них, взятые из упрощенных таблиц [3], представлены в табл. 3.

Резисторы R79–R84 ограничивают выходной ток операционных усилителей D24–D29 в случае повышенной нагрузки или короткого замыкания в нагрузке.

Таблица 2

Сравнение характеристик фильтров нижних частот

Тип фильтра	$f_{-3 \text{ дБ}}$, Гц	Число полюсов	Время нарастания, с (от 0 до 90%)	Выброс, %	Время установления, с		Начало полосы подавления, дБ, $f = 2f_c$	Ослабление, дБ, $f = 10f_c$
					до 1%	до 0,1%		
Фильтр Бесселя (-3дБ при $f_c = 10$ Гц)	10	2	0,4	0,4	0,6	1,1	10	36
	10	4	0,5	0,8	0,7	1,2	13	66
	10	6	0,6	0,6	0,7	1,2	14	92
	10	8	0,7	0,3	0,8	1,2	14	114
Фильтр Баттерворта (-3дБ при $f_c = 10$ Гц)	10	2	0,4	4	0,8	1,7	12	40
	10	4	0,6	11	1,0	2,8	24	80
	10	6	0,9	14	1,3	3,9	36	120
	10	8	1,1	16	1,6	5,1	48	160
Фильтр Чебышева, пульсации 0,5 дБ (-0,5 дБ при $f_c = 10$ Гц)	13,9	2	0,4	11	1,1	1,6	8	37
	10,9	4	0,7	18	3,0	5,4	31	89
	10,4	6	1,1	21	5,9	10,4	54	141
	10,2	8	1,4	23	8,4	16,4	76	193
Фильтр Чебышева, пульсации 2,0 дБ (-2,0 дБ при $f_c = 10$ Гц)	10,7	2	0,4	21	1,6	2,7	15	44
	10,2	4	0,7	28	4,8	8,4	37	96
	10,1	6	1,1	32	8,2	16,3	60	148
	10,1	8	1,4	34	11,6	24,8	83	200

Таблица 3

Параметры ФНЧ

K_{yc1}	K_{yc2}	F_{cp} (-3дБ)	Кол-во полюсов	Спад
1,152	2,235	10 Гц	4	24 дБ/октава

Стабилизаторы источника питания

Сетевой трансформатор вынесен за пределы корпуса, чтобы снизить уровень возможных помех, и для обеспечения электробезопасности. На разъем X2 подается нестабилизированное двухполярное напряжение ± 15 В. Стабилизатор напряжения состоит из элементов: D30, D31, VD15, VD16, C39–C50, L1, L2. Диоды VD7, VD8 обеспечивают защиту блока от неправильной полярности поданного напряжения. Конденсаторы C39–C40 обеспечивают фильтрацию напряжения, а вследствие того, что электролитические конденсаторы обладают низким быстродействием, параллельно им подключены керамические конденсаторы C41–C42. Для стабилизации напряжений используются промышленные стабилизаторы D30, D31. На их выходах формируется стабилизированное напряжение ± 10 В. Это напряжение сглаживается конденсаторами C43–C46 и подается на питание цифровых узлов схемы. Чтобы всплески напряжения во время переключений логических устройств, а особенно таймера D1, не влияли на работу аналоговой части схемы, последняя отделена по напряжению питания еще одним LC фильтром, построенным на индуктивностях L1, L2 и конденсаторах C47–C50.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ**Методика обработки данных**

Для проведения измерений система струн (см. рис. 2) погружается в морскую воду на глубину, примерно равную половине длины струн (около 2 м). Непосредственно измерение волнения морской поверхности осуществляется посредством записи выходных сигналов блока управления волнографа ИВМП-1 на персональном компьютере через плату сопряжения аналого-цифрового преобразователя. Дальнейшая калибровка полученных результатов осуществляется в приближении

линейной зависимости значений выходных напряжений блока управления от глубины погружения струн. Определение соответствующих каждой из пяти струн значений калибровочных коэффициентов позволяет осуществить переход к абсолютным значениям регистрируемых высот в метрах. Полученные данные могут быть использованы для определения ненаправленного спектра возвышений с помощью быстрого преобразования Фурье, а также для вычисления мгновенных значений уклонов морской поверхности и их дисперсии. На рис. 4 представлена система расположения струн, использованная в эксперименте CAPMOS'05, с указанием соответствующих векторов. Подобная схема позволяет определять мгновенные значения уклонов площадок [4], образованных векторами $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_i, i = 2...5$, а также площадок несимметричного размера, образованных, например, векторами $\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_5$ и $\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_4$. При этом длина поверхностных волн, для которых могут быть рассчитаны значения уклонов, меняется в зависимости от взаимной ориентации системы струн и направления распространения волн.

Порядок определения мгновенных значений уклонов выделенных площадок:

1. Определение координат точек $a_i, i = 1...5$. Эта операция подобна определению координат векторов \mathbf{a}_i в пространстве.

