https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-487-492

УДК 642.2:66

Восстановление аппаратной функции спектральных колориметров с помощью методов регуляризации

Кандидаты техн. наук, доценты М. А. Раджабова[1)], Б. И. Ешматова[1)], Н. К. Бабаназарова[2)]

[1)]Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова (Ташкент, Республика Узбекистан),
[2)]Бухарский инженерно-технологический институт (Бухара, Республика Узбекистан)

Реферат. Рассмотрена задача определения спектральной характеристики контролируемого образца в условиях ограниченной априорной информации с использованием методов регуляризации. Изменение состояния поверхности оптических элементов существенно увеличивает рассеяние света, поэтому нужен регулярный учет величины рассеянного света в световом потоке, отраженном от поверхности как измеряемого, так и сравнительного образцов. Преобразование светового потока в электрический сигнал фотоприемника также может происходить нелинейно. Это требует разработки такого метода измерения, который бы учитывал как рассеянный свет, так и различные нелинейности измерительной схемы. Известно, что математическая модель измерения описывается интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода, его решение в условиях принятых предположений рекомендуется искать в виде матричного уравнения с использованием рекуррентной процедуры. Принимая во внимание, что оценивание погрешностей исходных данных в уравнении связано с определенными трудностями, в рассматриваемом случае параметр регуляризации целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности. Характерным недостатком известных аналитических и экспериментальных методов определения аппаратной функции спектрального прибора является то, что они не учитывают ее изменение во время эксплуатации. Поскольку реальная аппаратная функция прибора обычно отличается от кривой Гаусса, использование аппаратных функций в виде аналитических зависимостей не всегда дает желаемый результат, а для экспериментальных методов требуется специальная аппаратура с квазимонохроматическим источником излучения. В статье предложен алгоритм восстановления аппаратной функции спектрального прибора, основанный на регулярных методах решения некорректных задач. Оценку матричного оператора аппаратной функции можно получить на основе явных алгоритмов оценивания метода наименьших квадратов. Указана целесообразность выбора такого значения параметра регуляризации, которое минимизирует принятую характеристику точности решения.

Ключевые слова: колориметры, отражающие образцы, пропускающие образцы, фотометрический шар, рассеяние света, фотометрическая шкала, калибровка, спектральная характеристика, аппаратная функция, уравнение Фредгольма, некорректные задачи, байесовский подход, параметр регуляризации

Для цитирования: Раджабова, М. А. Восстановление аппаратной функции спектральных колориметров с помощью методов регуляризации / М. А. Раджабова, Б. И. Ешматова, Н. К. Бабаназарова // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 487–492. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-487-492

Restoration of Hardware Function of Spectral Colorimeters Using Regularization Methods

M. A. Radjabova[1)], B. I. Eshmatova[1)], N. K. Babanazarova[2)]

[1)]Tashkent State Technical University named after Islam Karimov (Tashkent, Republic of Uzbekistan),
[2)]Bukhara Institute of Engineering and Technology (Bukhara, Republic of Uzbekistan)

Abstract. The problem of determining the spectral characteristic of a controlled sample under conditions of limited a priori information using regularization methods is considered in the paper. A change in the state of the surface of optical elements

Адрес для переписки
Бабаназарова Наргиса Камиловна
Бухарский инженерно-технологический институт
ул. К. Муртазаева, 15,
200117, г. Бухара, Республика Узбекистан
Тел.: +99 891 406-00-09
nargisa2003@list.ru

Address for correspondence
Babanazarova Nargisa K.
Bukhara Institute of Engineering and Technology
15, K. Murtazaev str.,
200117, Bukhara, Republic of Uzbekistan
Tel.: +99 891 406-00-09
nargisa2003@list.ru

