

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ ИНЕРЦИОННЫМИ ДАТЧИКАМИ

В.А. Гайский

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: gaysky@inbox.ru

Для расширения частотного диапазона до частоты ω_m измеряемых параметров предлагается использовать n разных по инерции датчиков, n аналого-цифровых преобразователей с частотой дискретизации $\omega_0 = \omega_m/n$ и n дискретных преобразователей Фурье. Используя известный механизм элиайзинга для каждой частотной составляющей ω каждого датчика, составляют сумму из n частот наложения с весами действительной и мнимой составляющих передаточных характеристик датчиков, формируют системы линейных алгебраических уравнений из n строк, решением которых определяют n дополнительных спектральных составляющих $\theta^*(\omega^*)$ измеряемого сигнала для $nN/2$ дискретных частот в полосе $-\omega_m \leq \omega^* \leq \omega_m$.

Ключевые слова: информационный датчик, элиайзинг, широкополосность.

Поступила в редакцию: 03.05.2023. После доработки: 24.05.2023.

Введение. Пространственная и временная изменчивость различных параметров в море выражается бесконечными степенными спектрами вида $c|f|^{-m}$, где показатель степени $m = \overline{1,5}$ принимает конкретные значения 1, 3/2, 5/3, 2, 3, 4, 5 для различных сечений поля или процесса и в исследовательских целях его желательно точно измерить в как можно более широкой полосе частот [1]. Это зависит от характеристик датчика и аналого-цифрового преобразователя-дискретизатора, а также, как будет показано ниже, от их количества и информационной технологии использования первичных измерительных данных.

Все контактные датчики параметров природной среды являются инерционными, т.е. при ступенчатом изменении измеряемого параметра во времени выходной сигнал датчика достигает некоторого установившегося значения в результате переходного процесса. У ряда датчиков (гидростатического давления, электропроводности) длительность этого

процесса мала по сравнению с временем эксперимента и их инерционность не учитывается. Однако датчики гидрохимических параметров и температуры имеют высокую инерционность, приводящую к существенным динамическим погрешностям, которые затрудняют точную обработку данных, например, совокупных измерений (давление, температура, электропроводность) для получения солёности, плотности и скорости звука. В этом случае инерционность является отрицательным фактором и её стремятся уменьшить. Любые датчики имеют некоторый объем или линейную базу осреднения параметра среды и при движении в среде (зондировании или буксировки) становятся во времени инерционными. В то же время при сканировании среды со скоростью $1 - 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ частотный диапазон измеряемого параметра при пространственной неоднородности в 10^{-3} м расширяется до $10^3 - 10^4$ Гц [2].

Обеспечить точные измерения параметра среды в этом диапазоне частот

традиционным методом уменьшением инерционности датчика до 10^{-5} и повышением частоты дискретизации до $2 \cdot 10^4$ отсчетов в секунду становится невозможным.

Наиболее остро в настоящее время стоит проблема расширения частотного диапазона измерения температуры [3]. Поэтому предлагаемую информационную технологию измерения мы продемонстрируем на примере измерения температуры с использованием инерционных контактных датчиков с тензорезисторными или кварцевыми преобразователями, широко применяемыми для измерения температуры воды и воздуха [4].

При использовании датчиков температуры в глубоководных приборах на буйковых станциях, в зондирующих и буксируемых приборах чувствительные элементы датчиков помещают в прочный корпус для защиты от агрессивной внешней среды, механических воздействий и высокого гидростатического давления. При этом датчики становятся существенно инерционными и искажают измеряемый сигнал на высоких частотах. Это приводит к неприемлемым погрешностям, например, при вычислении профиля солености по совокупным данным зондирования СТД-зондами электропроводимости, температуры и давления и требует использования специальных методов динамической коррекции [4].

Требования к точности измерения температуры в океане достигают 0,005% и попытки исключить динамическую погрешность уменьшением инерционности датчиков с термочувствительными элементами дали не менее 0,05 с, а для кварцевых датчиков – несколько секунд [4]. В общем случае для исследования желательно измерять температуру в море в частотном диапазоне до нескольких сот герц. Поскольку контактные датчики температуры всегда будут инерционными, а требования по точности не будут ослабляться, то сложилось противоречие между желаемыми характеристиками

измерений по быстродействию и точности, и возможностями технической реализации на современном уровне техники.

Известны способы измерений температуры с исключением влияния параметров инерционности датчиков на результат, предусматривающие использование параллельно нескольких разных датчиков, причем на исключение n параметров необходимо $n + 1$ датчиков [5, 6].

