

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.3.06

УДК 65.011.56

В.Р. Петуховская, П.Ю. Сокольчик, С.И. Сташков

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

КОСВЕННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЯ ГРАНУЛ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В производстве лекарственных препаратов, строительных материалов, полимерных материалов и др. могут встречаться технологические операции, в которых продукция в виде гранул покрывается оболочкой, наносимой в виде жидкого или коллоидного состава.

При реализации такой операции показателями качества оболочки являются равномерность, достаточность покрытия, качество поверхности оболочки и т.п. Такие показатели можно определить либо органолептически – оператором, ведущим процесс, либо с помощью специализированного лабораторного оборудования с остановом процесса на промежуточный контроль. В первом случае вносится субъективный фактор, связанный с особенностями конкретного человека. В случае лабораторного контроля продолжительность технологического процесса увеличивается на время, связанное с отбором пробы гранул и их лабораторным анализом.

Статья посвящена инструментальному измерению степени покрытия гранул в режиме реального времени при проведении технологического процесса на основе информации, полученной при обработке звука, издаваемого смесителем.

Такой подход позволяет, не изменяя конструкцию смесителя, получать требуемую информацию, характеризующую степень покрытия. Данный метод получения информации об однородности смеси будет более оперативным, чем использование лабораторных данных, и после параметризации на конкретной установке может быть предложен для применения на других аналогичных объектах.

В статье рассмотрен лабораторный эксперимент, используемый для апробации метода, и описана математическая обработка результатов акустических данных на основе быстрого преобразования Фурье, а также предложен алгоритм управления на основе рассмотренного метода, который можно использовать в АСУТП в режиме советчика.

Ключевые слова: гранулы, покрытие, неразрушающий контроль, звук, акустическая информация, преобразование Фурье.

V.R. Petuhovskaya, P.Yu. Sokol'chik, S.I. Stashkov

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

INDIRECT ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE COATING OF GRANULES BASED ON ACOUSTIC INFORMATION

In the production of medicines, building materials, polymer materials, etc. there may be technological operations in which products in the form of granules are covered with a coating applied in the form of a liquid or colloidal composition.

When implementing such an operation, the coating quality indicators are uniformity, coating sufficiency, the coating surface quality, etc. Such indicators can be determined either organoleptically – by the operator leading the process, or with the help of specialized laboratory equipment with stopping the process for intermediate control. In the first case, the subjective factor associated with the characteristics of a particular person is introduced. In the case of laboratory control, the duration of the technological process is increased by the time associated with the sampling of granules and their laboratory analysis.

The article describes the instrumental measurement of the degree of coating of granules in real time during the technological process on the basis of information obtained during the processing of sound produced by the mixer.

This approach allows to obtain the required information that characterizes the degree of coating without changing the design of the mixer. This method of obtaining information about the homogeneity of the mixture will be more rapid than using laboratory data, and after parameterization at a specific installation, it can be proposed for use at other similar facilities.

The article presents a laboratory experiment used for testing the method, describes the mathematical processing of the results of acoustic data based on the fast Fourier transform, and also offers a control algorithm based on the considered method, which can be used in the automated control system in the adviser mode.

Keywords: *granules, coating, non-destructive testing, sound, acoustic information, Fourier transform.*

Среди технологических процессов существует такой класс процессов, в которых готовая продукция представляет собой гранулы, покрытые оболочкой. При этом оболочка в процессе производства таких гранул представляет собой жидкий состав, который наносится на гранулы. Такие процессы можно встретить в металлургии, производстве пластмасс, производстве удобрений и особенно в фармацевтической промышленности при производстве лекарственных препаратов в таблетированной форме. Обычно такой процесс осуществляется в герме-

тичных аппаратах, где при перемешивании гранул порциями добавляется жидкая фаза, которая впоследствии формирует оболочку.

Процесс ведется до тех пор, пока покрытие не будет соответствовать требуемому качеству (равномерность и достаточная толщина покрытия, качество поверхности и пр.). Во время ведения технологического процесса о качестве покрытия судят по времени процесса либо периодически производят отбор проб. Зачастую для достижения показателей качества процесс ведется с запасом по времени либо с избытком жидкой фазы (покрытия).

