

ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409
DOI: 10.17277/issn.0136-5835

**ВЕСТНИК
Тамбовского
государственного
технического
университета**

***TRANSACTIONS
of the Tambov
State
Technical
University***

2022. Том 28. № 2.

**Четырехязычный
научно-теоретический
и прикладной журнал
широкого профиля**

***Four-Language
Scientific-Theoretical and
Applied Multidisciplinary
Journal***

*Основан в 1995 году
Выходит 4 раза в год*

<http://vestnik.tstu.ru>

**Россия Тамбов
Издательство ТГТУ**

Совет редакторов

Альмов Михаил Иванович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН

Абоносимов Олег Аркадьевич, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Абрамов Геннадий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Бузник Вячеслав Михайлович, д-р хим. наук, профессор, акад. РАН, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

Гатапова Наталья Цибиковна, д-р техн. наук, профессор, **главный редактор**, ФГБОУ ВО «ТГТУ», +7 4752 63 72 39; эл. почта: gatarova.nc@mail.tstu.ru

Дворецкий Станислав Иванович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Дивин Александр Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Дмитриевский Борис Сергеевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Ивлиев Андрей Дмитриевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург

Илясов Леонид Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Квятковская Ирина Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»

Князева Лариса Геннадьевна, д-р хим. наук, доцент, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Тамбов

Краснянский Михаил Николаевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Куликов Геннадий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Лазарев Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Литовка Юрий Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Матвейкин Валерий Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Мищенко Сергей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Муджумдар Арун С., PhD, профессор, Университет Мак-Гилл, Монреаль, Канада

Муромцев Дмитрий Юрьевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Перре Патрик, PhD, профессор, Национальная школа инженерии сельского хозяйства, вод и лесов, Нанси, Франция

Пономарев Сергей Васильевич, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Сафаров Джавид, Dr.-Ing, Ростокский университет, Германия

Столин Александр Моисеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мерджанова РАН

Тихомиров Сергей Германович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Тсотсас Евангелос, PhD, профессор, Университет Отто-фон-Герике, Магдебург, Германия

Цыганкова Людмила Евгеньевна, д-р хим. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина»

**Адрес редакции: 392000, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2.
Редакция журнала «Вестник Тамбовского государственного технического университета».
Эл. почта: gatarova.nc@mail.tstu.ru**

Редакторы иностранных текстов: Н. А. Гунина, В. С. Григорьева, Н. Ю. Бородулина.

Редакторы: И. М. Курносова, О. В. Мочалина.

Компьютерная верстка: С. Ю. Прохорская.

Подписано в печать 17.06.2022 г. Дата выхода в свет 01.07.2022 г.

Формат 70×108/16. Усл. печ. л. 14,88; уч.-изд. л. 17,00. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ 028.

Адрес типографии: 392032, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А. Тел. (4752) 63 07 46

ISSN 0136-5835
e-ISSN 2542-1409

Знак информационной продукции 16+

© ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022
© Коллектив авторов, 2022

EDITORIAL BOARD

Mikhail Alymov, Dr. Tech. Sci., Prof., Corresponding Member RAS, Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS

Oleg Abonosimov, Dr. Tech. Sci., Associate Professor, Tambov State Technical University

Gennady Abramov, Dr. Tech. Sci., Prof., Voronezh State University

Vyacheslav Buznik, Dr. Chem. Sci., Prof., Academician RAS, Baykov Institute of Metallurgy and Material Science RAS

Nataliya Gatapova, Dr. Tech. Sci., Prof., **Editor-in-Chief**, Tambov State Technical University, +7 4752 63 72 39; e-mail: gatapova.nc@mail.tstu.ru

Stanislav Dvoretzky, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Aleksander Divin, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Boris Dmitrievsky, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Andrey Ivliev, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Russian State Professional Pedagogical University, Yekaterinburg

Leonid Pyasov, Dr. Tech. Sci., Prof., Tver State Technical University

Irina Kvyatkovskaya, Dr. Tech. Sci., Prof., Astrakhan State Technical University

Larisa Knyazeva, Dr. Chem. Sci., Associate Professor, All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Oil Products in Agriculture, Tambov

Mikhail Krasnyanskiy, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Gennady Kulikov, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Sergey Lazarev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Yuri Litovka, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Valery Matveykin, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Sergey Mishchenko, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Mujumdar Arun S., PhD, McGill University Montreal, Canada

Dmitry Muromtsev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Perré Patrick, PhD, National School of Rural Engineering, Water and Forests, Nancy, France

Sergey Ponomarev, Dr. Tech. Sci., Prof., Tambov State Technical University

Javid Safarov, Dr.-Ing., University of Rostock, Germany

Aleksander Stolin, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof., Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS

Sergey Tikhomirov, Dr. Tech. Sci., Prof., Voronezh State University of Engineering Technologies

Evangelos Tsotsas, PhD, Otto-von-Guericke University, Magdeburg, Germany

Lyudmila Tsygankova, Dr. Chem. Sci., Prof., Derzhavin Tambov State University

Editorial office address: Bld 2, 106/5, Sovetskaya St., Tambov, Tambov region, 392000, Tambov State Technical University. E-mail: gatapova.nc@mail.tstu.ru

Учредитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

Издатель: ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Адрес издателя: 392000, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, пом. 2.
E-mail: tstu@admin.tstu.ru

Средство массовой информации журнал «Вестник Тамбовского государственного технического университета» зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Регистрационный номер СМИ ПИ № ФС77-80501 от 01 марта 2021 г.