2. Расчет координат векторов нормали к выделенным площадкам \mathbf{n}_1 и \mathbf{n}_2 путем векторного перемножения образующих эту площадку векторов: $\mathbf{n}_1 = \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_3 \times \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2$ и $\mathbf{n}_2 = \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_4 \times \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_5$.

3. Знание координат векторов нормали определяет уклон площадки относительно вертикальной оси и знак этого уклона при выборе соответствующей плоскости. Абсолютное значение уклона η

вычисляется по формуле: $\eta = |\mathbf{n}_{XY}|/n_Z$, где $|\mathbf{n}_{XY}|$ — модуль проекции вектора \mathbf{n}_i на плоскость XOY и n_Z — проекция вектора \mathbf{n}_i на ось OZ .

Результаты измерений

Эксперимент по дистанционному зондированию морской поверхности CAPMOS'05 был проведен в июне 2005 г. Натурные исследования велись с платформы, расположенной на расстоянии 600 м от береговой линии (п. Кацивели, Крым, Украина). Эксперимент был организован Институтом космических исследований РАН совместно с рядом институтов РАН, НАНУ и российских университетов.

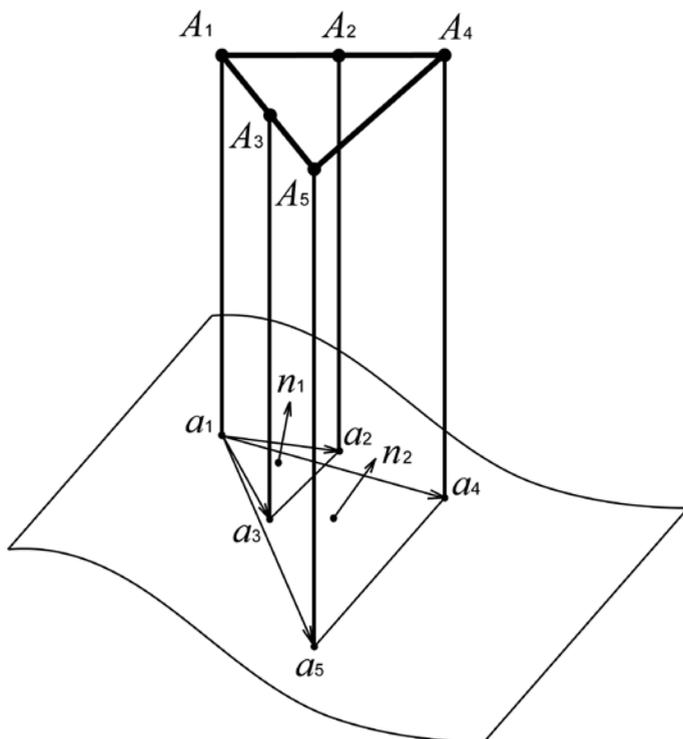


Рис. 4. Схема расположения измерительных струн A_1 – A_5 с указанием соответствующих векторов

Исследования осуществлялись с использованием комплекса радиометров с рабочими длинами волн 3, 8, 15 и 80 мм и сопровождались контактными измерениями с помощью пятиструнного волнографа ИВМП-1.

Система струн волнографа ИВМП-1 была закреплена на платформе и погружена в морскую воду на глубину 2 м. Выходные данные блока управления регистрировались на экспедиционном персональном компьютере через модуль аналого-цифрового преобразователя серии E-140/USB (производства компании L-CARD). Модуль аналого-цифрового преобразователя E-140 имеет 14 разрядов преобразования и может работать с частотой дискретизации от 0,122 до 100 кГц [5]. Малые габариты модуля и использование широко распространенного

интерфейса USB делают E-140 удобным для организации полевых измерений, требующих высокой степени мобильности.

Для регистрации цифровых данных на выходе модуля аналого-цифрового преобразователя использовалось программное обеспечение PowerGraph 3.1 Professional Edition. Регистрация выходных данных велась с установкой частоты дискретизации 100 Гц. Пример записи выходных данных с помощью указанного программного обеспечения показан на рис. 5. Регистрация производилась сразу с пяти выходных каналов волнографа в единицах напряжения (В). Для преобразования этих данных в абсолютные значения возвышений морской поверхности (метр) проводилась калибровка с соответствующим приближением линейной зависимости значений выходных напряжений блока управления от глубины погружения. Для этого перед проведением измерений волнения система струн погружалась на глубину: $l_i + 1 = 0,20$ м, где l — глубина погружения; i — номер калибровочного