Мы не ставим задачи исключения динамических параметров датчиков на результат измерения. Наоборот, мы используем это влияние для амплитудной модуляции частотных составляющих измеряемого сигнала. Однако для селекции n дополнительных частот расширения спектра необходимо n разных с известной инерционностью датчиков.

Основная часть. Целью предлагаемой технологии является расширение полосы частот измеряемого параметра в пределах совокупной чувствительности датчиков к измеряемому параметру с коррекцией инерционности датчиков и определением амплитуды частот наложения из-за элиазинга при частоте дискретизации внутри восстанавливаемой полосы частот. При этом нет необходимости стремиться уменьшить инерционность датчиков и увеличить частоту дискретизации и аналого-цифрового преобразования одного преобразователя. Эффект расширения полосы частоты измеряемого параметра или увеличения итоговой частоты дискретизации достигается за счет использования нескольких параллельных измерительных каналов и специальной обработки первичной измерительной информации

Рассмотрим обоснование предлагаемой информационной технологии. Предполагаем, что датчики и аналого-цифровые преобразователи линейны. При описании преобразований сигналов будем использовать частотное представление в виде вещественной (косинусной) и мнимой (синусной) частотных состав-

ляющих сигналов и передаточных функций датчиков. Известно, что из этих характеристик могут быть получены все другие амплитудно-фазовые частотные характеристики и весовые функции.

В традиционном канале измерения температуры входной сигнал, представленный в комплексной форме

$\dot{\theta}(\omega) = \theta_c(\omega) + i\theta_s(\omega)$ проходит через j -й датчик с передаточной функцией

$\dot{H}_j(\omega) = H_{jc}(\omega) + iH_{js}(\omega)$ и формированием вещественной (косинусной) $\theta_{jc}(\omega)$ и мнимой (синусной) $\theta_{js}(\omega)$ частотных составляющих в виде [7]

$$\theta_{jc}(\omega) = H_{jc}(\omega)\theta_c(\omega) - H_{js}(\omega)\theta_s(\omega), \tag{1}$$

$$\theta_{js}(\omega) = H_{js}(\omega)\theta_c(\omega) + H_{jc}(\omega)\theta_s(\omega).$$

Величины $\theta_{jc}(\omega)$ и $\theta_{js}(\omega)$ измеряемо-вычисляемы. Известно [2, 3], что при больших скоростях обтекания внешней средой в зондирующих и буксируемых приборах параметры тепловой инерции датчиков температуры становятся постоянными. Они могут быть априорно определены градуировкой. Градуировка датчика может быть выполнена на лабораторном стенде, где

возможно создание среды, соответствующей условиям использования. Поскольку величины $\theta_c(\omega)$ и $\theta_s(\omega)$ частотных составляющих измеряемой температуры будут известны, а $\theta_{jc}(\omega)$ и $\theta_{js}(\omega)$ будут измеряемыми, то из уравнений (1) можно определить частотные составляющие передаточной характеристики j -го датчика по выражению

$$H_{jc}(\omega) = \frac{\theta_{jc}(\omega)\theta_c(\omega) + \theta_{js}(\omega)\theta_s(\omega)}{\theta_c^2(\omega) + \theta_s^2(\omega)} \tag{2}$$

$$H_{js}(\omega) = \frac{\theta_{js}(\omega)\theta_c(\omega) + \theta_{jc}(\omega)\theta_s(\omega)}{\theta_c^2(\omega) + \theta_s^2(\omega)}$$

Частотные составляющие измеряемого сигнала для одной частоты ω определяются решением системы (1) в виде

$$\theta_c(\omega) = \frac{\theta_{jc}(\omega)H_{jc}(\omega) - \theta_{js}(\omega)H_{js}(\omega)}{H_{jc}^2(\omega) + H_{js}^2(\omega)}, \quad (3)$$

$$\theta_s(\omega) = \frac{\theta_{js}(\omega)H_{jc}(\omega) + \theta_{jc}(\omega)H_{js}(\omega)}{H_{jc}^2(\omega) + H_{js}^2(\omega)}.$$

Принимаем, что датчик реально с допустимой погрешностью пропускает сигнал до частоты ω_m (рис. 1в, г). На рис. 1 для примера представлены графи-

ки указанных характеристик инерционного звена 1-го порядка. Для составляющих частотных характеристик такого датчика справедливы [7]

$$H_c(\omega) = \frac{k}{1 + \omega^2 \varepsilon^2}, \quad (4)$$

$$H_s(\omega) = -\frac{k\omega\varepsilon}{1 + \omega^2 \varepsilon^2},$$

где ε – параметр тепловой инерции.