significantly increases the light scattering, so it is necessary regularly to take into account the amount of scattered light in the light flux reflected from the surface and the measured and comparative samples. The conversion of the light flux into the electrical signal of the photodetector can also occur non-linearly. This requires the development of such measurement method that considers both the scattered light and various non-linearities of the measuring circuit. It is known that the mathematical model of measurement is described by the Fredholm integral equation of the first kind, its solution under the accepted assumptions is recommended to be sought in the form of a matrix equation using a recurring procedure. With regard to the fact that the estimation of the initial data errors in the equation is associated with certain difficulties, in the case under consideration, it is advisable to determine the regularization parameter based on the method of quasi-optimality. A characteristic disadvantage of the known analytical and experimental methods for determining the hardware function of a spectral device is that they do not take into account its change during operation. Since the actual hardware function of the device usually differs from the Gaussian curve, the use of hardware functions in the form of analytical dependencies does not always give the desired result, and for experimental methods, special equipment with a quasi-monochromatic radiation source is required. An algorithm for restoring the hardware function of a spectral device based on regular methods for solving ill-posed problems is proposed. The estimation of the matrix operator of the hardware function is proposed to be obtained on the basis of explicit least squares estimation algorithms. The expediency of choosing a value of the regularization parameter that minimizes the accepted characteristic of the accuracy of the solution is indicated.

Keywords: colorimeters, reflective samples, transmissive samples, photometric ball, light scattering, photometric scale, calibration, spectral characteristic, hardware function, Fredholm equation, incorrect tasks, Bayesian approach, regularization parameter

For citation: Radjabova M. A., Eshmatova B. I., Babanazarova N. K. (2021) Restoration of Hardware Function of Spectral Colorimeters Using Regularization Methods. *Science and Technique*. 20 (6), 487–492. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-487-492 (in Russian)

Введение

Разработка колориметров с заданными эксплуатационными характеристиками, такими как стабильность и точность, условия освещения и наблюдения, форма контролируемых изделий, высокое быстродействие, требует оптимизации их схемных и конструктивных параметров [1, 2]. Оптические схемы фотоэлектрических колориметров предполагают в своем составе различные оптические элементы, на которых происходит рассеяние света. Изменение состояния поверхности оптических элементов, например оседание пыли, существенно увеличивает рассеяние света. Поэтому возникает задача регулярного учета величины рассеянного света в световом потоке, отраженном от поверхности как измеряемого, так и сравнительного образцов. Преобразование светового потока в электрический сигнал фотоприемника также может происходить нелинейно. Все это требует разработки такого метода калибровки и измерения, который бы учитывал как рассеянный свет, так и различные нелинейности измерительной схемы, предполагая, что она содержит измерительный и сравнительный каналы.

Калибровка фотометрической шкалы спектрального прибора

Световой поток, отраженный измеряемым образцом в телесный угол ω, определяется по формуле

$$\Phi_и(\lambda) = \beta_и(\lambda) E(\lambda) \frac{d^2}{4} \omega \cos\alpha, \qquad (1)$$

где d – диаметр измеряемого отверстия шара; $E(\lambda)$ – освещенность внутренней поверхности фотометрического шара; α – угол между нормалью к образцу и направлением наблюдения; $\beta_и(\lambda)$ – спектральный апертурный коэффициент отражения измеряемого образца.

Соотношение (1) учитывает влияние рассеянного света внутри фотометрического шара и изменение освещенности в шаре при образцах с различными значениями $\beta_и(\lambda)$ [3]. Если установлен режим измерения прозрачных образцов, то конечная точка определяется при отсутствии образца в измерительном канале ($\tau(\lambda_i) = 100$ %), а начальная – установкой непрозрачной заслонки ($\tau(\lambda_i) = 0$ %). В режиме измерения отражающих образцов конечная точка фотометрической шкалы определяется по «белому» стеклу с известным спектральным коэффициентом отражения, а начальная – по специальному «черному» образцу с ловушкой.

Значения спектральных коэффициентов отражения «белого» и «черного» образцов хранятся в памяти микропроцессора прибора в течение всего времени, на которое действителен аттестат на образец, а соотношения сигналов фотоприемника при измерении исследуемых «белого» и «черного» образцов, полученные в результате калибровки, – в оперативной памяти устройства в течение гарантированного времени, за которое нестабильность не превысит установленную величину.