Наличие оперативной инструментальной оценки качества покрытия может позволить сократить время технологической операции и осуществить экономию материала покрытия. Для такой оценки применяют, обрабатывают информацию, получаемую на основе акустического сигнала от технологического аппарата.

В процессе покрытия гранул после каждой добавки жидкого состава меняется звук, издаваемый перемешиваемыми гранулами. Этот звук воспринимается микрофоном, подвергается математической обработке, и на его основе формируется вывод о достаточности покрытия.

Для проверки возможности вывода о достижении требуемой степени покрытия на основе акустической информации в условиях реального технологического процесса поставлен натурный эксперимент, эквивалентный реальному процессу покрытия гранул. В качестве аппарата использована мешалка с электродвигателем, в которую предварительно засыпаются гранулы, а затем при работающей мешалке порциями (добавками) вводится жидкий или коллоидный состав.

В процессе покрытия гранул производилась фиксация звука, издаваемого лабораторной установкой. Запись велась стандартными средствами операционной системы персонального компьютера через микрофонный вход. Процесс покрытия продолжался до тех пор, пока по мнению экспертов не будет достигнута необходимая степень покрытия гранул. Общая схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

Во время проведения серии экспериментов аудиофайлы записывались с частотой 44100 Гц 32 бит. Записанный сигнал является основой для получения измерительной информации.

Обработка звукового сигнала осуществляется с помощью программного продукта MATLAB [1, 15]. Записанный сигнал является основой для получения измерительной информации.

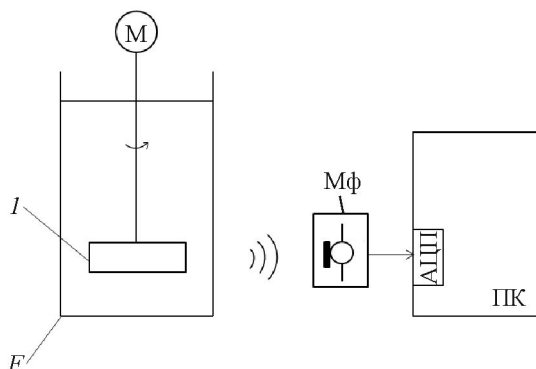


Рис. 1. Общая схема лабораторной установки: I – мешалка, F – емкость, M – мотор, $M\phi$ – микрофон, ПК – персональный компьютер

Для обработки использован метод оконного преобразования Фурье: разбиения временного интервала на ряд временных промежутков методом Уэлша, для каждого из которых вычисляется фурье-преобразование. Записанный сигнал прочитывается и пропускается через временное окно [3, 8, 9, 14] для ограничения частотного спектра задания сигналов [1, 2] в виде окна Хэмминга, заданного формулой

$$w(k) = \begin{cases} 0,54 - 0,46 \cos \frac{2\pi}{N} k, & |k| \leq \frac{N}{2}, \\ 0, & \text{при других } k. \end{cases}$$

Свойства используемого спектрального окна Хэмминга [3] следующие:

- ширина на уровне 0,7 составляет 1,33 бина;
- уровень максимального бокового лепестка – 42 дБ;
- скорость спада боковых лепестков – 6 дБ/октава.

Диаграммы уровня спектральной мощности акустического сигнала [10–12, 17] до обработки и после обработки представлены на рис. 2 и 3.

Для анализа зависимости звукового сигнала на конкретных частотах от количества добавленного жидкого состава выполнено наложение графиков [15], показанное на рис. 4.

Если рассматривать весь спектр полученного звукового сигнала [4–7], то подавляющее количество частот не информативны, т.е. уровень акустического сигнала на этой частоте не коррелирует со степенью гомогенизации смеси, а звуковой ряд содержит широкий спектр шумов [16]. Поэтому необходимо определить такие частоты акустичес-

кого сигнала, которые коррелируются со степенью покрытия гранул. Произведен поиск частот, при которых уровень акустического сигнала коррелирует со степенью смешения.