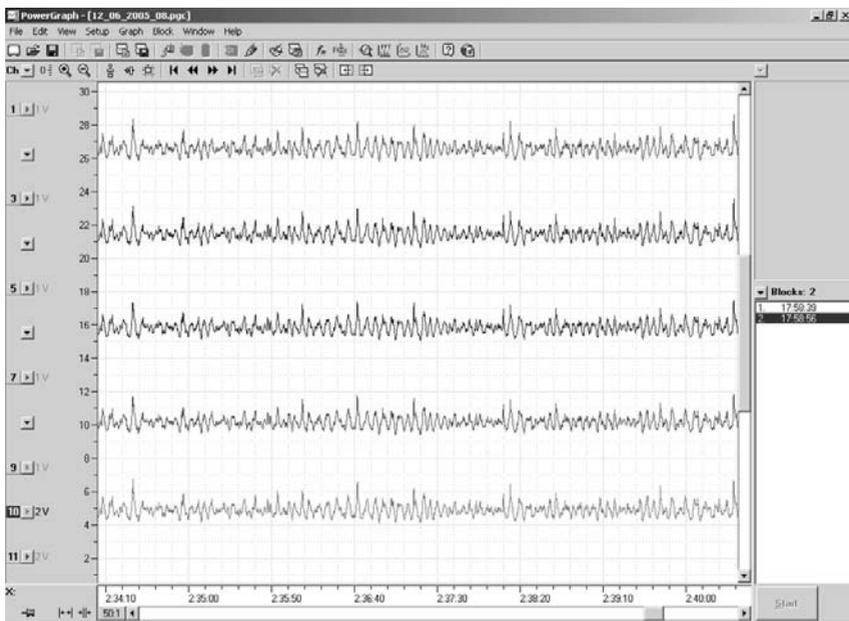


Рис. 5. Пример записи волнения морской поверхности с выходов пятиструнного волнографа ИВМП-1 с помощью ПО PowerGraph 3.1 Professional Edition

замера. График зависимостей выходных значений пяти каналов пятиструнного волнографа от глубины погружения показан на рис. 6.

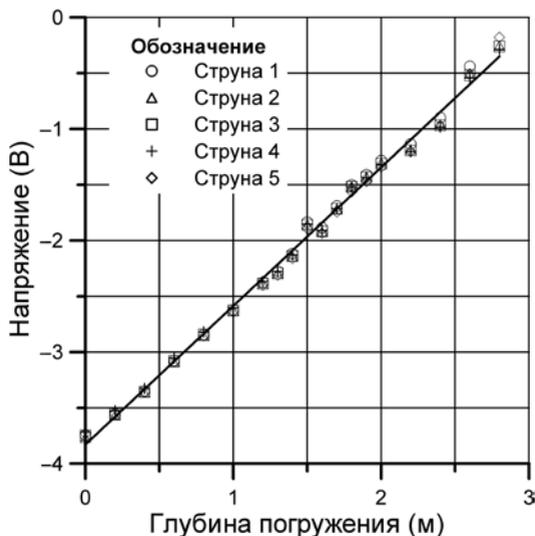


Рис. 6. Зависимость напряжения на выходе блока управления пятиструнного волнографа ИВМП-1 от глубины погружения струн с приближенной линейной аппроксимацией

Уровень возвышения морской поверхности находится выражением: $Y_k(m) = Y_k(B)A_k$, где $Y_k(m)$ — уровень возвышения морской поверхности в метрах; $Y_k(B)$ — уровень напряжения на выходе блока управления пятиструнного волнографа в вольтах; A_k — калибровочный коэффициент; k — номер струны. После нахождения координат аппроксимирующих кривых $Y = a_k X - b_k$ находим соответствующий калибровочный коэффициент $A_k = 1/a_k$ (табл. 4).

Откалиброванные с помощью этих коэффициентов данные использовались для построения ненаправленного спектра возвышений, мгновенных значений уклонов волнения морской поверхности, а также их распределений.

Ненаправленный спектр возвышений находится при помощи быстрого преобразования Фурье; пример полученного спектра приведен на рис. 7.

Таблица 4

Координаты аппроксимирующих кривых и калибровочных коэффициентов

k	Координаты аппроксимирующей кривой	A_k
1	$Y = 1,332182882X - 3,908487789$	1/1,332182882
2	$Y = 1,296171415X - 3,892111700$	1/1,296171415
3	$Y = 1,292653448X - 3,881692684$	1/1,292653448
4	$Y = 1,270103983X - 3,842723007$	1/1,292653448
5	$Y = 1,306584665X - 3,908140248$	1/1,306584665

На рис. 8 представлена временная зависимость рассчитанных значений уклонов поверхности с учетом знака. В данной ситуации плоскость, относительно которой определялся знак уклонов, проходила через вертикальную ось и вектор $\mathbf{a}_3\mathbf{a}_2$ (см. рис. 4). На рис. 9 приведена гистограмма распределения мгновенных значений уклонов для площадки $\mathbf{a}_3\mathbf{a}_1\mathbf{a}_4$, построенная на основе анализа 20-минутной записи волнения.

Данные измерений, полученные с помощью пятиструнного волнографа, сравнивались с результатами радиополяриметрического метода восстановления параметров спектра [6–8], а также с модельными расчетами, выполненными в соответствии с моделями ветрового волнения (A) [9], (E) [10] и (R) [11]. Как видно из представленных на рис. 10 зависимостей, экстраполяция восстановленных радиополяриметрическим методом значений дисперсии уклонов взволнованной поверхности в область волновых чисел 0,125 рад/см наилучшим образом ложится на данные пятиструнного волнографа. Отличие от соответствующих результатов модельных расчетов свидетельствует о необходимости уточнения существующих моделей ветрового волнения с целью более корректного учета пространственно неоднородного характера ветрового потока.