Журнал «Вестник Тамбовского государственного технического университета» входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК и международную реферативную базу Chemical Abstracts

Подписной индекс в каталоге «Роспечать» – 20498

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматика. Информатика.	
Управление. Приборы	186
Абрамов А. М., Гуржин С. Г., Прошин Е. М. Методы определения динамических характеристик интегральных АЦП (<i>на английском языке</i>).....	186
Шилоносков А. В. Интеллектуальная измерительная система на основе нейросетевых технологий и нечеткой логики	193
Лебедь Н. И. Моделирование системы управления автоматизированного электропривода измельчителя плодоовощной продукции в виртуальной симуляционной среде	205
Анненков А. Н., Белоусова О. В. Анализ автоматизированной установки нанесения фоторезиста как объекта управления	214
Волчихина М. В. Метод адаптации параметров средств защиты информации на основе дискретного изменения амплитуды и тембра субъектов переговоров.....	226
Джамбеков А. М., Дмитриевский Б. С., Терехова А. А. Устойчивость автоматической системы регулирования уровня стабильного катализата в стабилизационной колонне установки каталитического риформинга.....	235
Лешелах А., Уссама Б., Шауки И., Калинин В. Ф. Трехуровневый диодно-зажимный инвертор с генератором импульсов и широтно-импульсной модуляцией (<i>на английском языке</i>)	242
Алгазин Е. И. О возможности наблюдения исследуемого параметра линейных систем автоматики в некоторой структуре временных соотношений	251
Процессы и аппараты химических и других производств. Химия	260
Пахомов А. Н., Гатапова Н. Ц., Пахомова Ю. В. Использование алгоритма выделения слоев в расчете кинетики сушки дисперсных продуктов на подложках.....	260
Долгунин В. Н., Власов Д. А., Пронин В. А. Кинетика и гидродинамические условия твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме.....	269
Федорова Д. В., Стенько Д. В., Бахаева Д. Д., Капранова А. Б. Параметрическое моделирование при проектировании смесителя центробежного типа для сыпучего вторичного сырья.....	279
Евсеев А. В. Классификации немиксинговых смесевых компонентов, продуктов и устройств	287
Матюкин В. В., Борщев В. Я. Исследование процесса измельчения кварцевого песка.....	297
Соколов М. В. Влияние степени пластикации на физико-механические показатели резиновой смеси при непрерывном вальцевании.....	305
Машиностроение. Металлообработка	316
Иванова И. В., Родионов Ю. В., Воронин Н. В., Скоморохова А. И., Пахомов А. Н., Ломовских А. Е. Элементы расчета двигателя внутреннего сгорания на примере роторной свободно-лопастной машины	316
Романюк Н. Н., Еднач В. Н., Козлов Р. И., Хартанович А. М., Попов А. И. К вопросу обоснования геометрических параметров распределительной головки высевающего аппарата туковой сеялки	328
Материаловедение. Нанотехнологии	339
Ярцев В. П., Данилов В. М. Влияние климатического старения на эксплуатационные свойства фанеры.....	339
Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук	348

CONTENTS

Automation. Information Technology.	
Control. Instruments	186
Abramov A. M., Gurzhin S. G., Proshin E. M. Methods of Determining Integral ADC Dynamic Characteristics (<i>in English</i>).....	186
Shilonosov A. V. Intelligent Measuring System Based on Neural Network Technologies and Fuzzy Logic	193
Lebed N. I. Modeling the Control System of an Automated Electric Drive for a Fruit and Vegetable Chopper in a Virtual Simulation Environment.....	205
Annenkov A. N., Belousova O. V. Analysis of an Automated Installation for Applying Photoresist as a Control Object	214
Volchikhina M. V. A Method for Adapting the Parameters of Information Security Tools Using a Discrete Change in the Amplitude and Timbre of the Subjects of Negotiations.....	226
Dzhambekov A. M., Dmitrievsky B. S., Terekhova A. A. Stability of an Automatic System for Controlling the Level of Stable Catalyzate in the Stabilization Column of a Catalytic Reformer.....	235
Lechelch A., Oussama B., Chaouki I., Kalinin V. F. A Three-Level Diode-Clamp Inverter with a Pulse Generator and Pulse width Modulation as a Case Study (<i>in English</i>).....	242
Algazin E. I. On the Possibility of Observing the Investigated Parameter of Linear Automation Systems in a Certain Structure of Time Relations.....	251
Chemical Engineering and Related Industries.	
Chemistry	260
Pakhomov A. N., Gatapova N. Ts., Pakhomova Yu. V. Using the Algorithm for Separating Layers in Calculating the Kinetics of Drying Disperse Products on Substrates.....	260
Dolgunin V. N., Vlasov D. A., Pronin V. A. Kinetics and Hydrodynamic Conditions of Solid-Phase Bioconversion of Cellulose-Containing Raw Materials in Static-Dynamic Mode	269
Fedorova D. V., Stenko D. V., Bakhaeva D. D., Kapranova A. B. Parametric Modeling in the Design of a Centrifugal Mixer for Bulk Secondary Raw Materials.....	279
Evseev A. V. Classifications of Nonmixing Components, Products and Devices	287
Matyukin V. V., Borshchev V. Ya. A Study of the Grinding Process of Quartz Sand... ..	297
Sokolov M. V. The Influence of the Plasticization Degree on the Physical and Mechanical Properties of the Rubber Compound during Continuous Rolling	305
Mechanical Engineering. Metal Treatment	316
Ivanova I. V., Rodionov Yu. V., Voronin N. V., Skomorokhova A. I., Pakhomov A. N., Lomovskikh A. E. Elements of Calculating the Internal Combustion Engine Using the Example of a Rotary Free-Blade Machine	316
Romanyuk N. N., Ednach V. N., Kozlov R. I., Khartanovich A. M., Popov A. I. To the Question of Substantiation of Geometric Parameters of a Distribution Head of the Seeding Unit of the Fertilizer Seeder	328
Material Science. Nanotechnology	339
Yartsev V. P., Danilov V. M. The Impact of Climatic Aging on the Performance Properties of Plywood.....	339
New Professors, Doctors and Candidates of Sciences	348

METHODS OF DETERMINING INTEGRAL ADC DYNAMIC CHARACTERISTICS

A. M. Abramov, S. G. Gurzhin, E. M. Proshin

*Department of information-measuring and biomedical engineering,
abramov.a.job@yandex.ru; Ryazan State Radio Engineering
University named after V.F. Utkin, Ryazan, Russia*

Keywords: differential non-linearity; dynamic characteristics; effective number of bits; instantaneous dynamic errors; integral ADC; integral non-linearity.

Abstract: The article offers methods to determine instantaneous dynamic errors of integral analog-to-digital converters and effective number of bits. The first method is to compare registered signal of known form at the output of the ADC tested with the model of this form, formed by computer. Effective number of bits is defined from experimental data by the error that occurs in each point of ADC dynamic range depending on the specified rate of test signal change or on its frequency.

Introduction

Widespread application of various devices for analog-to-digital conversion (ADC) of electrical signals in digital oscillography, radio engineering devices, medical diagnostic equipment, etc. causes the developers of such equipment to learn such actual metrological characteristics of applied integral ADCs, especially dynamic ones as:

- Total Harmonic Distortion (THD);
- Signal to Noise Ratio (SNR);
- Signal to Noise and Distortion (SINAD);
- Effective Number of Bits (ENOB);
- Spurious Free Dynamic Range (SFDR).