Целесообразно оценить частоту ω_m , при которой уровень действительной составляющей $H_c(\omega)$ падает до пренебрежимо малого значения.

Например, до 10^{-5} при изменении инерции ε можно показать, что это примерно соответствует зависимости $\omega_m \approx \frac{300}{\varepsilon}$, которая протабулирована в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость максимальной частоты от инерционности

ε [с]	0,1	1	2	3	4
ω_m [ц]	3000	300	150	100	75
f_m [Гц]	428	42,8	21,4	14,3	10,7

Очевидно, что часть спектра измеряемого сигнала (рис. 1а, б), которая не прошла через датчик безвозвратно теряется. Далее сигнал подвергается дискретизации и аналого-цифровому преобразованию с циклической частотой ω_0 .

Если $\omega_0 \geq 2\omega_m$, то элиазинга не будет и цифровой сигнал будет содержать более точную информацию об измеряемом процессе в полосе частот $\pm \omega_m$. Однако, решение задачи точного и быстройдей-

ствующего аналого-цифрового преобразования имеет количественные ограничения. Известно [8], что для каждого достигнутого уровня техники существует значение критерия $\delta^2\tau$, где δ – точность в относительных единицах, τ – время измерения.

С развитием техники этот критерий уменьшается. Средства измерения, которые по значению критерия близки к достигнутому уровню наиболее сложные, дорогостоящие и наименее надежны. Для современных океанологических зондов 1-го класса в канале измерения температуры критерий точность–быстродействие составляет около $3 \cdot 10^{-11}$,

при $\tau_{II} = 3 \cdot 10^{-2}$ с. Поскольку частотный диапазон измеряемой температуры достигает $n100$ Гц, то при сохранении точности требуется частота дискретизации более $n200$ Гц или время преобразования $\tau_{II} \leq 10^{-3}$ с, что примерно в 30 раз выше возможностей современной техники при традиционных способах измерения с использованием одного канала. При аналого-цифровом преобразовании с циклической частотой $\omega_0 = \frac{\omega_m}{n}$ имеет место элиайзинг частот и вместо уравнений (1) справедливы уравнения

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_0 \left[\sum_{i=-n}^n H_{jc}(i\omega_0 - \omega)\theta_c(i\omega_0 - \omega) - \sum_{i=-n}^n H_{js}(i\omega_0 - \omega)\theta_s(i\omega_0 - \omega) \right] &= \theta_{jc}(\omega) \\ \omega_0 \left[\sum_{i=-n}^n H_{js}(i\omega_0 - \omega)\theta_c(i\omega_0 - \omega) + \sum_{i=-n}^n H_{jc}(i\omega_0 - \omega)\theta_s(i\omega_0 - \omega) \right] &= \theta_{js}(\omega) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где частотные составляющие передаточной характеристики $H(p)$ датчика считаются известными и постоянными, составляющие $\theta_j(p)$ частотной характеристики выходного сигнала датчика являются измеряемо-вычисляемыми, и частотные составляющие входного для датчика измеряемого сигнала $\theta_c(i\omega_0 - \omega)$ и $\theta_s(i\omega_0 - \omega)$ при $-n \leq i \leq n$ являются неизвестными, которых n пар. Схема формирования совокупности частот $\sum_{i=-n}^n i\omega_0 - \omega^*$ для конкретной частоты $\omega^* = 0, \frac{\omega_0}{2}$ представле-

на графиком на рис. 1д, на котором точки пересечения горизонтальной прямой из ординаты ω с «пилой» элиайзинга при проектировании на ось частот абсцисс дают значения частот наложения.

Как было показано выше, один датчик дает решение (3) для одной пары неизвестных, для n пар неизвестных необходимо n датчиков с разными передаточными функциями $H_j(p)$, по-разному модулирующими сигналы в суммах (3) $\sum_{i=-n}^n H_{jc}(i\omega_0 - \omega)$ и $\sum_{i=-n}^n H_{js}(i\omega_0 - \omega)$, как это видно из уравнений (3) и графиков на рис. 1.