На рис. 11 представлены ветровые зависимости для дисперсий уклонов, измеренных посредством пятиструнного волнографа ($K \approx 0,125$ рад/см) и восстановленных на основе анализа данных радиополяриметрических измерений ($K \approx 15,0$ рад/см). Как видно из графика, данные как контактных, так и дистанционных измерений демонстрируют непосредственную связь со скоростью ветра, и лишь на некоторых участках (с высокими значениями скорости ветра) отличаются от хода кривой скорости ветра.

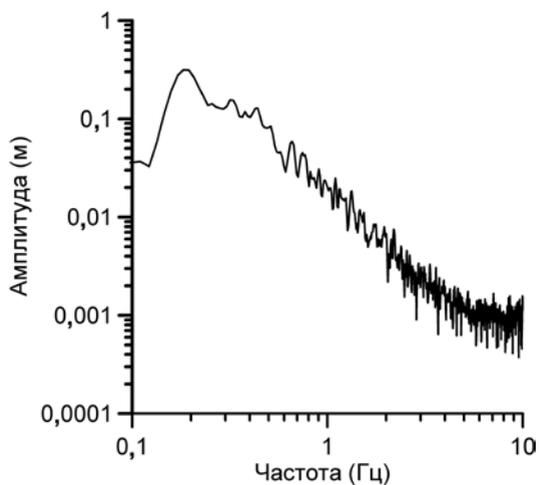


Рис. 7. Ненаправленный спектр возвышений волнения морской поверхности

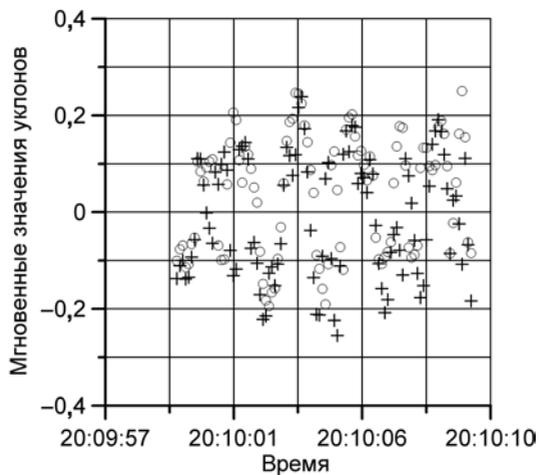


Рис. 8. Пример записи мгновенных значений уклонов площадок, соответствующих векторам \mathbf{n}_1 (крестики) и \mathbf{n}_2 (кружочки)

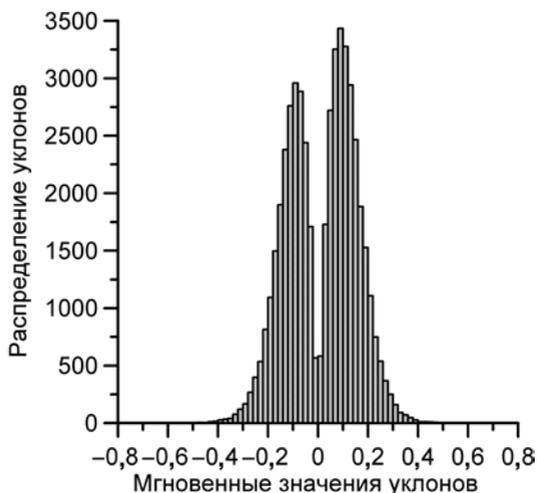


Рис. 9. Гистограмма распределения мгновенных значений уклонов. Положительные значения по горизонтальной оси соответствуют наблюдению против ветра

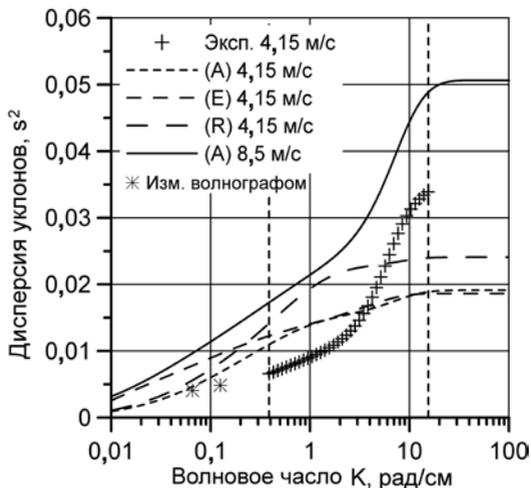


Рис. 10. Результаты сравнения восстановленной функции дисперсии уклонов (радиополяриметрический метод) (крестики), данных струнного волнографа (звездочки) и модельных расчетов (модели (A) [5], (E) [6] и (R) [7])