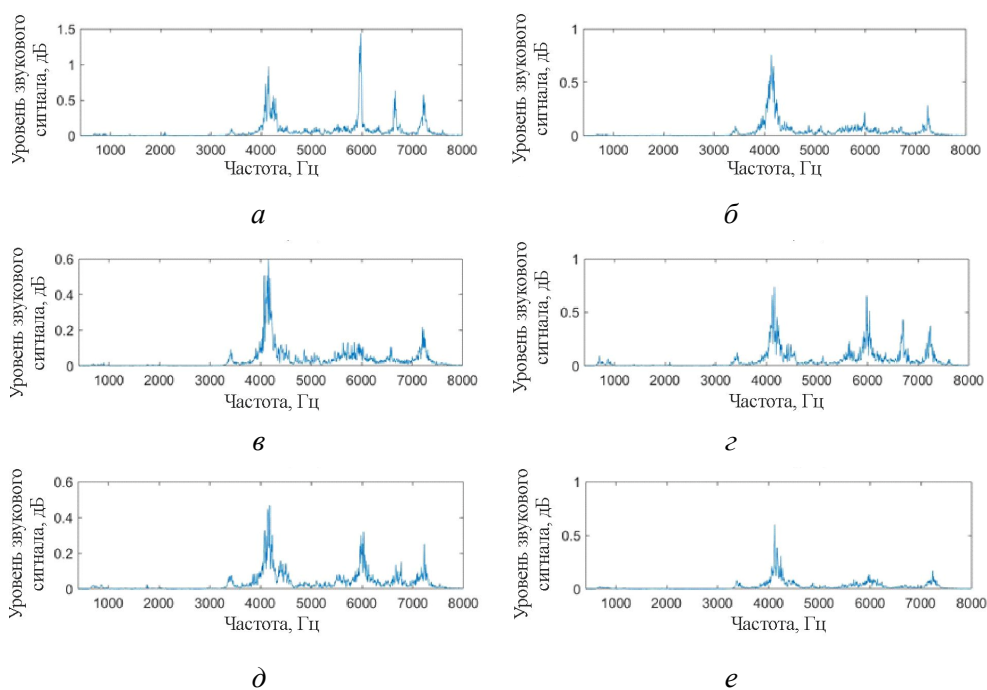


Рис. 2. Частотное распределение звукового сигнала без обработки: *а* – добавка № 1; *б* – добавка № 2; *в* – добавка № 3; *г* – добавка № 4; *д* – добавка № 5; *е* – добавка № 6

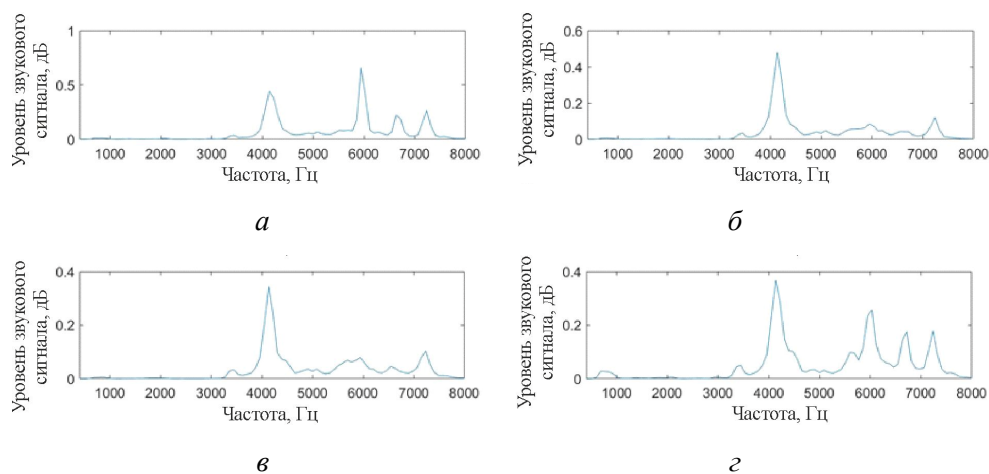


Рис. 3. Частотное распределение звукового сигнала после обработки: *а* – добавка № 1; *б* – добавка № 2; *в* – добавка № 3; *г* – добавка № 4