The relevance of evaluating dynamic ADC characteristics is also caused by the fact that the market of integral ADC is full of various devices that have common characteristics but different producers.

A Wide variety of ADC devices manufactured mainly abroad by different countries and companies is used in Russia [1]. Manufacturers make use of their own methods and standards when determining ADC metrological characteristics [2, 3] that should be brought into line with our Russian standards for these devices to enter the register of measuring instruments of the Russian Federation with the aim of their further usage. The problem is complicated by the fact that the dynamic characteristics mentioned above are not given in the State Standards of Russian Federation [4] and the existing methods to determine dynamic errors [5] provide only averaged statistical

estimates which are known to level out some significant outliers of instantaneous errors causing low confidence of customers for such estimates. Therefore, all abovementioned facts lead to the task of determining ADC instantaneous dynamic errors in the entire range of tests in terms of speed and frequency characteristics.

Method of determining ADC instantaneous dynamic errors

The main idea of this method is to compare registered signal of known form $x[j]$ at the output of the ADC tested with the model of this form $M[j]$, formed by computer.

A calibrated signal generator (CSG) is used as a test signal source. To do this we can use verification – purpose generator of harmonic oscillations with minimum non-linear distortions. The signal from the generator is fed to the ADC tested. ADC codes are transmitted to buffer storage device in the form of the array with sufficient size. The whole array has to fit within at least one period of test harmonic signal.

As signal $x[j]$ has harmonic form, then this model needs to have four parameters: amplitude A , offset S , period T and initial phase φ . These parameters may be read from CSG and entered to computer (without phase) but the error of setting test signal informative parameters into CSG and ADC statistical errors (such as offset, conversion factor, etc.) will lead to significant distortions of measurement results.

Therefore, another method of determining these parameters based on their measurement directly from a registered signal has been adopted. To do this we need to determine time number t_i of extrema $x(t_i)$ for the signal registered and the number of extrema being the basis to determine:

$$\text{Amplitude: } A = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} [x(t_i) - x(t_{i+1})];$$

$$\text{Offset: } S = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} [x(t_i) + x(t_{i+1})];$$

$$\text{Period: } T = \frac{2}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (t_{i+1} - t_i);$$

$$\text{Phase: } \varphi = \frac{T}{360} \arcsin \left[2 \frac{x(0) - S}{x(t_1) - x(t_2)} \right].$$

The values received are used as the first approximation to form computer model of a test signal

$$M[j] = A \sin \left[\frac{2\pi}{T} j + \varphi \right] + S.$$

Further approximation is implemented by the least squares method (LSM) by iterative procedures with independent increments of A , S , T parameters for φ model by searching minimum value

$$\sum_{i=1}^n (x[j] - M[j])^2 \rightarrow \min .$$

The received model $M[j]$ is accepted as a quasi-original model of a test signal to evaluate dynamic error.

The algebraic difference $\Delta[j] = x[j] - M[j]$ characterizes instantaneous error values of test signal form registration. If test signal non-linearity is really small then the difference $\Delta[j]$ has the following error components:

- ADC differential non-linearity (DNL);

- ADC integral non-linearity (INL);
- ADC intrinsic noise;
- ADC dynamic errors.

The first three components characterize ADC static accuracy and can be found on the stage of static characteristics tests using abovementioned methods [6, 7].

If static characteristics are found and ADC static conversion function is formed then algebraic difference can be recalculated taking into consideration ADC static errors; the dynamic component only that characterizes instantaneous values of dynamic errors can also be singled out

$$\Delta_d[j] = \Delta[j] - \Delta_s[j].$$

Method of determining ADC ENOB

Effective Number of Bits is considered to be the most important ADC characteristics. It allows showing the total influence of various error sources such as quantization, DNL and INL, non-linear distortions in pre-conversion circuits, sampling dating errors, random instrumental errors, bits losses during dynamic influence. Effective Number of Bits is usually represented as frequency dependent function. In general (but not always) it decreases with frequency increase.

Effective Number of Bits is advisable to be found from experimental data by the error that occurs in each point of ADC dynamic range depending on the specified rate of test signal change or on its frequency. In this case ADC must be put into a mode when dynamic conversion errors are predominant when compared to static ones. Consequently, we need to use a test signal with high slew rate which is typical for ADC when single fast processes are registered. With this approach full dynamic characteristics of input analogue part are not determined allowing to reduce the requirements for test signal since the error in setting its amplitude may not be normalized and the requirements for slew rate accuracy can be significantly reduced. Simultaneously we get the possibility to determine the components of sampling dating errors.

In order to determine experimentally ADC errors in dynamic change mode we need to know exactly instantaneous values of test signal. This can be achieved by means of high-speed reference comparators in combination with slow reference digital-analog converter (DAC). When using a single comparator we need to consider its delay. This disadvantage can be eliminated with the help of two gated comparators.

The structure of hardware-software system to determine ENOB of ADC under test is presented in Fig. 1.

The system offered allows implementing both methods with the help of standard hardware based on personal computer (PC), NI PCIe-6321 embedded data acquisition board, NI BNC-2120 connector block and virtual instruments in LabVIEW graphical programming environment. At the same time test methods are automated to the maximum to achieve high accuracy of setting informative parameters of test signals, algorithmic transformations, computational operations and evaluation of dynamic characteristics.

The method offered assumes the presence of two signal sources, two reference DAC being used for this. The signals from DAC outputs, viz. a slowly changing signal in wide dynamic range (reference voltage: U_{ref}) and a fast changing signal with constant amplitude (test signal: U_{test}), are summed by the adder Σ . The sum of these signals enters comparators K1 and K2, the other outputs of which receive threshold voltage levels U_{t1} , U_{t2} . At the moment when output voltage is between comparison thresholds the signal from ADC output is fixed.

Timing diagrams of test and reference signal fragments are given in Fig. 2.

Two-comparator measuring method is suitable when both external synchronization output and internal sample rate output are present.