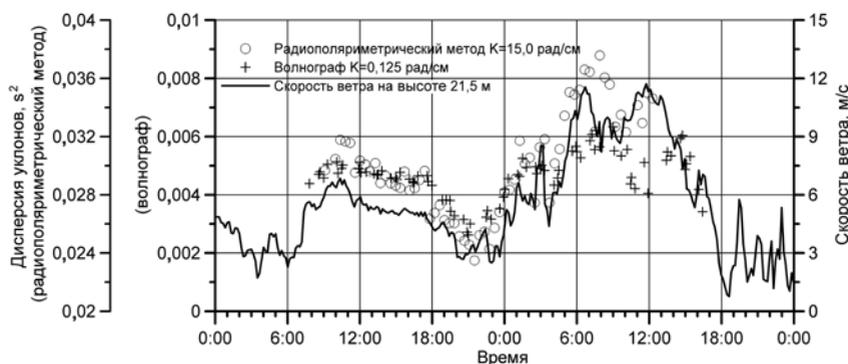


Рис. 11. Ветровые зависимости дисперсии уклонов морской поверхности, измеренные струнным волнографом (крестики) и восстановленные радиополяриметрическим методом (кружочки)

Проблемы и их решение

Во время проведения экспериментальных измерений были обнаружены некоторые особенности работы пятиструнного волнографа ИВМП-1. Первая особенность — это снижение чувствительности за счет осаждения солей на измерительных струнах с течением времени. Изменение чувствительности показано на рис. 12, кривые характеризуют временную зависимость значения a_k , входящего в уравнение приближенной аппроксимирующей кривой для соответствующей струны после очистки. Соответственно, чтобы устранить вносимую налипанием соли ошибку, необходимо ежедневно очищать измерительные струны и при обработке экспериментальных результатов вносить поправку на изменение чувствительности во времени. Данные требования усложняют процесс измерений и обработку выходных данных и увеличивают погрешности прибора. Для устранения этого недостатка в 2006 г. была модернизирована схема измерительной части. Импульсный стабилизированный ток отрицательной полярности, протекающий через струны, был заменен на биполярный стабилизированный ток в форме меандра со скважностью 2. Была изменена схема заземления измерительных струн: основной кабель заземления был отключен от нижних концов струн и установлен в воде на некотором расстоянии от них в виде толстого неизолированного медного

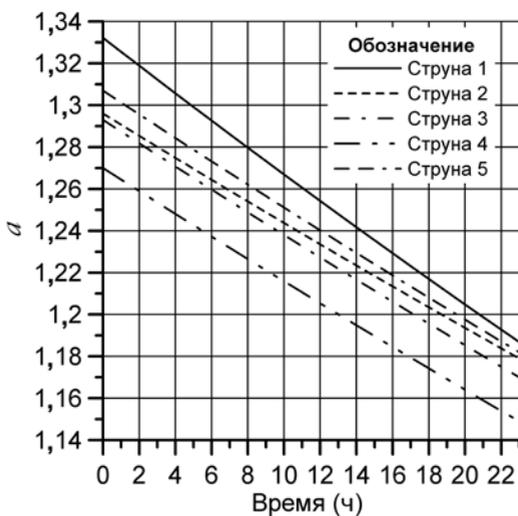


Рис. 12. Изменение чувствительности пятиструнного волнографа ИВМП-1 во времени (данные 2005 года)

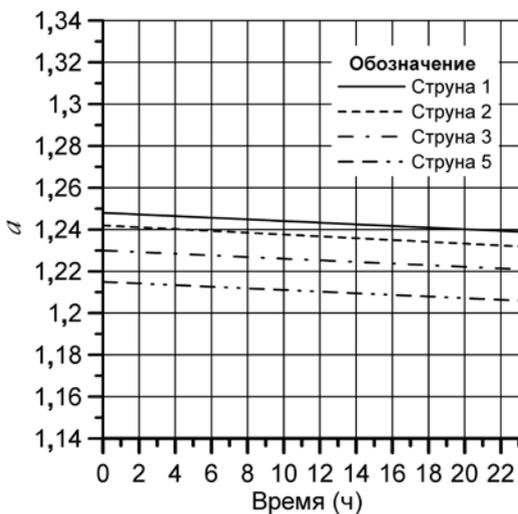


Рис. 13. Изменение чувствительности пятиструнного волнографа ИВМП-1 во времени (данные 2007 года)

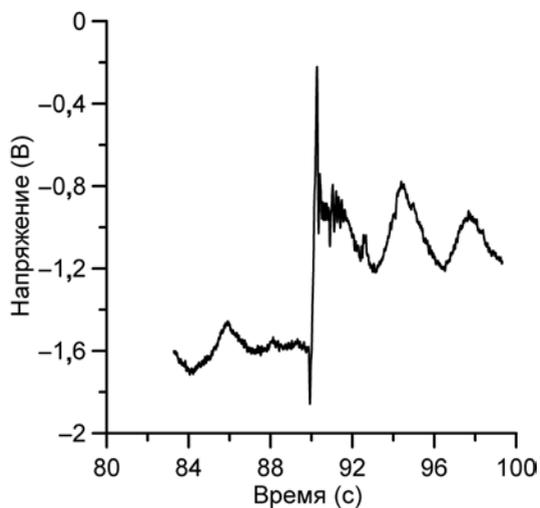


Рис. 14. Пример выброса напряжения на выходе при резком опускании струны в воду (данные 2005 года)

