

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИМЕТРИИ СПИРТОВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Ю. Д. Жуков, д-р техн. наук, проф.;
А. В. Зивенко, аспирант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Предложено спиртоводные растворы рассматривать в виде эмпирической метасистемы в полиметрических координатах. Разработана и проверена соответствующая математическая модель оценки нескольких показателей их качества и количества путем интерпретации одного полиметрического сигнала.

Ключевые слова: полиметрические измерения, датчики, контроль характеристик жидких сред, диэлектрики.

Анотація. Запропоновано спиртоводні розчини розглядати у вигляді емпіричної метасистеми в поліметричних координатах. Розроблена й перевірена відповідна математична модель оцінки декількох показників їх якості та кількості шляхом інтерпретації одного поліметричного сигналу.

Ключові слова: поліметричні вимірювання, датчики, контроль характеристик рідких середовищ, діелектрики.

Abstract. Alcohol-water solutions are simulated as a meta-system in poly-metric coordinates. A relevant mathematical model for assessment of several quantity and quality indicators based on a single polymetric signal interpretation is developed and verified.

Keywords: polymetric measurements, sensors, control of the characteristics of liquid medias, dielectrics.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Опыт создания и развития полиметрических информационных систем (ПМИС) и анализ их широкой межотраслевой эксплуатации в течение около 20 лет [5, 12, 13] обеспечили не только постоянное расширение области их применения, но и возрастание уровня требований к их эффективности, надежности и точности. Решение этих задач, поставленных перед разработчиками ПМИС реальными секторами производства, предполагает следующее: развитие положений самой теории полиметрических измерений [6] (на базе

дальнейшего изучения физических и математических основ полиметрии), а также совершенствование аппаратных и программных средств и компонентов ПМИС (на базе широкого использования современных электронных комплектующих и цифровых технологий). Не менее важными являются задачи метрологического и организационного обеспечения ПМИС и их производства на базе современной информационной инженерии. В перспективе на первый план могут выйти задачи создания на базе ПМИС интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами.

Настоящая статья посвящена анализу некоторых базовых положений теории полиметрии [4, 6], а именно проверки возможности одновременной количественной оценки основных показателей качества и состояния жидких сред на примере модели спиртоводных растворов (СВР). Основной процедурой анализа такой модели является декомпозиция соответствующего полиметрического сигнала с его последующей интерпретацией. Важность задачи построения моделей, которые максимально адекватно отражают изменение сигнала вследствие изменений свойств среды, определяется практической необходимостью решения обратной задачи оперативного контроля свойств технологических сред в условиях реального их производства.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ И ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работах [3, 9] в качестве входных данных для определения качественных показателей сред предлагается использовать частотные характеристики электродинамических параметров контролируемых сред. Однако существующие методы оценки частотных характеристик электродинамических параметров применимы в лабораторных условиях и требуют специального оборудования. Опираясь на предложенный авторами алгоритм оперативной оценки частотной характеристики диэлектрической проницаемости (ДП) [7], необходимо исследовать возможность получения характеристик исследуемых сред.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является построение модели, которая позволит связать оценки частотных характеристик диэлектрической проницаемости и качественные характеристики исследуемых сред, а также разработка схем экспериментального подтверждения адекватности предложенной модели.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В качестве основной гипотезы исследования выступает утверждение о том, что частотная зависимость ДП вещества реагирует на изменение интересующих показателей исследуемой среды. Необходимо исследовать возможность использования изменения частотной характеристики ДП для одновременной оценки нескольких качественных показателей сред.

В качестве экспериментального материала были выбраны дистиллированная вода, одноатомные спирты и их водные растворы. Этот выбор обусловлен тем, что чистые жидкости относительно легкодоступны и могут быть использованы для тестирования создаваемых измерительных средств, поскольку их электрофизические характеристики достаточно хорошо представлены в литературных источниках [1, 2, 10, 11].