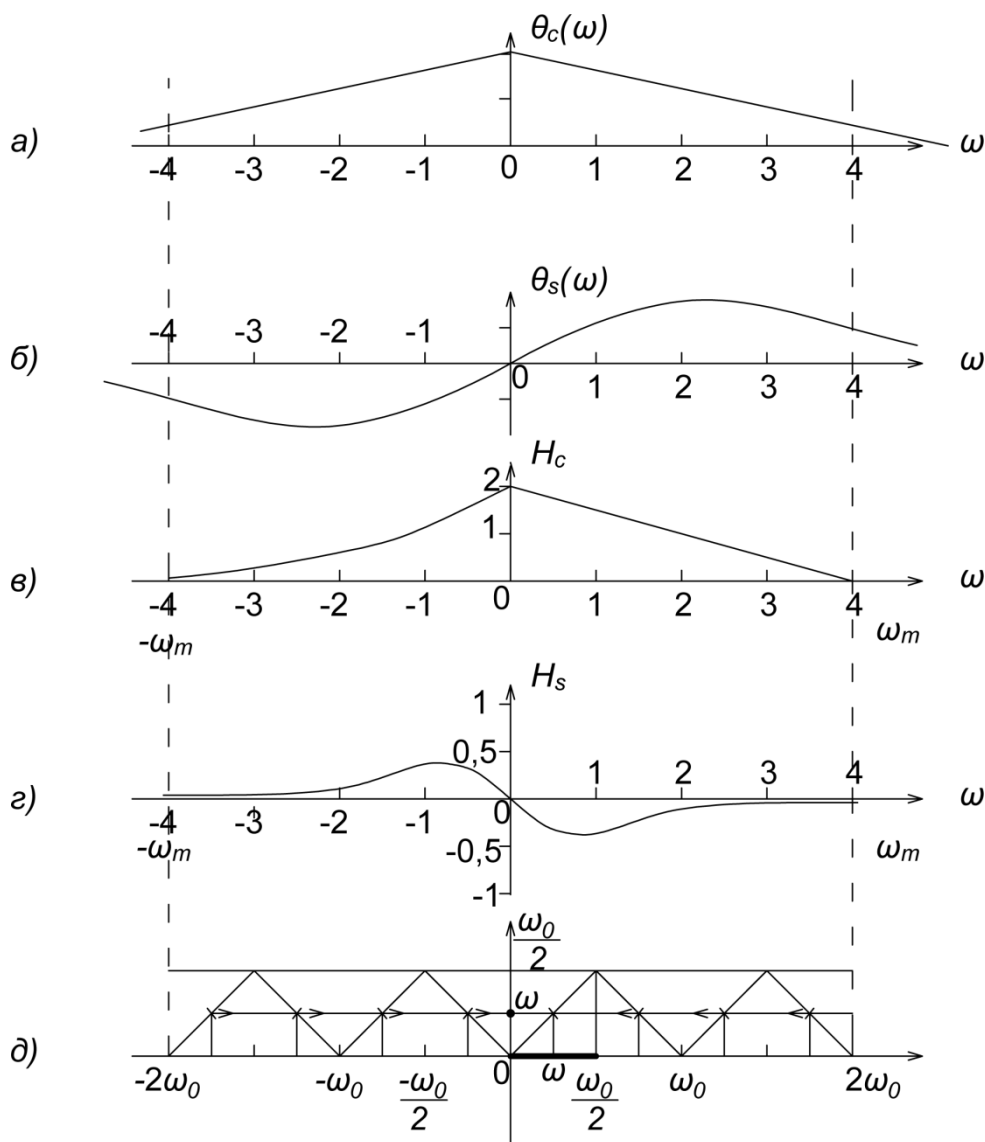


Рис. 1. Графики частотных составляющих $\theta_c(\omega)$ (а) и $\theta_s(\omega)$ (б) измеряемого параметра,

$H_{jc}(\omega)$ (в) и $H_{js}(\omega)$ (г) j -го датчика и схема элиазинга (д)

при дискретизации частотой ω_0

Fig. 1. Graphs of the frequency components $\theta_c(\omega)$ (a) and $\theta_s(\omega)$ (б) of the measured parameter,

$H_{jc}(\omega)$ (e) and $H_{js}(\omega)$ (z) j -th sensor and the aliasing scheme (d)

when sampling by frequency ω_0

Суть предлагаемой технологии измерения температуры состоит (рис. 2) в использовании n разных по инерции датчиков и в том, что дополнительно используют n включенных на выходах датчиков одинаковых аналого-цифровых