Уменьшить погрешность, обусловленную нелинейностью фотометрической шкалы, можно, производя калибровку фотометрической шкалы не в двух точках, а в нескольких, т. е. аппроксимируя нелинейную фотометрическую шкалу рядом прямых с различными наклонами. Этими вопросами занимались разработчики фотометрических колориметров «Спектротон» и «Пульсар» ОКБА НПО «Химавтоматика» (г. Чирчик, Узбекистан) совместно с исследователями Ташкентского государственного технического университета [4, 5]. Такой подход может значительно уменьшить систематическую погрешность, обусловленную нелинейностью фотометрической шкалы, но требует значительно большего объема памяти. Кроме того, увеличивается время процедуры калибровки. Помимо перечисленных выше фактов, полуавтоматическая калибровка учитывает нестабильность электронных схем, изменение чувствительности фотоприемника и т. д.

Алгоритм определения спектральной характеристики методом регуляризации

Совершенствование микропроцессорной техники предполагает замену аппаратного исполнения ряда узлов и схем прибора вычислительными и управляющими процедурами [6]. Известно, что линейная математическая модель оптического измерения описывается интегральным уравнением Фредгольма 1-го рода

$$u(\lambda) = \int_a^b A(\lambda, \lambda')\tau(\lambda')d\lambda', \; c \le \lambda \le d, \qquad (2)$$

где $u(\lambda)$ – измеренная спектральная характеристика; $A(\lambda, \lambda')$ – аппаратная функция, характеризующая реальный измерительно-вычислительный комплекс; $\tau(\lambda')$ – истинная спектральная характеристика образца; a, b – границы истинного спектра; c, d – границы экспериментального спектра.

Пусть значения точного решения $\tau(\lambda')$ в точках $\lambda'_j\left(j = \overline{1, n}\right)$ представляют собой n-мерный вектор $\tau = \left|\tau\left(\lambda'_1\right), \tau\left(\lambda'_2\right), ..., \tau\left(\lambda'_n\right)\right|$. Используя известные квадратурные формулы вычисления определенных интегралов [4], основное интегральное уравнение (2) можно представить в матричной форме

$$A\tau = u, \qquad (3)$$

где A – прямоугольная матрица размерности $m \times n$; $u = \left| u_1, u_2, \ldots, u_m \right|^T$ – вектор измерений размерности m.

Будем считать, что вместо точной правой части $\overline{u}$ уравнения (3) задан $u = \overline{u} + \xi$, где шум измерения ξ, не коррелированный с u, имеет нулевое среднее и ковариационную матрицу V_ξ, а также подчиняется нормальному распределению. Кроме того, будем полагать, что априорная информация о векторе τ задана математическим ожиданием $\tau_о$ и ковариационной матрицей $\Gamma_о$. Следуя байесовскому подходу, в условиях принятых предположений искомое решение τ с учетом обратимости матриц $\Gamma_о$ и V_ξ можно определить из уравнения [7]

$$\left(\Gamma_о^{-1} + A^T V_\xi^{-1} A\right)\tau = A^T V_\xi^{-1} u + \Gamma_о^{-1}\tau_о. \qquad (4)$$

Однако в большинстве практических случаев априорное распределение вектора τ неизвестно. В этих условиях целесообразно искомое решение τ определять из системы алгебраических уравнений вида

$$\left(\alpha G + A^T V_\xi^{-1} A\right)\tau = A^T V_\xi^{-1} u, \qquad (5)$$

где α – параметр регуляризации; G – неотрицательно определенная симметричная матрица.

Принимая во внимание, что оценивание погрешностей исходных данных в (3) связано с некоторыми трудностями, в рассматриваемом случае параметр регуляризации α целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности [8]

$$\inf_\alpha \left\| \alpha d\tau_\alpha / d\alpha \right\|^2. \qquad (6)$$

В случае, если ковариационная матрица V_ξ неизвестна, выбор параметра регуляризации α можно осуществлять при помощи метода перекрестной значимости. В соответствии с этим методом в качестве параметра регуляризации принимается такое значение α, которое доставляет минимум функционалу

$$D_0(\alpha) = \frac{1}{m}\left\|u - A_\tau\right\|^2 \Big/ \left\{1 - S_p\left[\Phi(\alpha)\right]/m\right\}^2, \quad (7)$$

где $\Phi(\alpha) = A(\alpha G + A^T A)^{-1}$; $S_p[\cdot]$ – индекс следа матрицы.