Реальными секторами производства ставятся задачи оперативного контроля основных количественных показателей СВР (объем, масса), а также показателей, характеризующих качество СВР (в случае СВР — концентрация раствора) в некотором заданном диапазоне температур. Поэтому представим модель СВР в виде некоторой информационной метасистемы, т. е. единым набором параметров некоторой эмпирической системы, определяемой совокупностью ее компонентов (человек из миллионов клеток — единый организм; растворы, нефтепродукты, сжиженный под давлением газ в емкости — также целостные образования). По сути это более широкая система, в которую все исследуемые компоненты входят как составные части (подсистемы), между которыми существуют связи. С помощью этих связей системы, входящие в метасистему, взаимодействуют между собой. Взаимодействие между системами осуществляется с помощью входов

и выходов. В общем такая модель может быть представлена в следующем виде:

$$S = S\{V(G_T, h), M[V, \rho(T, W)], T, W\},$$

где G_T — геометрическая модель емкости (грузового танка, отсека), в которой находится СВР (калибровочные таблицы); h — толщина слоя СВР в емкости; M, ρ, T, V — соответственно масса, плотность, температура и объем СВР; W — основной показатель качества СВР — концентрация раствора, % об.

Компоненты модели СВР можно условно разбить на две группы: априорно заданные (геометрическая модель емкости) и оцениваемые по результатам обработки полиметрического сигнала (масса, температура, концентрация).

В ходе ряда экспериментов в лаборатории СП «Полисистема» (на базе системы САДКО™) с различными СВР изменялась их концентрация W_i ($i = 1, 2, \dots, n$ — номер шага по концентрации в ходе эксперимента), а по полученным сигналам вычисляются частотные характеристики ДП раствора.

Таким образом, для i -й образцовой жидкости (раствора) при фиксированной температуре имеются прямая и обратная зависимости

$$\begin{aligned} \varepsilon_i|_{T=20^\circ\text{C}} &= F(W_i, f); \\ W_i|_{T=20^\circ\text{C}} &= F^R(\varepsilon_i, f), \end{aligned}$$

где f — частота, МГц; T — температура раствора; $\varepsilon = \varepsilon_r + \sqrt{-1} \cdot \varepsilon_i$ — ДП раствора ($\varepsilon_r, \varepsilon_i$ — соответственно действительная и мнимая части ДП).

В качестве аргумента искомой зависимости для концентрации раствора от его электрофизических показателей на разных частотах предлагается использовать интегральный показатель

$$E_{Mi}|_{T=\text{const}} = F[\varepsilon_i(f)] = \int_{f_n}^{f_b} |\varepsilon_i(f)| df,$$

где f_n, f_b — значения диапазона интегрирования; $|\varepsilon_i| = \sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_i^2}$ — значение модуля ДП i -го раствора.

Полученные в ходе экспериментов значения E_M для n различных показателей концентрации приближенно можно описать функцией, которая служит для вычисления этого показателя и имеет вид

$$W(E_M) = -77,75 \ln(E_M) + 444,48. \quad (1)$$

Эта зависимость позволяет оценить концентрацию раствора W по экспериментально определяемому интегральному показателю E_M (рис. 1).

Во втором приближении необходимо изучить частотную характеристику ДП и соответственно интегральный показатель в зависимости одновременно от температуры и концентрации раствора. В этом случае интегральный показатель для i -й концентрации раствора и его j -й температуры будет иметь вид

$$E_{ij}(W_i, T_j) = F[\varepsilon(W_i, T_j, f)] = \int_{f_n}^{f_b} |\varepsilon_{ij}(f)| df. \quad (2)$$

Для оценки зависимостей типа (2) и построения эмпирических зависимостей типа (1) необходимо сформировать соответствующую базу данных (БД) для использования в полиметрических системах САДКО с расширенными функциональными возможностями (оценка качественных показателей сред). Такая БД должна содержать в себе данные о частотной характеристике ДП вещества, некоторые справочные данные о самом веществе, данные обо всех требуемых качественных показателях, в нашем случае — о температуре и концентрации раствора. База данных должна обеспечивать добавление новых записей, быструю выборку образцовых частотных характеристик ДП (возможность сортировки, селекции по заданным условиям). Структура разработанной БД может иметь вид, представленный в табл. 1 (для конкретного класса среды, например метилового спирта).