преобразователей с синфазной частотой дискретизации ω_0 , в $2n$ раз меньшей максимальной частоты ω_m пропускания датчиков $\omega_0 = \frac{\omega_m}{2n}$, и последовательно

включенных n процессоров дискретного преобразования Фурье (ДПФ $_j$) рядов из N отсчетов с интервалом τ_0 за время T , выходы которых подают на процессор решения $\frac{N}{2}$ пар систем линейных алгебраических уравнений n -го порядка (СЛАУ) относительно амплитуд частот-

ных составляющих $\sum_{i=-n}^n \theta_c(i\omega_0 - \omega)_k^*$ и $\sum_{i=-n}^n \theta_s(i\omega_0 - \omega)_k^*$ измеряемого сигнала температуры, которые при необходимости подают на процессор обратного дискретного преобразования Фурье (ОДПФ) для получения учащенного ряда nN временных отсчетов.

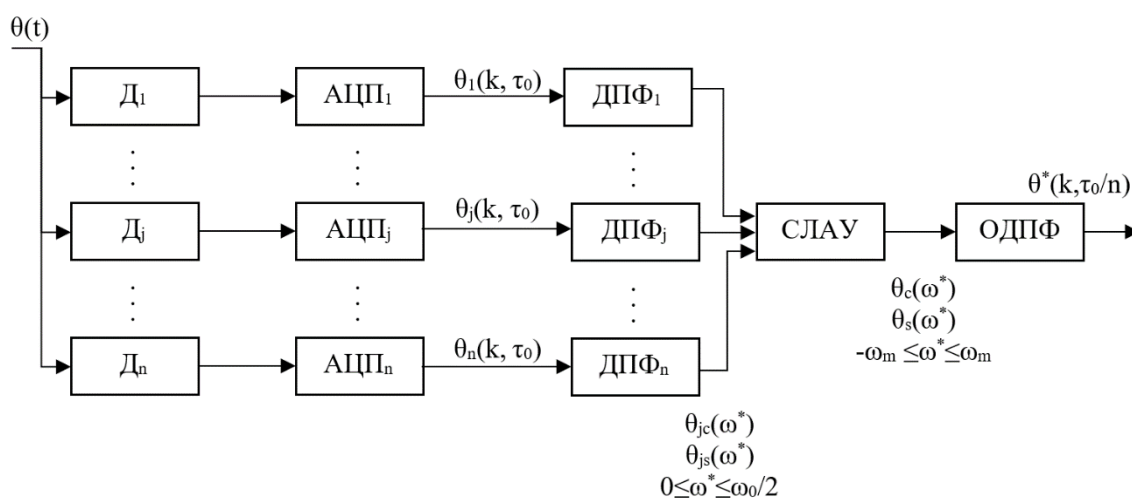


Рис. 2. Структурная схема варианта устройства для реализации предлагаемой информационной технологии измерения инерционными датчиками

Fig. 2. Structural diagram of a variant of the device for the implementation of the proposed information technology for measuring by inertial sensors

Возможны и другие варианты осуществления обработки рядов отсчетов. Например, вместо дискретного преобразования Фурье возможно быстрое преобразование Фурье (прямое и обратное), вместо использования нескольких процессоров можно реализовать всю процедуру необходимой обработки программно на одном, но более производительном процессоре [9].

Заключение. Таким образом, предлагаемой технологией измерения охвачен весь частотный диапазон $[-\omega_m, \omega_m]$ пропускания датчиков, включая обычно «вредный» ВЧ-хвост при применении более инерционного датчика, и при использовании в n раз меньшей частоты

дискретизации, которая потребовалась бы при известном традиционном преобразовании. Во временной области – это эквивалентно увеличению частоты дискретизации в n раз. При этом вместо одного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации $2\omega_m$ потребовалось n АЦП с частотой дискретизации $\frac{2\omega_m}{n}$, работающих параллельно.

Тем самым преодолевается принципиальное препятствие по критерию «квадрат точности на быстродействие» достигнутого уровня техники.

Для расширения частотного диапазона измеряемого параметра не обязательно уменьшать инерционность датчика и

не обязательно повышать частоту дискретизации и аналого-цифрового преобразования. Достаточно использовать несколько разных датчиков с известными передаточными функциями в рабочей полосе частот и несколько АЦП с пропорционально меньшей частотой дискретизации.