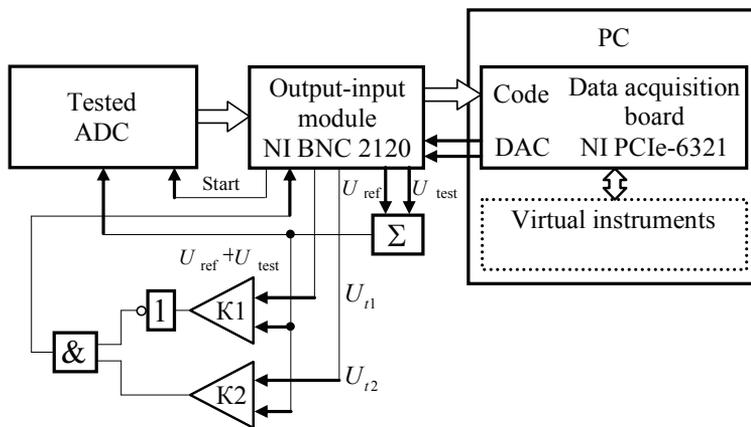


Fig. 1. The system for determining ENOB based on two comparators

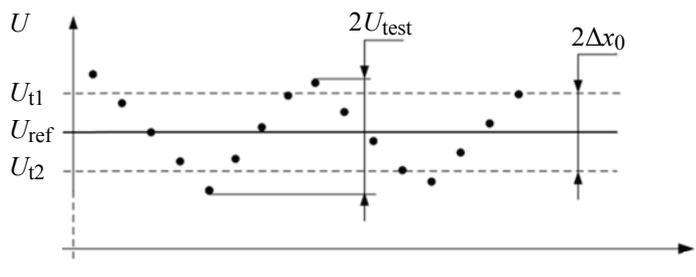


Fig. 2. Timing diagrams of the method to determine ENOB based on two comparators

Comparator thresholds are shifted relative to reference voltage by $\pm\Delta x_0$. Strobe-pulses for comparator state as well as trigger pulses of ADC converter (if external trigger is present) are applied periodically. The signal to permit registration of conversion results is formed only in the condition when the test signal superimposed on reference voltage is set in the interval of comparator thresholds.

If the analog-to-digital conversion has output of internal sampling rate the permission to register conversion results is formed by gating the comparators with internal trigger signals when converted signal is found between comparison thresholds. In two comparator method as well as test signal linear change within comparison results the average value coincides with reference signal $x_0 = U_{\text{ref}}$, the variance of which equals $\Delta x_0^2/3$ and is taken into consideration when processing measurement results.

The technique to measure ADC error in the mode of dynamic changes is as follows:

- 1) By means of reference DAC we set reference value $x_0 = Nq$, where N is code theoretical value that corresponds to input signal; q is quantization step;
- 2) Comparison thresholds spaced at $2x_0 = 2\Delta Nq$, where ΔN is code value that corresponds to threshold spaces relative to reference level are set;
- 3) The sum of reference voltage and test signal ($U_{\text{ref}} + U_{\text{test}}$) is formed;
- 4) The sum of reference voltage and test signal is supplied to the input of tested ADC and to the first inputs of comparator the second inputs of which are given comparison threshold voltages (U_{t1}, U_{t2});
- 5) Conversion result permitted by comparator states is registered when the signal converted is located in specified limits $x_0 \pm \Delta x_0$;

6) The errors of individual conversion results $\Delta_i = (N_i - N)q$ are calculated;

7) Conversion results variance $D(\Delta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_i - N)^2 q^2$, where n is the number of registered results is calculated;

8) Mean square value of error in the mode of dynamic changes is calculated $\sigma_{\Delta} = \sqrt{D(\Delta) - \Delta x_0^2 / 3}$;

9) ENOB = $N - \log_2 \frac{\sigma_{\Delta}}{\sigma_q}$, where σ_q is quantization error of ideal quantizer is calculated;

10) Test signal slew rate is changed, and the measurement process is repeated according to points 5) – 9);

11) New value of reference signal is set, the measurement process is repeated.

If converter input is given a signal with slew rate V_1 , and converter one is given a signal with the rate V_2 , then the error value measured has two components that have appeared due to the delays in converter and comparator:

$$\Delta_{1i} = \Delta_{n1i} - \Delta_{k1i},$$

where Δ_{1i} is error value in the first experiment (with the first combination of test signal slew rates); Δ_{n1i} is converter dynamic error value in the first experiment; Δ_{k1i} is comparator dynamic value in the first test.

Having performed four tests with different signal rates on the inputs of converter and comparator, having averaged the values received we get the system of equations to determine systematic errors of converter Δ_{ns} and comparator Δ_{ks} :

$$\begin{aligned}\bar{\Delta}_1 &= \bar{\Delta}_{n1} + \bar{\Delta}_{k1}; \\ \bar{\Delta}_2 &= \bar{\Delta}_{n2} + \bar{\Delta}_{k1}; \\ \bar{\Delta}_3 &= \bar{\Delta}_{n1} + \bar{\Delta}_{k2}; \\ \bar{\Delta}_4 &= \bar{\Delta}_{n2} + \bar{\Delta}_{k2}.\end{aligned}$$

The solution of the system of equations allows us to get the estimates of systematic error for the converter under consideration at two rates of input signal change V_1, V_2 .

Having repeated the tests for other combinations of signal change rate we can build the dependency of dynamic error systematic component from the slew rate of input influence.

Conclusion

Methods of measuring ADC dynamic errors are offered and developed. Further research in this direction should provide the implementation of the methods elaborated into the verification practice of metrological organizations.

The study is carried out within the framework of state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FSSN-2020-0003).

References

1. Shtrapein G.L. [High-speed analog-to-digital converters from National Semiconductor], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2005, no. 6 (50), pp. 70-74. (In Russ.)

2. IEEE 1241-2010 - IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters, New York: IEEE Instrumentation & Measurement Society, 2011, 139 p.

3. IEEE 1057-2017 - IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders, New York: IEEE Instrumentation & Measurement Society, 2018, 189 p.

4. *GOST 8.009-84. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya yedinstva izmereniy. Normiruyemye metrologicheskiye kharakteristiki sredstv izmereniy* [GOST 8.009-84. State system for ensuring the uniformity of measurements. Normalized metrological characteristics of measuring instruments], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1985, 26 p. (In Russ.)

5. Granovskiy V.A. *Dinamicheskiye izmereniya: Osnovy metrologicheskogo obespecheniya* [Dynamic measurements: Fundamentals of metrological support], Leningrad: Energoatomizdat, 1984, 224 p. (In Russ.)