Для формирования БД образцовых спектров был произведен эксперимент

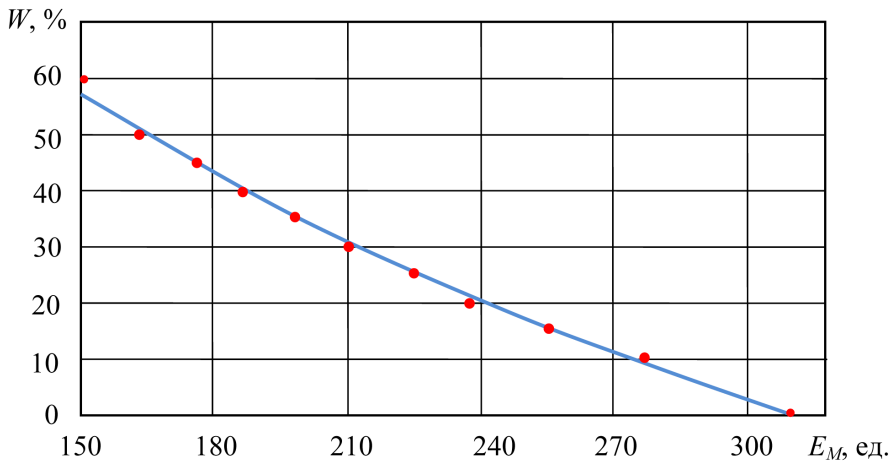


Рис. 1. Зависимость концентрации раствора от оценки интегрального показателя

Таблица 1. Пример структуры базы данных образцовых частотных характеристик исследуемых сред

Номер записи	T , °C	W , %	f , МГц	$ \varepsilon(f)$
1	T_0	w_0	f_0	$ \varepsilon _{000}$
2	T_1	w_0	f_0	$ \varepsilon _{100}$
...	...	w_0	f_0	...
j	T_j	w_0	f_0	$ \varepsilon _{j00}$
$j+1$	T_0	w_1	f_0	$ \varepsilon _{010}$
...	f_0	...
$i j$	T_j	w_i	f_0	$ \varepsilon _{j i 0}$
$i j + 1$	T_0	w_0	f_i	$ \varepsilon _{0 0 i}$
...
$i j k$	T_j	w_i	f_k	$ \varepsilon _{j i k}$

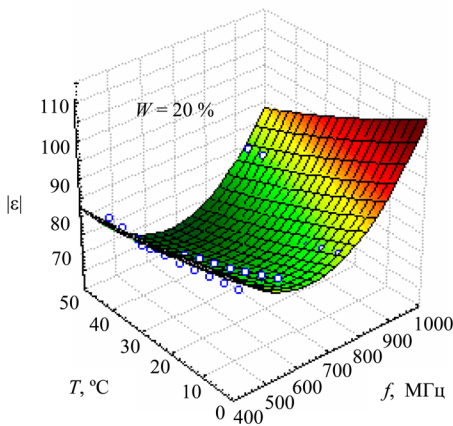


Рис. 2. Аппроксимация экспериментально полученных данных

в диапазоне температур 0...50 °C и концентраций раствора метилового спирта 0...80 %. Полученные частотные характеристики для сравнения и анализа были дополнены данными из доступной справочной литературы [1, 2, 10, 11].

Выборка из БД частотных зависимостей ДП с учетом температуры и концентрации позволяет сформировать множество точек некоторой поверхности в системе координат $T-f-|\varepsilon|$ (рис. 2).