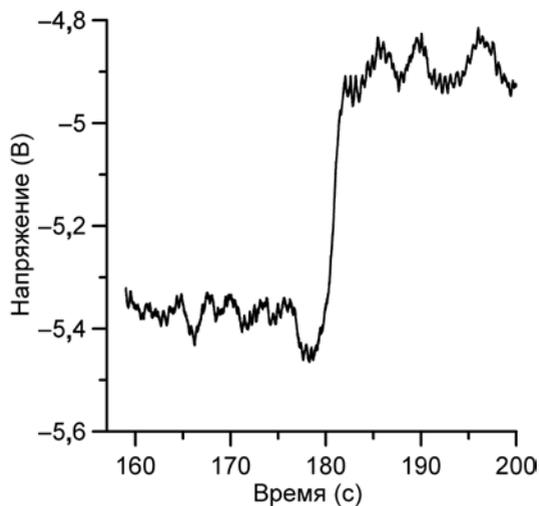


Рис. 15. Пример выброса напряжения на выходе при резком опускании струны в воду (данные 2007 года)

кабеля; данные изменения чувствительности волнографа во времени, измеренные в начале 2007 г., приведены на рис. 13.

Второй особенностью измерений пятиструнным волнографом ИВМП-1 оказались динамические нелинейности, проявляющиеся в виде выброса выходного напряжения при резком опускании струны в воду (пример подобного выброса представлен на рис. 14), причем при резком поднятии струн подобного выброса не происходило. В 2006 г. при изменении схемотехнического решения измерительной части волнографа была учтена данная особенность, для чего выходные фильтры Баттерворта были заменены на пассивные RC-фильтры со спадом АЧХ 6 дБ/октава. Несмотря на то, что эта модернизация ухудшила помехозащищенность прибора от сетевых наводок частотой 50 и 100 Гц, линейность выходного тракта была значительно улучшена. Пример записи выходных данных при резком опускании измерительных струн в воду в эксперименте 2007 г. представлен на рис. 15.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время проведения натурных измерений в ходе международного эксперимента CAPMOS'05 пятиструнный волнограф ИВМП-1 показал надежную работу в комплексе измерительного оборудования и предоставил стабильные данные волнения морской поверхности. Обнаруженные в ходе эксперимента недостатки в работе волнографа были в значительной степени устранены в 2006 г., что подтверждают данные эксперимента 2007 г.

Полученные в ходе эксперимента результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанное устройство пятиструнного волнографа позволяет восстанавливать пространственно-временную структуру ветрового волнения.
2. При определении ненаправленного спектра возвышений морской поверхности диапазон волновых чисел ограничен сверху, с одной стороны, схемотехническим решением, использованным при конструировании блока управления волнографа, с другой, присутствием капиллярных эффектов за счет конечного диаметра измерительных струн.

3. Область волновых чисел, для которых возможно измерение дисперсии уклонов морской поверхности, определяется геометрией расположения измерительных струн как относительно друг друга (расстояние между струнами), так и относительно направления распространения волнения.
4. Представленные зависимости измеренных параметров волнения от скорости ветра позволяют использовать результаты измерений струнного волнографа для валидации данных дистанционных методов восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн, а также уточнения существующих моделей ветрового волнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 16019-86. Аппаратура сухопутной подвижной радиосвязи. Требования по стойкости к воздействию механических и климатических факторов и методы испытаний.
2. *Степанюк И. А.* Океанологические измерительные преобразователи. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.
3. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. М.: Мир, 2003.
4. *Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А.* Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 256 с.
5. Е-140. Устройства для мобильных систем. Руководство пользователя. М. 2003, август – ноябрь.
6. *Kuzmin A. V., Pospelov M N.* Retrieval of Gravity-Capillary Spectrum Parameters by Means of Microwave Radiometric Techniques//IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. N. 5. P. 983–989.
7. *Садовский И. Н.* Алгоритм восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // 7-я Международная научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии»: Сб. докл. Владимир, 2006. С. 79–82.
8. *Садовский И. Н.* Поляризационные радиотепловые методы в исследованиях параметров морского волнения: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИКИ РАН, 2007. 184 с.
9. *Apel J. R.* An improved ocean surface wave vector spectrum //J. Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 16.269–16.291.

10. *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves //J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 15.781–15.796.
11. *Romeiser R., Alpers W., Wismann V.* An improved composite surface model for the radar backscattering cross section of the ocean surface. 1. Theory of the model and optimization/validation by scatterometer data//.J Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 25.237–25.250.