6. Abramov A.M., Gurzhin S.G., Zhulev V.I., Proshin E.M., Shulyakov A.V. Verification Method Implementation Based on Standard Virtual Measurement Instruments, 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 10 – 14 June, 2019, Budva, Montenegro, IEEE, 2019, pp. 549-552, doi: 10.1109/MECO.2019.8760199

7. Abramov A.M., Gurzhin S.G., Zhulev V.I., Proshin E.M., Shulyakov A.V. Analysis of Metrological Test Method Accuracy, 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 8 - 11 June, 2020, Budva, Montenegro, IEEE, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/MECO49872.2020.9134095

Методы определения динамических характеристик интегральных АЦП

А. М. Абрамов, С. Г. Гуржин, Е. М. Прошин

Кафедра информационно-измерительной и биомедицинской техники, abramov.a.job@yandex.ru; ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина», Рязань, Россия

Ключевые слова: дифференциальная нелинейность; динамические характеристики; эффективное число разрядов; мгновенные динамические погрешности; интегральные АЦП; интегральная нелинейность.

Аннотация: Предложены методы определения мгновенных динамических погрешностей интегральных аналого-цифровых преобразователей и эффективного числа разрядов. Первый метод заключается в сравнении зарегистрированного сигнала известной формы на выходе испытываемого АЦП, с моделью этой формы, формируемой с помощью ЭВМ. Эффективное число разрядов определяется по экспериментальным данным через погрешность, возникающую в каждой точке динамического диапазона АЦП, в зависимости от заданной скорости изменения испытательного сигнала или его частоты.

Список литературы

1. Штрапенин, Г. Л. Быстродействующие аналого-цифровые преобразователи фирмы National Semiconductor / Г. Л. Штрапенин // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6 (50). – С. 70 – 74.

2. IEEE 1241-2010 – IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. – Revision of IEEE Std 1241-2000. – New York : IEEE Instrumentation & Measurement Society, 2011. – 139 p.

3. IEEE 1057-2017 – IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders. – Revision of IEEE Std 1057-1994. – New York : IEEE Instrumentation & Measurement Society, 2018. – 189 p.

4. ГОСТ 8.009–84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Взамен ГОСТ 8.009–72 ; введ. 1986-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 26 с.

5. Грановский, В. А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения / В. А. Грановский. – Л. : Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.

6. Verification Method Implementation Based on Standard Virtual Measurement Instruments / A. M. Abramov, S. G. Gurzhin, V. I. Zhulev [et al.] // 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 10 – 14 June 2019, Budva, Montenegro. – IEEE, 2019. – P. 549 – 552. doi: 10.1109/MECO.2019.8760199

7. Analysis of Metrological Test Method Accuracy / A. M. Abramov, S. G. Gurzhin, V. I. Zhulev [et al.] // 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 8 – 11 June 2020, Budva, Montenegro. – IEEE, 2020. – P. 1 – 4. doi: 10.1109/MECO49872.2020.9134095

Methoden zur Bestimmung der dynamischen Eigenschaften von Integral-ADCs

Zusammenfassung: Es sind Methoden zur Bestimmung der momentanen dynamischen Fehler von integralen Analog-Digital-Wandlern und der effektiven Anzahl von Entladungen vorgeschlagen. Die erste Methode besteht darin, das registrierte Signal einer bekannten Form am Ausgang des getesteten ADC mit einem von einem Computer erzeugten Modell dieser Form zu vergleichen. Die effektive Anzahl der Entladungen wird anhand der experimentellen Daten durch den Fehler bestimmt, der an jedem Punkt des Dynamikbereichs des ADC auftritt, abhängig von der festgelegten Änderungsrate des Testsignals oder seiner Frequenz.

Méthodes de la détermination des caractéristiques dynamiques des convertisseurs analogiques numériques

Résumé: Sont proposées des méthodes pour déterminer les erreurs dynamiques instantanées des convertisseurs analogiques numériques intégrés et le nombre effectif des bits. La première méthode consiste à comparer le signal enregistré d'une forme connue à la sortie du convertisseur analogique numérique testé avec un modèle de cette forme généré par ordinateur. Le nombre effectif des bits est déterminé à partir des données expérimentales par l'erreur qui se produit à chaque point de la plage dynamique du convertisseur analogique numériques intégré en fonction du taux de variation du signal d'essai ou de sa fréquence.

Авторы: *Абрамов Алексей Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники; *Гуржин Сергей Григорьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники; *Прошин Евгений Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина», Рязань, Россия.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

А. В. Шилонос

*Научно-исследовательский центр, artemjch@rambler.ru;
ФГКВОУ ВО «Военная академия РВСН имени Петра Великого»,
Балашиха, Россия*

Ключевые слова: интеллектуальный датчик; искусственные нейронные сети; нечеткая логика; точность измерения.

Аннотация: Показана возможность построения интеллектуальной измерительной системы, обеспечивающей точность измеряемой величины с использованием аппарата искусственных нейронных сетей и нечеткой логики в условиях влияющих факторов внешней среды. Рассмотрены вопросы алгоритмической компенсации влияния изменения температуры на измерительную точность прибора, восстановления утраченной измерительной информации в результате прерываний работы, вызванных сбоями или отказами, а также предложена реализация функцией самоконтроля и диагностики технического состояния измерительной системы.

Введение

Актуальность статьи обусловлена целесообразностью в современных условиях санкций осуществлять развитие адаптивных измерительных систем, в которых использование чувствительного элемента, цифрового преобразователя и вычислителя превращает измерительную систему в локальную и компактную систему управления. Подобные устройства можно называть актюаторами – исполнительными устройствами, преобразующими один из видов энергии в другую, которые являются источником получения информации для верхнего иерархического уровня системы управления сложным динамическим объектом даже в условиях, вызывающих нестабильность работы при влияющих факторах внешней среды.

Интеллектуальный датчик

В соответствии с ГОСТ Р 8.673–2009 «Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения», где под интеллектуальным датчиком (ИД) раскрыто понятие адаптивного датчика с возможностью коррекции погрешности, возникающей в результате воздействия влияющих факторов внешней среды, за счет изменения алгоритмов работы с функцией метрологического самоконтроля. Основное отличие ИД состоит в способности самостоятельной адаптивной настройки при изменении условий эксплуатации.

В процессе реальной эксплуатации датчики подвергаются воздействию факторов внешней среды, как правило, в локальной точке измерений. К ним относят температуру, влажность, давление, присутствие активных веществ в газовой среде приборного отсека, гамма-излучение, электромагнитное и световое излучение, нейтронный поток, сверхжесткое и мягкое рентгеновские излучения, вибрации [1].