По приведенным на рис. 2 и 3 данным видно, что с повышением температуры среды изменяется характер частотной зависимости ДП: с увеличением температуры модуль ДП уменьшается. Категорирование полученных данных

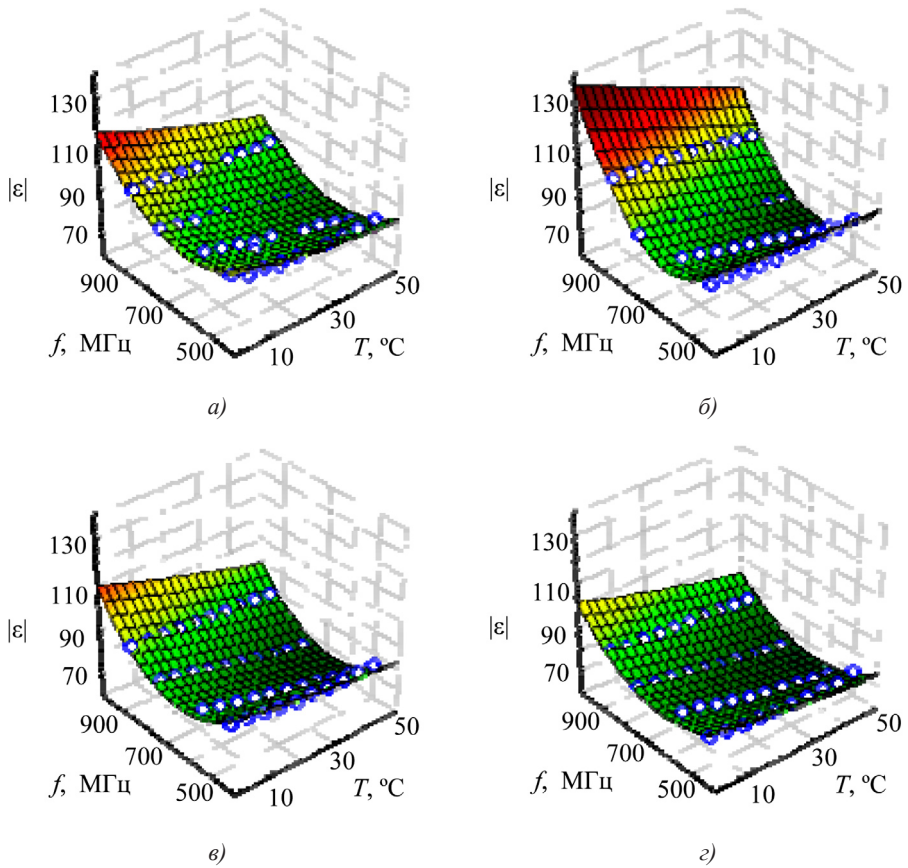


Рис. 3. Данные экспериментов для различных концентраций раствора: а) $W = 0\%$; б) $W = 10\%$; в) $W = 20\%$; г) $W = 30\%$

по концентрации W раствора позволяет более наглядно отобразить изменения частотной характеристики в зависимости от температуры (на рис. 3 для упрощения приведены данные в диапазоне $W = 0...30\%$).

По полученным данным видно, что частотные зависимости ДП для различных концентраций среды не совпадают, следовательно очевидная разница, выраженная в некоторых количественных оценках, может быть основой для косвенного измерения показателя качества СВР.

Поскольку после измерений в БД имеем дискретный набор данных для k частот, то от интеграла (2) можно перейти к соответствующей сумме

$$E_{Mij}(W_i, T_j) = F[\varepsilon(f_k, T_j, W_i)] = \sum_k |\varepsilon(T_j, W_i) \cdot \Delta f_k|. \quad (3)$$