Приложение 1. Перечень элементов

Конденсаторы

C1, C2	K73-17-63 В-1000 пФ $\pm 10\%$
C3...C8	чип 0805-Y5V-100 пФ $\pm 20\%$
C9...C14	K73-17-63 В-0,01 мкФ $\pm 10\%$
C15...C38	K73-17-63 В-0,1 мкФ $\pm 10\%$
C39, C40	K50-35-35 В-2200 мкФ
C41, C42	Чип 0805-Y5V-0,1 мкФ $\pm 20\%$
C43, C44	K50-35-16 В-1000 мкФ
C45, C46	Чип 0805-Y5V-0,1 мкФ $\pm 20\%$
C47, C48	K50-35-16 В-1000 мкФ
C49, C50	Чип 0805-Y5V-0,1 мкФ $\pm 20\%$

Дроссели

L1, L2	EC 24-102K-1000 мкГн $\pm 10\%$ VD15, VD16
--------	---

Резисторы

R1, R2	Чип 0,125Вт 0805-47 кОм $\pm 5\%$
R3...R8	Чип 0,125Вт 0805-470 кОм $\pm 5\%$
R9	Чип 0,125Вт 0805-1 кОм $\pm 1\%$
R10	Чип 0,125Вт 0805-10 кОм $\pm 1\%$
R11	Чип 0,125Вт 0805-68,1 Ом $\pm 1\%$
R12	Чип 0,125Вт 0805-1 кОм $\pm 1\%$
R13	Чип 0,125Вт 0805-680 Ом $\pm 1\%$
R14	Чип 0,125Вт 0805-1 кОм $\pm 1\%$
R15	C2-29в-0,125-27 Ом $\pm 1\%$
R16	C2-29в-0,125-10 кОм $\pm 1\%$
R17	Чип 0,125Вт 0805-680 Ом $\pm 1\%$
R18	Чип 0,125Вт 0805-68,1 Ом $\pm 1\%$
R19...R24	Чип 0,125Вт 0805-20 кОм $\pm 5\%$
R25...R30	Чип 0,125Вт 0805-30 кОм $\pm 5\%$
R31...R42	Чип 0,125Вт 0805-150 кОм $\pm 1\%$
R43...R48	Чип 0,125Вт 0805-100 кОм $\pm 1\%$
R49...R54	Чип 0,125Вт 0805-15 кОм $\pm 1\%$
R55...R66	Чип 0,125Вт 0805-150 кОм $\pm 1\%$
R67...R72	Чип 0,125Вт 0805-100 кОм $\pm 1\%$
R73...R78	Чип 0,125Вт 0805-124 кОм $\pm 1\%$
R79...R84	Чип 0,125Вт 0805-100 Ом $\pm 5\%$

Микросхемы

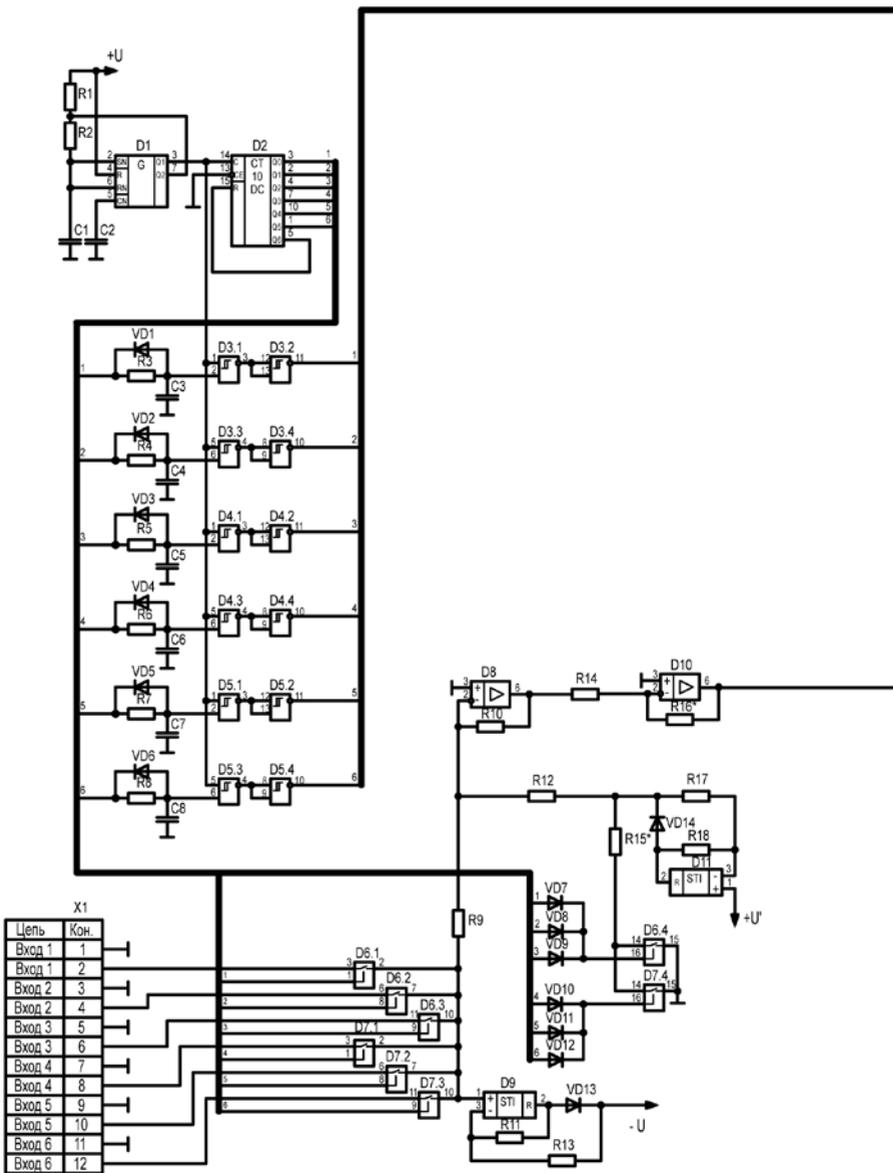
D1	TLC555CM (SO-8)
D2	CD4017BC (SO-16)
D3...D5	CD4093BC (SO-14)
D6, D7	ADG442BR (SO-16)
D8	OP27GP (SO-8)
D9	LM334Z (TO-92)
D10	OP27GP (SO-8)
D11	LM334Z (TO-92)
D12...D17	LF398N (DIP-8)
D18...D29	OP07CD (SO-8)
D30	LM7809CT (TO-220)
D31	L7909CV (TO-220)