Под интеллектуальным датчиком понимают датчик со встроенной электроникой. Минимальный набор необходимых функциональных блоков интеллектуального датчика для измерительных и управляющих систем представлен на рис. 1 [2, 3].

В результате анализа научной литературы, а также учитывая условия функционирования измерительной системы с влияющими факторами внешней среды, помимо измерений, преобразования сигнала для ИД, возникает необходимость качественно улучшать технические характеристики. К функциям измерительной системы, которые могут быть применены в перспективной ракетно-космической технике, можно отнести следующие [2 – 4]:

- высокую стабильность измеряемых характеристик в течение длительного периода времени;
- необслуживаемый (автономный) режим работы в течение длительного периода времени от месяцев до нескольких лет;
- повышенную надежность при работе в экстремальных условиях;
- повышение точности датчиков, за счет коррекции погрешностей и возможность автокалибровки;
- реализацию режимов вынужденного периодического отключения и подачи питания;
- возможность самопроверки и коррекцию выходной информации при воздействии дестабилизирующих факторов (изменения параметров окружающей среды);
- хранение и трансляцию измеряемых параметров;
- прогнозирование измеряемых параметров на необходимый период для сохранения точности при возникновении отказов или вынужденных прерываний работы системы управления.

Рассмотрим возможность учета влияющих факторов внешней среды на точность измерения интеллектуального датчика. В качестве основной характеристики датчика будем считать следующую запись [4]:

$$A = F(U, I), \quad (1)$$

где A – измеряемая датчиком величина (интересующая нас); F – характеристики измеряемой величины; U, I – электрические величины на выходе датчика, связанные с измеренной им величиной.

Предполагается, что на выходе датчика используется напряжение U и ток I , далее, для краткости будем использовать величину U .

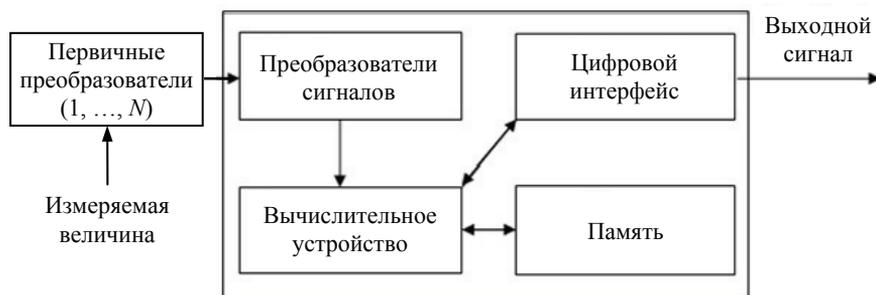


Рис. 1. Схема функциональных блоков ИД

Тогда основную характеристику перепишем с учетом корректирующих факторов

$$A = F(U) + K + Z, \quad (2)$$

где K – фактор, влияющий на измеряемую величину; Z – фактор, обусловленный характеристиками конкретного датчика (калибровочная характеристика).

Фактор влияющей величины представим в общем виде

$$K = F(f(B_k)), \quad (3)$$

где $F(f(B_k))$ – функция преобразования; $f(B_k)$ – передаточная функция влияющей величины; B_k – влияющая величина.

Влияющий фактор может быть одномерным и двумерным. Выражение для одномерной коррекции имеет следующий вид:

$$K = \sum_{j=1}^{K_1} b_j \varphi_j(u); \quad (4)$$

– для двумерной коррекции:

$$K = \sum_{j=1}^K b_j \varphi_j(u, B); \quad (5)$$

$$K = \begin{cases} K = \sum_{j=1}^{K_1} b_{1j} \varphi_{1j}(u), & B = b_1; \\ K = \sum_{j=1}^{K_2} b_{2j} \varphi_{2j}(u), & B = b_2. \end{cases} \quad (6)$$

Фактор калибровочной характеристики, учтенный в (2), представим следующим образом:

$$Z = Z(U) = \sum_{i=0}^N z_i x^i, \quad (7)$$

где z – коэффициенты; x – значения в калибровочных точках.

Как правило, данная функция представляется в виде таблицы значений. Например, при алгоритмической компенсации температурной зависимости составляется таблица, учитывающая изменение масштабного коэффициента маятникового акселерометра от температуры самого измерительного прибора [5, с. 75].

Уточним влияние временного дрейфа на показания датчика, который не зависит от измеряемой величины:

$$A = F(u) + F_t(t). \quad (8)$$

Используя выражения (3), (7), (8), перепишем общее уравнение (2):

$$A = F(u) + F_k(B_k) + F_t(t) + Z, \quad (9)$$

где $F(u)$ – основная характеристика измеряемой величины; $F_k(B_k)$ – коррекция с учетом влияющей величины; $F_t(t)$ – коррекция с учетом временного дрейфа (коррекция нуля в зависимости от продолжительности эксплуатации датчика); Z – коррекция с учетом калибровочной характеристики (учет смещения нуля для конкретного датчика после испытаний).

Полученное уравнение ИД представляет собой уравнение преобразования, в котором учтены калибровочные данные преобразователей, временного дрейфа и величины влияющих факторов.

Влияющие факторы внешней среды являются причиной возрастания погрешности измерений, поэтому проводится поиск оптимальных решений для компенсации данных погрешностей [2 – 6].

Нечеткая логика в компенсации погрешности влияющей величины

Рассмотрим возможность компенсации погрешности влияющей величины, временного дрейфа и калибровочной характеристики с использованием алгоритмической компенсации. Необходимые данные для компенсации влияющих факторов формируют на стендах в режиме статических испытаний и записывают в память в виде табличных данных.

Алгоритмическая компенсация расчета выходной информации с датчика с учетом поправочных коэффициентов состоит в следующем [6]:

– проводится съем значения температуры по информации от платинового термодатчика, установленного в акселерометр;

– из таблицы поправочных величин для данной температуры берется уточненный коэффициент;

– значение поправочного коэффициента (табличного) для данной температуры умножается на выходной сигнал акселерометра.

В качестве примера рассмотрим возможность уточнения масштабного коэффициента при алгоритмической компенсации влияния изменения температуры на измерительную точность маятникового акселерометра. Для этих целей сравним два способа уточнения масштабного коэффициента: первый – основан на использовании табличных данных (предусмотренных производителем); второй способ с использованием возможностей нечеткой логики предполагает сглаживание и более точное определение масштабного коэффициента в промежуточных табличных данных.