Выбор диапазона интегрирования $f_n...f_b$ в первом приближении можно производить исходя из условий максимальной чувствительности устройства к изменению измеряемых параметров. Так, для случая с концентрацией W и температурой T имеет смысл воспользоваться производными по соответствующим направлениям:

$$\left| \frac{\partial E}{\partial T} \right| \cdot \left| \frac{\partial E}{\partial W} \right|_{f_b, f_n} \rightarrow \max;$$

$$\Delta f = f_b - f_n \rightarrow \min.$$

Требование по минимизации диапазона интегрирования обусловлено: 1) ограничением частотного диапазона аппаратуры (на практике частотный диапазон полиметрической системы ограничен полосой в несколько ГГц); 2) стремлением уменьшить вычислительные затраты на обработку данных. В общем вопрос выбора диапазона интегрирования и его оптимизации является достаточно сложным и требует отдельного исследования, поэтому в данной статье он не рассматривается. В нашем случае $f_n = 0,1$ ГГц, $f_b = 1,0$ ГГц.

Полученный с помощью выражения (3) интегральный показатель представляет собой двумерный массив данных, в котором каждой температуре и концентрации соответствует значение E_{Mij} . Полученные данные можно аппроксимировать поверхностью (рис. 4).

Характер приведенной на рис. 4 поверхности в координатах T – W позволяет однозначно определить температуру среды, если известна ее концентрация, и наоборот.

Для одновременного измерения концентрации и температуры данной зависимости недостаточно, необходимо получить дополнительное уравнение.

Способ определения частотной зависимости ДП, приведенный в [7], позволяет получать оперативную оценку частотной зависимости модуля ДП — $|\varepsilon|$, а также частотную зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\delta)$ (или, что то же самое, мнимую ε_I и действительную ε_R части ДП):

$$|\varepsilon| = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_I^2}; \text{tg} \delta = \frac{\varepsilon_I}{\varepsilon_R}.$$

Изменяя соответствующим образом структуру БД (см. табл. 1), можно перейти от вычисления интегрального показателя по модулю ДП E_M (3) к вычислению двух интегральных показателей:

$$E_{Rij}(W_i, T_j) = F[\varepsilon_R(f_k, T_j, W_i)] = \int_{f_n}^{f_b} \varepsilon_R(f) df;$$

$$E_{Iij}(W_i, T_j) = F[\varepsilon_I(f_k, T_j, W_i)] = \int_{f_n}^{f_b} \varepsilon_I(f) df,$$

где E_R — интегральный показатель, вычисляемый по частотной зависимости действительной части ДП; E_I — интегральный показатель, вычисляемый по частотной зависимости мнимой части ДП.

Для имеющейся экспериментальной БД (см. данные рис. 2, 3) были вычислены интегральные показатели (рис. 5).

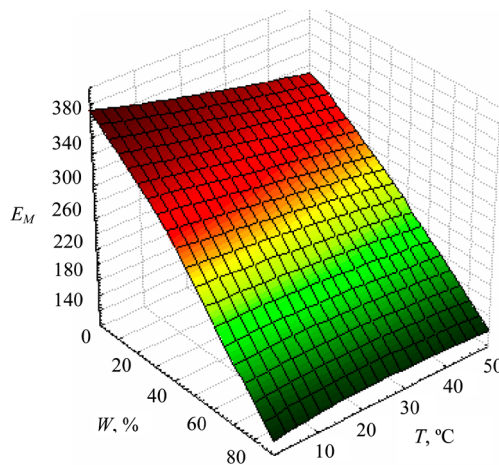


Рис. 4. Зависимость интегрального показателя от концентрации и температуры раствора

На рис. 6 представлены графики зависимостей качественных показателей среды: температуры и концентрации раствора в координатах оцениваемых интегральных показателей.

Полученные эмпирические зависимости позволяют производить с достаточной точностью одновременную оценку двух параметров исследуемой среды (концентрации и температуры) с помощью одного измерительного канала.