В [9] подчеркивается, что рассматриваемая задача определения спектральной характеристики контролируемого образца в условиях ограниченной априорной информации относительно характеристик ошибок измерений относится к классу некорректных стохастических задач и при ее решении естественно также применять методы и концепции, разработанные для этого класса задач. В частности, можно использовать рекуррентную процедуру вида:

$$\tau_{t+1}^{\alpha} = \tau_t^{\alpha} + \frac{P_t^{\alpha} a_{t+1}^T}{\alpha + a_{t+1} P_t^{\alpha} a_{t+1}^T}\left(u_{t+1} - a_{t+1}\tau_t^T\right), \ \tau_0^{\alpha} = 0;$$

$$P_{t+1}^{\alpha} = P_t^{\alpha} + \frac{P_t^{\alpha} a_{t+1}^T a_{t+1} P_t^T}{\alpha + a_{t+1} P_t^T a_{t+1}^T} P_0^{\alpha} = E, \ \alpha > 0, \quad (8)$$

где a_t, $t = \overline{1, m}$ – строки матрицы A; E – единичная матрица $n \times n$.

Параметр регуляризации α в (8) также целесообразно определять на основе способа квазиоптимальности. Можно показать, что

$$\tau_t^{\alpha} = \left(\alpha E + A_t^T A_t\right)^{-1} A_t^T u_t, \quad (9)$$

где $A_t = \left(a_1, a_2, ..., a_t\right)^T$; $u_t = A_t \tau_t$, причем $\tau_t^{\alpha} \to \tau_t$ при $\alpha \to 0$.

Восстановление аппаратной функции спектрального прибора

Исследуемый истинный спектр $\tau(\lambda_i')$, как правило, искажается при измерении аппаратной функцией $A(\lambda, \lambda')$ спектрального прибора, являющейся сверткой аппаратной функции фотометрической части прибора и аппаратной функции приемно-регистрирующей системы [9]. Множество существующих методов определения аппаратной функции можно разделить на две группы: экспериментальные и аналитические. Экспериментальный способ должен удовлетворять ряду требований: аппаратная функция должна определяться при условиях, соответствующих нормальному режиму работы прибора (способ освещения щели, ширина щели, область спектра, постоянная времени, шумы), способ должен обеспечивать определение аппаратной функции широкого класса приборов разной разрешающей силы, а также не быть очень трудоемким. Аналитические методы основаны на законах геометрической оптики и полезны при рассмотрении экспериментальных результатов, особенно на этапе проектирования нового прибора и выбора его принципиальной оптической схемы. Как правило, применяется графический метод элементарных площадей.

Аналитические методы достаточно громоздки, а для экспериментальных способов требуется специальная аппаратура с квазимонохроматическим источником излучения. Кроме того, трудно одновременно удовлетворить все требования, предъявляемые к экспериментальным методам. Общий характерный недостаток обоих методов – они не учитывают изменение аппаратной функции во время эксплуатации. В условиях серийного производства приборов эти недостатки будут носить принципиальный характер. Следовательно, актуален вопрос разработки надежного метода определения аппаратной функции. В [9, 10] предлагается алгоритм восстановления аппаратной функции спектрального прибора, основанный на регулярных методах решения некорректных задач.

Будем полагать, что имеются результаты p измерений (j = 1, 2, ..., p) спектральных характеристик исследуемых образцов. Тогда на основе располагаемых данных, используя известные квадратурные формулы вычисления определенных интегралов в (2), можно прийти к матричному уравнению

$$U = AT + E, \quad (10)$$

где U, A, T, E – матрицы вещественных параметров размерностей $[m \times p]$, $[m \times n]$, $[n \times p]$, $[m \times p]$ соответственно.

Оценку матричного оператора A аппаратной функции, согласно (10), можно получить на основе явных МНК-алгоритмов оценивания, задаваемых соотношениями:

$$\hat{A} = \arg\min I = \tilde{U}\tilde{T}^{+},\ \tilde{T}^{+} = \left(\tilde{T}^{T}\tilde{T} + \alpha I\right)^{-1}\tilde{T}^{T},\ \alpha > 0;$$

$$\tilde{U} = \Lambda^{-1/2}U,\ \tilde{T} = \Lambda^{-1/2}T,$$
$$I = M\left\{tr(U - AT)^{T}\Lambda^{-1}(U - AT)\right\}, \tag{11}$$

где Λ – симметричная положительно определенная весовая матрица.