Предлагается уточнение масштабного коэффициента, компенсирующего температурную зависимость, используя алгоритмы вывода нечетких правил за счет избыточности информации, содержащейся в терм-множествах. Значение поправочного коэффициента «размывается» на всем диапазоне влияющей величины, а значение поправки масштабного коэффициента вычисляется, используя алгоритмы нечеткого вывода и базы нечетких правил:

$$K_m = \begin{cases} X_1 \forall t_3 \leq t \leq t_1; \\ X_2 \forall t_4 \leq t \leq t_2; \\ X_3 \forall t_5 \leq t \leq t_3; \\ X_4 \forall t_6 \leq t \leq t_4; \\ \dots\dots\dots \\ X_{n-1} \forall t_{n-1} \leq t \leq t_{n-3}; \\ X_n \forall t_n \leq t \leq t_{n-2}. \end{cases} \quad (10)$$

При имитационном моделировании применялся рабочий температурный диапазон акселерометров 15...45 °С, а измерительный прибор градуирован с интервалом в 5 °С.

Для построения базы нечетких правил систем нечеткого вывода необходимо определить значения входных и выходных переменных в виде нечетких чисел. Температура работы акселерометра использовалась в качестве входной переменной (рис. 2, а); в качестве выходной переменной – масштабный коэффициент K_m (значения масштабного коэффициента в зависимости от температуры получены по результатам калибровки акселерометров при статических испытаниях) [6] (рис. 2, б).

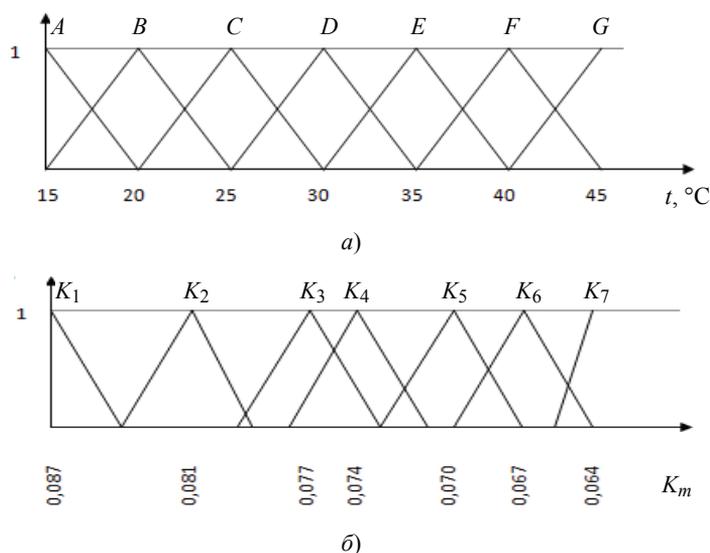


Рис. 2. Нечеткие числа входной переменной (температуры) (а) и выходной (значения масштабного коэффициента) (б)

При каждом получении измерений акселерометра определяется, к каким нечетким множествам принадлежит измеренная температура. К примеру, измеренная температура находится в диапазоне множества G , далее проверяется принадлежность температуры другим множествам. Если температура принадлежит только множеству G , то значение масштабного коэффициента выбирается из множества K_7 , если же помимо множества G температура принадлежит еще и множеству F , тогда значение коэффициента вычисляется, исходя из пересечения входных множеств в диапазоне множеств K_7 и K_6 . Затем полученный масштабный коэффициент складывается с измеренной на нулевом цикле работы поправкой на временную нестабильность акселерометра ΔK_m , и полученный результат K_m участвует в решении бортовой навигационной задачи. На каждом последующем цикле работы алгоритма масштабный коэффициент уточняется в зависимости от температуры работы акселерометра.

Рассмотрим пример его выполнения для случая, когда текущая температура равна $42 ^\circ\text{C}$. В этом случае входная переменная приводит к значению степени истинности 0,4 для множества G и к значению 0,6 для множества F . Соответствующие подусловия используются в K_6 и K_7 и приводят к двум нечетким множествам.

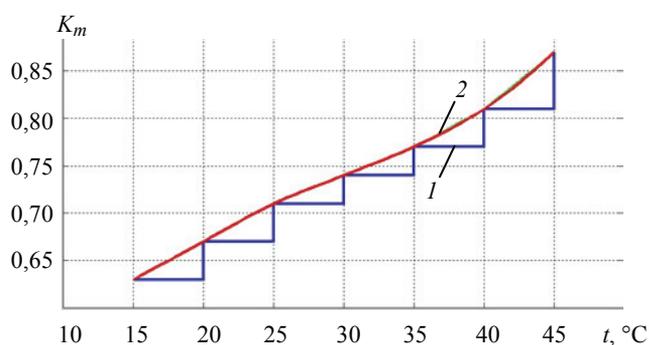


Рис. 3. Результат сравнения двух подходов при уточнении масштабного коэффициента K_m с использованием поправочной таблицы (1) и применением нечеткой логики (2)

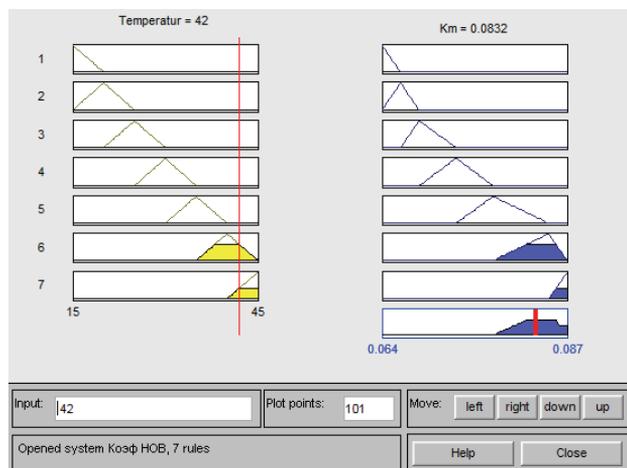


Рис. 4. Вывод значения масштабного коэффициента с использованием нечеткой логики

Выходная переменная «масштабный коэффициент» методом центра площади для значений функции принадлежности приводит к значению $K_m = 0,0832$ (рис. 4).