Диоды

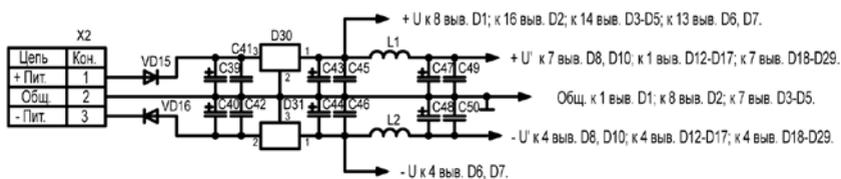
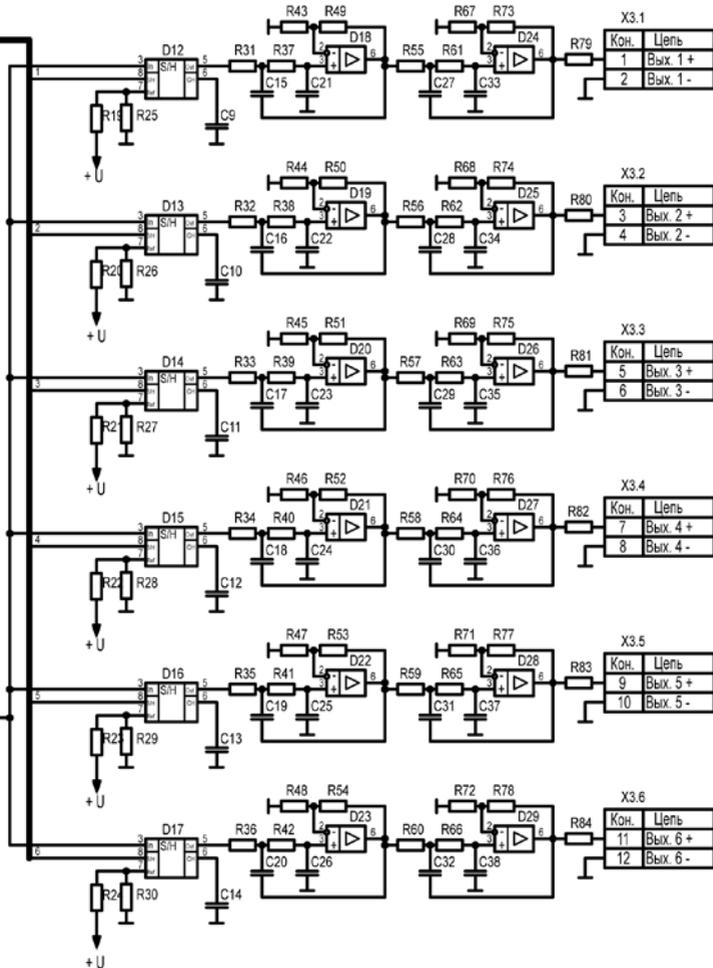
VD1...VD14	BAS16 (SOT-23)
КД258Д	

Разъемы

X12	PMГД27Б19Ш5Е2
X22	PMГД24Б10Ш5Е2
X3	PCГ19ТВ



Приложение 2. Схема электрическая принципиальная



Содержание

Введение	1
Технические характеристики прибора	2
<i>Анализ функциональных особенностей схемы.</i>	2
<i>Анализ условий эксплуатации прибора</i>	5
Определение параметров струнного преобразователя	6
Описание функциональной схемы	10
Описание электрической принципиальной схемы	12
<i>Управляющая часть</i>	12
<i>Измерительная часть</i>	14
<i>Устройства выборки-хранения</i>	16
<i>Фильтры нижних частот</i>	17
<i>Стабилизаторы источника питания</i>	19
Обработка данных	19
<i>Методика обработки данных</i>	19
<i>Результаты измерений</i>	20
<i>Проблемы и их решение</i>	27
Заключение	30
Литература	31
Приложение 1. Перечень элементов	33
Приложение 2. Схема электрическая принципиальная	35