Таким образом, с применением обработки полиметрического сигнала во временной и частотной областях и использованием специальной БД для предварительной калибровки по качественным показателям сред появляется возможность оценки уровня контролируемой среды, температуры и концентрации компонентов без привлечения дополнительных измерительных каналов. По результатам исследований был

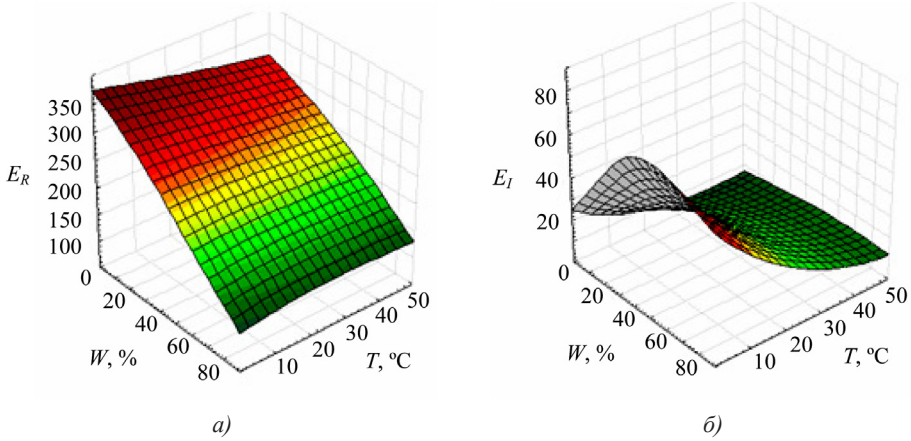


Рис. 5. Зависимость интегральных показателей от концентрации и температуры раствора: а) $E_R = f(W, T)$; б) $E_I = f(W, T)$

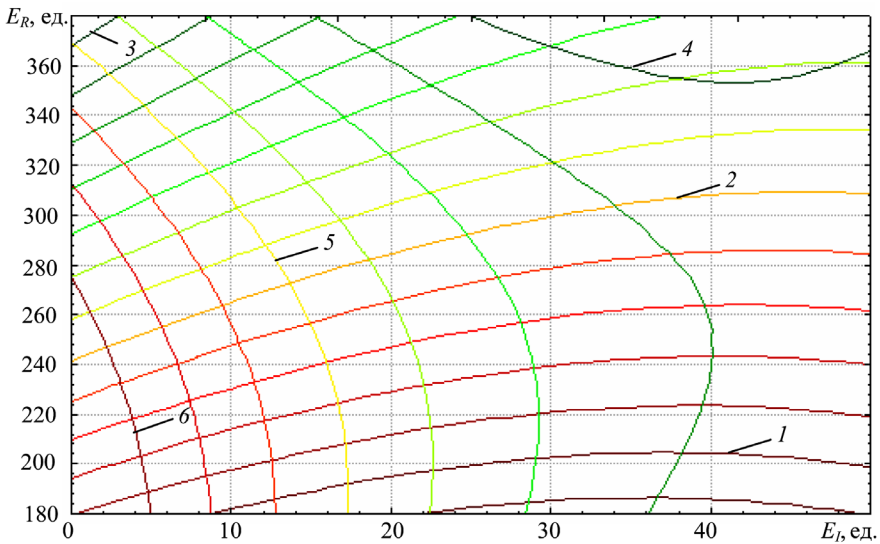


Рис. 6. Зависимости показателей среды в координатах интегральных показателей: 1 — $W = 90\%$; 2 — $W = 50\%$; 3 — $W = 0\%$; 4 — $T = 20^\circ\text{C}$; 5 — $T = 40^\circ\text{C}$; 6 — $T = 40^\circ\text{C}$

запатентован способ измерения уровня, температуры и показателей качества жидких сред [8].