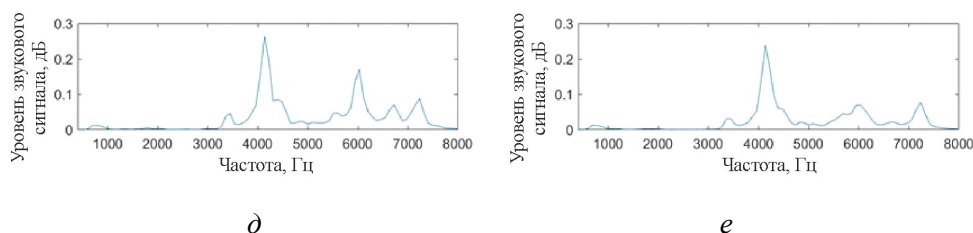


Рис. 3. Частотное распределение звукового сигнала после обработки:
 d – добавка № 5; e – добавка № 6 (окончание)

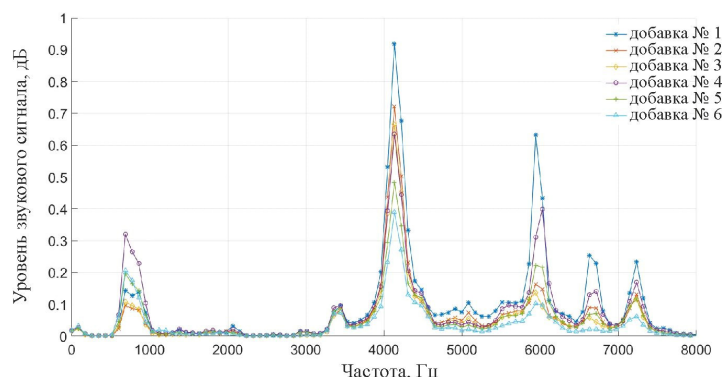


Рис. 4. Наложение уровней акустических сигналов

В ходе проведения эксперимента выявлены основные частоты [13], на которых наблюдается снижение силы частоты в зависимости от добавленного жидкого состава, которые составили 4134 и 5080 Гц.

Графики зависимости уровня звукового сигнала на частоте 4134 и 5082 Гц от стадии смешения представлены на рис. 5, 6 соответственно.

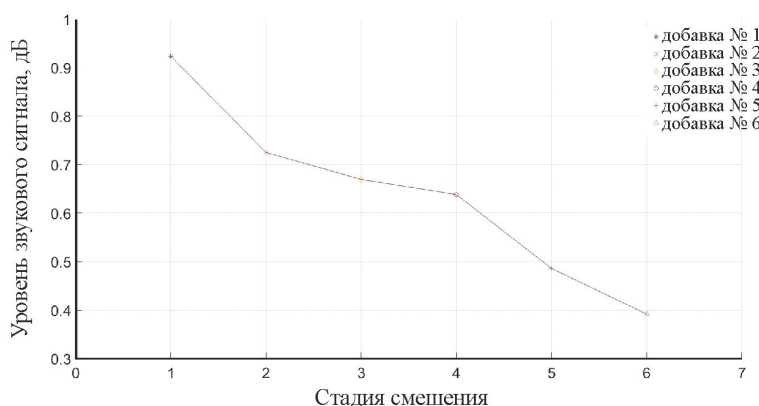


Рис. 5. Зависимость уровня звукового сигнала на частоте 4134 Гц от стадии смешения

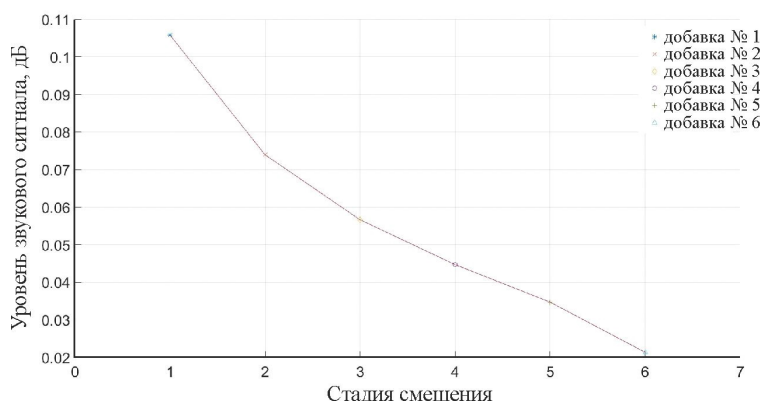


Рис. 6. Зависимость уровня звукового сигнала на частоте 5082 Гц от стадии смешения

Для формирования решения о достаточности покрытия гранул использован метод экспертных оценок с 3 экспертами, которые визуально определяли, достаточна ли степень покрытия (табл. 1).