В (11) присутствует неопределенный параметр α. Выбор его представляет основную сложность при использовании рекомендуемых алгоритмов. Во-первых, параметр α должен быть определенным образом согласован с погрешностями исходных данных A и U, для того чтобы решение было регуляризованным. Во-вторых, с точки зрения точности решения, желательно из множества значений α, удовлетворяющих требованию согласования, в качестве параметра регуляризации взять такое, которое минимизирует принятую числовую характеристику точности решения (например, среднеквадратическую ошибку). В условиях отсутствия априорной информации о погрешностях задания исходных данных параметр регуляризации α в (11) рационально определить на основе способов квазиоптимальности или отношений.

Приближенное решение (4) можно также получить в случае $\Lambda^{-1} = \mathrm{diag}\left[g(1), , g(2), ..., g(n)\right]$ при помощи следующего рекуррентного алгоритма взвешенного МНК-метода наименьших квадратов [10]:

$$a_i^T\left(\lambda+1\right) = a_i^T(\lambda) + g\left(v+1\right)P(\lambda)t_j\left(v+1\right)\times$$
$$\times\left[u_{ij}\left(v+1\right) - t_j^T\left(v+1\right)a_i^T(\lambda)\right]\times$$
$$\times\left[\alpha + g\left(v+1\right)t_j^T\left(v+1\right)P(\lambda)t_j\left(v+1\right)\right]^{-1};$$

$$P\left(\lambda+1\right) = P(\lambda)g\left(v+1\right)P(\lambda)t_j\left(v+1\right)\times$$
$$\times\left[\alpha + g\left(v+1\right)t_j^T\left(v+1\right)P(\lambda)t_j\left(v+1\right)\right]^{-1}\times$$
$$\times t_j^T\left(v+1\right)P(\lambda),$$

где $a_i,\ i = \overline{1,m}$ – строки матрицы A; $T_j,\ j = \overline{1,p}$ – столбцы матрицы T; $P(0) = \beta I,\ \beta >> 0$; $\lambda = 1, 2, ...$; $v = \lambda$ при $0 \le \lambda \le m$; $v = \lambda - m$ при $0 < \lambda \le 2m$; $v = \lambda - 2m$ при $2m < \lambda \le 3m, ...$

ВЫВОД

Истинный спектр образцов искажается аппаратной функцией спектрального прибора, являющейся сверткой аппаратной функции фотометрической части прибора и аппаратной функции приемно-регистрирующей системы. Поэтому предложены алгоритмы восстановления аппаратной функции прибора, основанные на регулярных методах решения некорректных задач. Выполненный анализ позволяет выявить потенциальные возможности рассматриваемых алгоритмов и оптимизировать их регуляризующие возможности за счет более полного и гибкого использования располагаемой априорной информации относительно помехо-сигнальной обстановки при измерении цветовых характеристик материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулямов, Ш. М. Улучшение метрологических характеристик фотометров для контроля качества жидких продуктов / Ш. М. Гулямов, М. А. Раджабова, У. Т. Мухамедханов, // Известия ВУЗов. Технические науки. 2000. № 3. С. 9–13.
2. Раджабова, М. А. Система колориметрического контроля качества хлопкового масла / М. А. Раджабова, У. Т. Мухамедханов // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. 16-й Междунар. науч. конф. ММТТ-2003. Р/на Д, 2003. Т. 6. С. 75–78.
3. Radjabova, M. A. Optimization of Design Parameters of Spectral Type Colorimeter Proceedings of Ninth / M. A. Radjabova // World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. WCIS-2016. Tashkent, Oct. 25–27, 2016. P. 168–173.
4. Соловьев, В. А. Оптимальная выборка спектрофотометрической информации при заданной колориметрической погрешности / В. А. Соловьев // Измерительная техника. 1986. № 9. С. 31–32.
5. Раджабова, М. А. Повышение точности колориметров спектрального типа для решения задачи контроля качества жидких продуктов / М. А. Раджабова // Химическая технология. Контроль и управление. 2016. № 3. С. 69–73.