ВЫВОДЫ

Задачи исследования были решены в полной мере: 1) построена математическая модель, которая связывает оценки частотных характеристик диэлектрической проницаемости и характеристики исследуемых сред (в данном случае спиртоводных растворов); 2) результаты экспериментов подтвердили возможность одновременной оперативной оценки не-

скольких показателей состояния (количественных и качественных показателей) спиртоводных растворов с помощью одного измерительного преобразователя (адекватность разработанной модели подтверждена экспериментально); 3) перспективными направлениями исследования являются: оценка погрешностей рассмотренного способа измерений, выбор и оптимизация частотного диапазона для вычисления интегральных показателей количества и качества иных растворов, формирование и совершенствование экспериментальных БД.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Ахадов, Я. Ю.** Диэлектрические параметры чистых жидкостей [Текст] : справочник / Я. Ю. Ахадов. — М. : МАИ, 1999. — 856 с.
- [2] **Ахадов, Я. Ю.** Диэлектрические свойства бинарных растворов [Текст] / Я. Ю. Ахадов. — М. : Наука, 1977. — 400 с.
- [3] **Гордеев, Б. Н.** Математическая модель полиметрических измерений [Текст] / Б. Н. Гордеев // Научно-методический журнал Черноморского государственного университета им. Петра Могили. — 2009. — Т. 111, вып. 98. — С. 175–181.
- [4] **Гордеев, Б. Н.** Развитие теории и практическое применение компьютеризированных полиметрических систем оперативного контроля количественных и качественных характеристик жидких сред (энергосистем) [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05 : защищена 29.03.11 : утв. 11.11.11 / Гордеев Борис Николаевич. — К., 2011. — 422 с.
- [5] **Жуков, Ю. Д.** Импульсная полиметрия в бортовых системах экологического мониторинга судов [Текст] / Ю. Д. Жуков, Б. Н. Гордеев // Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении : тезисы докладов Первой Международной науч.-техн. конф. — Николаев : УГМТУ, 1996. — С. 81.
- [6] **Жуков, Ю. Д.** Теория полиметрических измерений [Текст] / Ю. Д. Жуков // Инновации в судостроении и океанотехнике : материалы Первой Международной науч.-техн. конф. — Николаев : НУК, 2010. — С. 387–389.
- [7] **Зивенко, А. В.** Оперативная оценка спектра диэлектрической проницаемости в полиметрических системах [Электронный ресурс] / Ю. Д. Жуков, Б. Н. Гордеев, А. В. Зивенко // Электронное издание «Вісник Національного університету кораблебудування». — Миколаїв : НУК, 2010. — № 2. — Режим доступа: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [8] **Пат. 59822 Україна, МПК G01N11/00, G01F23/28 (2006.01).** Спосіб визначення рівня, температури та фізичних характеристик рідких середовищ [Текст] / Зивенко О. В., Жуков Ю. Д., Гордеев Б. М. — u201100492; заявл. 17.01.11 ; опубл. 25.05.11 ; Бюл. № 10/2011.

- [9] **Скворцов, Б.В.** Приборы и системы контроля качества углеводородных топлив [Текст] / Б. В. Скворцов, Н. Е. Конюхов, В. Н. Астапов. — М. : Энергоатомиздат, 2000. — 264 с.
- [10] **Kaatze, U.** The complex dielectric spektrum of aqueous methanol and isopraponol solution [Text] / U. Kaatze, M. Schafer, R. Pottel // II Z. Phys. Chem. — 1989. — V. 165. — P. 3292–3294.
- [11] **Mashimo, S.** Dielektric relaxation of mixtures of water and primary alcohol [Text] / S. Mashimo, S. Kuwabara // II J. Chem. Phys. — 1989. — V. 90, nr. 6. — P. 3292–3294.
- [12] **Zhukov, Yu.** Soliton-like Models of Poly-metric Monitoring Systems [Text] / Yu. Zhukov // Proc. of Int. Symposium «Shipbuilding problems: state, ideas, and solutions». — Nikolaev : USMTU, 1997. — P. 251–252.
- [13] **Zhukov, Yu. D.** The concept of cloned polymetric signal and its application in monitoring and expert systems [Text] / B. N. Gordeev, Yu. D. Zhukov, A. V. Leontiev // Proc. of 3rd International Conference on Marine Industry. — Vol. 2. — Varna : MARIND2001 Press, 2001. — P. 199–203.