Таблица 1

Результаты решения экспертов

Эксперт	Номер добавки					
	1	2	3	4	5	6
1	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
2	Нет	Нет	Нет	Да	Да	Да
3	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да

Результат опроса экспертов показал, что с добавки № 1 по добавку № 3 визуальных изменений в гомогенизации не наблюдалось. Начиная с добавки № 4 прослеживается покрытие твердой фазы жидкой субстанцией. Такой вывод сделан в связи с 33,3 % положительных ответов экспертов. Достаточное покрытие прослеживается при добавке № 5. При этом 66,7 % экспертов проголосовало положительно. Полное покрытие твердой фазы происходит при добавке № 6. В этом случае мнение экспертов единогласное и составляет 100 %, что позволяет сделать вывод о полном завершении процесса покрытия гранул.

Уравнение регрессии для частоты 4134 Гц характеризуется экспоненциальной зависимостью и имеет вид

$$y = 1,0649e^{-0,158x}.$$

График зависимости изменения акустического сигнала при добавлении жидкой фазы в основу представлен на рис. 7.

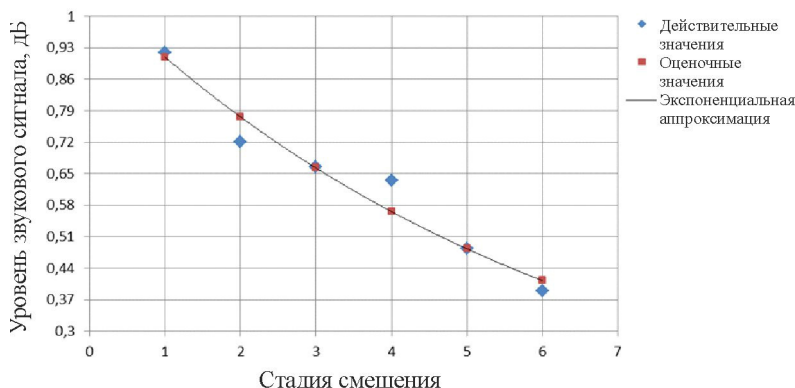


Рис. 7. Экспоненциальная зависимость уровня акустического сигнала на частоте 4134 Гц от стадии смешения

Вычисляется остаточная дисперсия:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{n - m - 1}$$

и общая дисперсия:

$$S_{\text{общ}}^2 = \frac{\sum (y - \bar{y}_x)^2}{n - 1}.$$

Для оценки соответствия уравнения регрессии экспериментальным данным использован критерий Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{общ}}^2 \{y\}}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{0,034638}{0,002102} = 16,47522.$$

Полученное значение критерия Фишера превышает табличное ($F_{\text{табл}} = 4,2839$), следовательно, полученное уравнение регрессии адекватно. Для частоты 5082 Гц также получено уравнение регрессии зависимости степени достаточности покрытия от уровня звукового сигнала:

$$y = 0,1404e^{-0,3x},$$

график которого представлен на рис. 8.

Адекватность полученной зависимости проверена также по критерию Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{общ}}^2 \{y\}}{S_{\text{ост}}^2} = \frac{0,000924}{8,29242 \cdot 10^{-6}} = 16,47522.$$

Полученное значение критерия Фишера превышает табличное ($F_{\text{табл}} = 4,2839$), следовательно, полученное уравнение регрессии адекватно.