Это новая измерительная информационная технология, использующая антиэлиазинг и структурную избыточность датчиков и АЦП для повышения точности и быстродействия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПТС по теме "Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод" (№ госрегистрации 121122300070-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайский В.А., Гайский П.В. Погрешности дискретизации многомерных случайных гидрофизических полей со степенными спектрами. Морской гидрофизический журнал. 1994. № 6. С. 61–66.
2. Принципы построения технических средств исследования океана. М.: Наука. 1982. 324 с.
3. Парамонов А.Н., Кушнир В.М., Забурдаев В.И. Современные методы и средства измерения гидрологических параметров. К.: Наук. думка. 1979. 248 с.
4. Леваишов Д.Е. Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: Изд-во ВНИРО. 2003. 400 с.
5. Pfriem H. Zur messung Veränderlicher Temperaturen von Gasen and Flüssigkeiten. Forsch. Geb. Ingenieurwesens, 1936. Bd. 7, H. 2. S. 85–82 mit II.
6. Азизов А.М., Гордов А.Н. Точность измерительных преобразователей. Л.: Энергия. 1975. 256 с.
7. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 1982. 504 с.
8. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия. 1968. 248 с.
9. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Учебник для вузов. 2-е изд. СПб.: Питер. 2006. 751 с

MEASURING INFORMATION TECHNOLOGIES CONTROL OF ENVIRONMENT PARAMETERS WITH INERTIAL SENSORS

V.A. Gaisky

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28
E-mail: gaisky@inbox.ru

To expand the frequency range to the frequency ω_m of the measured parameters, it is proposed to use n sensors of different inertia, n analog-to-digital converters with sampling frequency $\omega_0 = \omega_m / n$ and n discrete Fourier converters. Using the known aliasing mechanism for each frequency component ω of each sensor, the sum of n the overlapping frequencies with the weights of the real and imaginary components of the transfer characteristics of the sensors is made up, systems of linear algebraic equations from n strings, the solution of which determines n additional spectral components $\theta^*(\omega^*)$ of the measured signal for $nN/2$ discrete frequencies in the band $-\omega_m^* \leq \omega \leq \omega_m^*$ are formed.

Keywords: information sensor, aliasing, broadband.

REFERENCES

1. *Gajskij V.A. and Gajskij P.V.* Pogreshnosti diskretizacii mnogomernyh sluchajnyh gidrofizicheskih polej so stepennymi spektrami (Discretization errors of multidimensional random hydrophysical fields with power-law spectra). *Morskoj gidrofizicheskij zhurnal*, 1994, No. 6, pp. 61–66.
2. *Principy postroeniya tekhnicheskikh sredstv issledovaniya okeana* (Principles of construction of technical means of ocean research). Moscow: Nauka, 1982, 324 p.
3. *Paramonov A.N., Kushnir V.M., and Ziburdaev V.I.* Sovremennye metody i sredstva izmereniya gidrologicheskikh parametrov (Modern methods and means of measuring hydrological parameters). Kiev: Nauk. dumka, 1979, 248 p.
4. *Levashov D.E.* Tekhnika ekspedicionnyh issledovanij: Instrumental'nye metody i tekhnicheskie sredstva ocenki promyslovo-znachimyh faktorov sredy (Expedition Research Technique: Instrumental Methods and Technical Means for Assessing Commercially Significant Environmental Factors). Moscow: Publishing House of VNIRO, 2003, 400 p.
5. *Pfriem H.* Zur messung Veränderlicher Temperaturen von Gasen and Flüssigkeiten. *Forsch. Geb. Ingenieurwesens*, 1936, Bd. 7, H. 2, pp. 85–82.
6. *Azizov A.M. and Gordov A.N.* Tochnost' izmeritel'nyh preobrazovatelej (Transducer accuracy). Leningrad: Energiya, 1975, 256 p.
7. *Makarov I.M. and Menskij B.M.* Linejnye avtomaticheskie sistemy (elementy teorii, metody rasche-ta i spravochnyj material) (Linear automatic systems (elements of theory, calculation methods and reference material). Moscow: Mashinostroenie, 1982, 504 p.
8. *Novickij P.V.* Osnovy informacionnoj teorii izmeritel'nyh ustrojstv (Fundamentals of information theory of measuring devices). Leningrad: Energiya, 1968, 248 p.
9. *Sergienko A.B.* Cifrovaya obrabotka signalov. Uchebnik dlya vuzov (Digital signal processing. Textbook for universities). Saint-Petersburg: Piter, 2006, 751 p.