6. Применение методов искусственного интеллекта к синтезу систем управления качеством промышленной продукции и взаимодействие средств интеллектуальной поддержки принятия решений / Б. Т. Каипбергенов [и др.] // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан. 2016. № 2. С. 38–42.
7. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. М.: Наука, 1979. 185 с.
8. Верлань, А. Ф. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. Киев: Наукова думка, 1986. 544 с.
9. Регуляризация некорректно поставленных задач спектроколориметрии / Н. Р. Юсупбеков [и др.] // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. 13-й Междунар. науч. конф. ММТТ-2000. СПб., 2000. Т. 6. С. 225–228.
10. Radjabova, M. A. Aplication of Ill-Posed Problem Regularization Methods to Improve the Accuracy of Spectrocolorimeter Proceedings of Eighth / M. A. Radjabova // World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. Tashkent, Nov. 25–27, 2014. P. 216–224.

Поступила 28.02.2021
Подписана в печать 03.05.2021
Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Gulyamov Sh. M., Radjabova M. A., Mukhamedkhanov U. T. (2000) Improvement of Metrological Characteristics of Photometers for Quality Control of Liquid Products. / *Izvestiya VUZov. Tekhnicheskie Nauki* [Proceedings of Higher Education Institutions. Technical Science], (3), 9–13 (in Russian).
2. Radjabova M. A., Mukhamedkhanov U. T. (2003) Colorimetric Cottonseed Oil Quality Control System. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh: Sb. Tr. 16 Mezhdunar. Nauch. Konf. MMTT-2003* [Mathematical Methods in Engineering and Technology: Proceedings of the 16th International Scientific Confe-Rence MMTT-2003]. Rostov on Don, 6, 75–78 (in Russian).
3. Radjabova M. A. (2016) Optimization of Design Parameters of Spectral Type Colorimeter Proceedings of Ninth. *World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. WCIS-2016. Tashkent, Oct. 25–27, 2016*, 168–173.
4. Solovyov V. A. (1986) Optimal Sampling of Spectrophotometric Information for a Given Colorimetric Error. *Izmeritelnaya Tekhnika = Measurement Techniques*, (9), 31–32 (in Russian).
5. Radjabova M. A. (2016) Improving Accuracy of Spectral Colori-Meters for Solving Problem of Quality Control of Liquid Products. *Khimicheskaya Tekhnologiya. Kontrol' i Upravlenie* [Chemical Technology. Control and Management], (3), 69–73 (in Russian).
6. Kaipbergenov B. T. [et al.] (2016) Application of Artificial Intelligence Methods to the Synthesis of Quality Management Systems for Industrial Products and Interaction of Intelligent Decision Support Tools. *Vestnik Karakalpakskogo Otdeleniya Akademii Nauk Respubliki Uzbekistan* [Bulletin of Karakalpak Branch of Academy of Sciences of Republic of Uzbekistan], (2), 38–42 (in Russian).
7. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. (1979) *Methods for Solving Ill-Posed Problems*. Moscow, Nauka Publ. 185 (in Russian).
8. Verlan A. F., Sizikov V. S. (1986) *Integral Equations: Methods, Algorithms, Programs*. Kiev, Navukova Dumka Publ. 544 (in Russian).
9. Yusupbekov N. R. [et al.] (2000) Regularization of Ill-Posed Problems in Spectrocolorimetry. *Matematicheskie Metody v Tekhnike i Tekhnologiyakh: Sb. Tr. 13 Mezhdunar. Nauch. Konf. MMTT-2000* [Mathematical Methods in Engineering and Technology: Proceedings of the 13th International Scientific Conference MMTT-2000]. Saint-Petersburg, 6, 225–228 (in Russian).
10. Radjabova M. A. (2014) Aplication of Ill-Posed Problem Regularization Methods to Improve the Accuracy of Spectrocolorimeter Proceedings of Eighth. *World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation. Tashkent, Nov. 25–27, 2014*., 216–224.

Received: 28.02.2021
Accepted: 03.05.2021
Published online: 30.11.2021