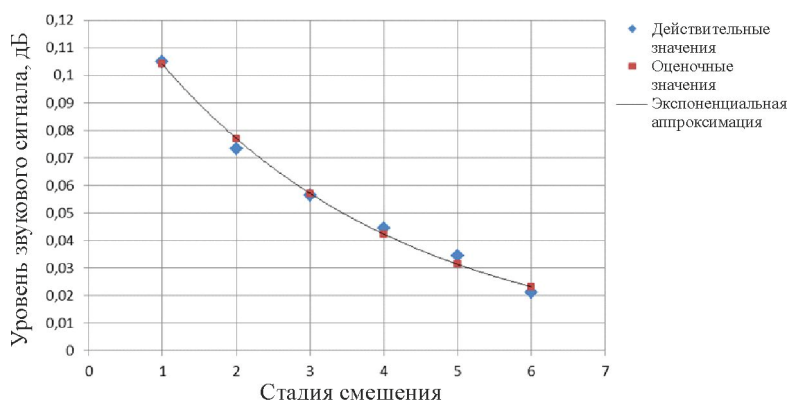


Рис. 8. Экспоненциальная зависимость уровня акустического сигнала на частоте 5082 Гц от стадии смещения

Выполненная серия экспериментов подтверждает связь между изменением акустического сигнала, характеризующего работу технологического оборудования процесса смещения, и степенью покрытия гранул. Представленные экспоненциальные зависимости акустических сигналов, полученные на выявленных характерных частотах, позволяют судить о степени покрытия гранул. Описываемый метод может быть реализован без внесения изменений в смеситель и применен для широкого перечня технологических процессов.

Библиографический список

1. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7.0/ Simulink 5/6 Обработка сигналов и проектирование фильтров. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.
2. Рабинер Л., Гоул Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 424 с.
3. Дворкович В. П., Дворкович А. В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. – М.: Техносфера, 2014. – 112 с.
4. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 265 с.
5. Трахтман А.М. Введение в обобщенную спектральную теорию сигналов. – М.: Сов. радио, 1972. – 353 с.

6. Беспалов М.С. Дискретные функции Уолша и их приложения. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. – 68 с.
7. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Бином-Пресс, 2006. – 656 с.
8. Харрис Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. – 1978. – Т. 6, № 1. – С. 60–96.
9. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. – М.: СОЛОН-Пресс, 2009. – 248 с.
10. Ивановский В.А. Использование среды MATLAB для диагностики состояния полимерных систем по их электрическим флуктуациям // Цифровая обработка сигналов: материалы 2-й Всерос. науч. конф. / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2004. – С. 1718–1733.
11. Козырева А.В., Милукова В.К. Интерпретация наблюдений на баксанском интерферометре с помощью системы MATLAB // Цифровая обработка сигналов: материалы 2-й Всерос. науч. конф. / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2004. – С. 1734–1743.
12. Леонович А.А. Модуль распознавания речи в системе MATLAB // Цифровая обработка сигналов: материалы 2-й Всерос. науч. конф. / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2004. – С. 1752–1759.
13. Романюк Ю.А. Основы цифровой обработки сигналов. – 2-е изд. – М.: Изд-во МФТИ, 2007. – 332 с.
14. Дворкович В.П. Новый метод расчета эффективных оконных функций, используемых при гармоническом анализе с помощью ДПФ // Цифровая обработка сигналов. – 2001. – № 2-3. – С. 55–59.
15. Потемкин В. Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x: в 2 т. – Т. 1. – М.: Диалог-МИФИ, 1999. – 366 с.
16. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Техносфера, 2006. – 858 с.
17. Бернард Скляр. Цифровая связь: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 1106 с.

References

1. D'iakonov V.P. MATLAB 6.5 SP1/7.0/ Simulink 5/6 Obrabotka signalov i proektirovanie fil'trov Seriia «Biblioteka professionala» [MATLAB 6.5 SP1/7.0/ Simulink 5/6 Signal processing and filter design professional «Library series»]. Moscow, SOLON-Press, 2005, 800 p.
2. Rabiner L., Goul B. Teoriia i primeneniie tsifrovoi obrabotki signalov [Theory and application of digital signal processing]. Moscow, Mir, 1978, 424 p.
3. Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. Okonnye funktsii dlia garmonicheskogo analiza signalov [Window functions for harmonic signal analysis]. Moscow, Tekhnosfera, 2014, 112 p.

4. Marpl-m. S.L. Tsifrovoi spektral'nyi analiz i ego prilozheniia [Digital spectral analysis and applications]. Moscow, Mir, 1990, 265 p.
5. Trakhtman A.M. Vvedenie v obobshchennuiu spektral'nuiu teoriyu signalov [Introduction to generalized spectral theory of signals]. Moscow, Sov. radio, 353 p.
6. Bespalov M.S. Diskretnye funktsii Uolsha i ikh prilozheniia [Discrete Walsh functions and their applications]. Vladimir, VIGU, 2014, 68 p.
7. Laions R. Tsifrovaia obrabotka signalov [Digital signal processing]. 2nd ed., Moscow, Binom-Press, 2006, 656 p.
8. Kharris F. Dzh. Ispol'zovanie okon pri garmonicheskom analize metodom diskretnogo preobrazovaniia Fur'e [Using windows in harmonic analysis by discrete Fourier transform]. TIIEER, 1978, vol.6, no. 1, pp. 60-96.
9. Afonskii A.A., D'iakonov V.P. Tsifrovye analizatory spektra, signalov i logiki [Digital spectrum, signal and logic analyzers]. Moscow, SOLON-Press, 2009, 248 p.
10. Ivanovskii V.A. Ispol'zovanie sredy MATLAB dlia diagnostiki sostoiianiia polimernykh sistem po ikh elektricheskim fluktuatsiiam [Use the MATLAB environment to diagnose the state of polymer systems by their electrical fortifications]. *Digital signal processing. Materialy 2 vserossiiskoi konferentsii*. Moscow, Institut problem upravleniia im. V.A. Trapeznikova RAN, 2017, pp. 1718-1733.
11. Kozyreva A.V., Miliukova V.K. Interpretatsiia nabliudenii na baksanskom interferometre s pomoshch'iu sistemy MATLAB [Interpretation of observations on the baksan interferometer using the MATLAB system]. *Digital signal processing. Materialy 2 vserossiiskoi konferentsii*. Moscow, Institut problem upravleniia im. V.A. Trapeznikova RAN, 2017, pp. 1734-1743.
12. Leonovich A.A. Modul' raspoznavaniia rechi v sisteme MATLAB [MATLAB speech recognition module]. *Digital signal processing. Materialy 2 vserossiiskoi konferentsii*. Moscow, Institut problem upravleniia im. V.A. Trapeznikova RAN, 2017, pp. 1752-1759.
13. Romaniuk Iu.A. Osnovy tsifrovoi obrabotki signalov [Basics of digital signal processing]. 2nd ed., Moscow, MFTI, 2007, 332 p.
14. Dvorkovich V.P. Novyi metod rascheta effektivnykh okonnykh funktsii, ispol'zuemykh pri garmonicheskom analize s pomoshch'iu DPF [New method for calculating efficient window functions used in DFT harmonic analysis]. *Digital signal processing*, 2001, no. 2, no. 3, pp. 55-59.
15. Potemkin V.G. Sistema inzhenernykh i nauchnykh raschetov MATLAB 5.x [MATLAB 5x engineering and scientific calculation system. Vol. 1]. Moscow, Dialog-MIFI, 1999, 366 p.
16. Oppengeim A., Shafer R. Tsifrovaia obrabotka signalov [Digital signal processing]. 2nd ed., Moscow, 2006, 858 p.
17. Bernard Skliar. Tsifrovaia sviaz' [Digital communication]. Moscow, Dom Vil'yams, 2003, 1106 p.

Получено 26.05.2021

Об авторах

Петуховская Виктория Романовна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Оборудование и автоматизация химических производств» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: wikapet1997@rambler.ru).

Сокольник Павел Юрьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование и автоматизация химических производств» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: psokol@pstu.ru).

Сташков Сергей Игоревич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и автоматизация химических производств» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: atp@pstu.ru).

About the authors

Viktoriya R. Petukhovskaya (Perm, Russian Federation) – Undergraduate Student, Department of Equipment and Automation of the Chemical Plant, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: wikapet1997@rambler.ru).

Pavel Yu. Sokolchik (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Equipment and Automation of the Chemical Plant, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: psokol@pstu.ru).

Sergey I. Stashkov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Equipment and Automation of the Chemical Plant, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: atp@pstu.ru).