При значении температуры $42\text{ }^\circ\text{C}$ табличное значение для поправочного масштабного коэффициента составит $0,081$, а с использованием аппарата нечеткой логики – $0,0832$. Методическая погрешность для текущего момента времени работы измерительного прибора составила $0,0022$.

Восстановление утраченной измерительной информации

Вместе с этим для ИД, функционирующих в условиях влияющих факторов внешней среды, требуется восстанавливать отсутствующие измерения в период вынужденного прерывания работы, вызванного сбоями и отказами. Для решения данных задач предлагается использовать аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС).

Рассмотрим возможность применения аппарата ИНС для восстановления утраченной измерительной информации в период вынужденного прерывания работы, связанным со сбоями, отказами. Полагаем, что имеется возможность осуществлять запись текущей измерительной информации на специальный накопитель. Ставится задача – восстановить последовательность временного ряда на период прерывания работы измерительного прибора с учетом имеющейся предыстории измеренных значений. Для более точного восстановления информации будем использовать первые значения приращений после периода прерывания.

Опуская вопросы выбора структуры ИНС, количества слоев, количества нейронов в слое, обучения, которые подробно раскрыты в работах [7, 8], рассмотрим схему восстановления утраченной информации с использованием ИНС (рис. 5).

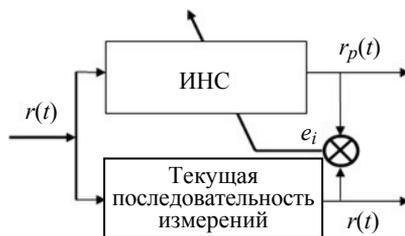


Рис. 5. Схема с идентифицирующей ИНС

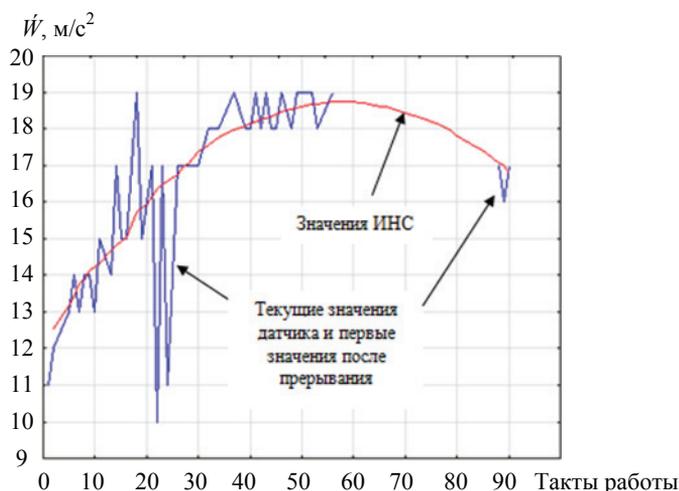


Рис. 6. Результаты работы ИНС при восстановлении утраченной информации в период прерывания работы

На схеме предложен вариант восстановления информации показаний датчика на период вынужденного прерывания его работы, где ИНС обучается при штатной работе ИД по ошибке рассогласования e_i .

На рисунке 6 можно наглядно увидеть, что ИНС прямого распространения сигнала с достаточной точностью аппроксимирует кажущееся ускорение \ddot{W} . Вместе с этим при наличии выбросов или шумов во временном ряду, ИНС входные значения сглаживает, что в свою очередь позволяет осуществить достаточно точное восстановление информации.

Для восстановления утраченной измерительной информации в период прерывания работы с использованием ИНС опытным путем установлено, что достаточно трехслойного персептрона с семью нейронами скрытого слоя. Для восстановления 40 пропущенных значений с 55 по 95 такт работы на вход ИНС подавались 55 значений предыстории временного ряда до периода прерывания и три значения после периода прерывания. Моделирование работы ИНС проводилось в программе Statistika.

Контроль и диагностика интеллектуального датчика

Реализацию возможности контроля и диагностики технического состояния датчиков измерительной системы предлагается осуществить с использованием двух ИНС, где M_1 и M_2 – модели объекта контроля (ОК), реализованные в качестве ИНС (рис. 7). Добавление блока интеллектуального классификатора с мажоритарным элементом (МЭ) и блоком принятия решений (БПР) с экспертной системой в виде нечеткой логики позволит осуществлять контроль выходных значений датчика, как объекта контроля, и выявлять отказавший элемент схемы.

На рисунке 7 обозначено: $\Delta_1 = Y_{OK} - Y_{M1}$, $\Delta_2 = Y_{OK} - Y_{M2}$, $\Delta_3 = Y_{M1} - Y_{M2}$ – векторы рассогласований (невязок) между значениями векторов сигналов Y_{OK} , Y_{M1} , Y_{M2} .

Предполагаем, что отказ двух или более блоков в определенный момент времени маловероятен. Тогда в системе могут возникнуть следующие события:

1. «Отказ датчика».
2. «Исправное состояние».
3. «Отказ M_1 » – сбой или аппаратный отказ модуля M_1 с ИНС, неверное вычисление компонент вектора Y_{M1} .
4. «Отказ M_2 » – ошибочное вычисление компонент вектора Y_{M2} .
5. «Неопределенность выхода БПР» информирует об отказе блока сравнения.

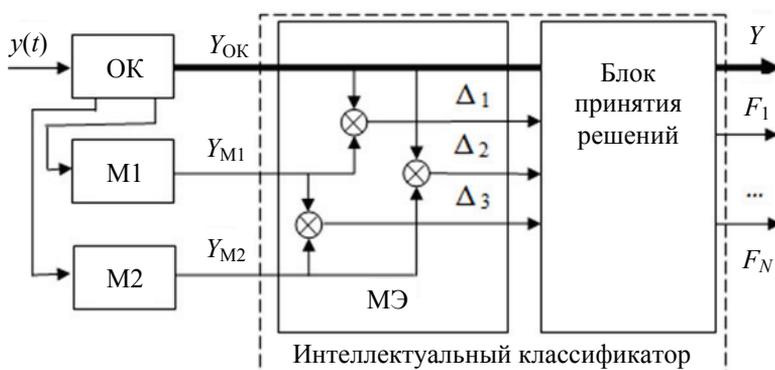


Рис. 7. Схема отказоустойчивого интеллектуального датчика с МЭ и БПР с нечеткой логикой

В таблице 1 отображено влияние рассогласования Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 на наступившие анализируемые события с помощью блока принятия решений. Выходные реакции блока принятия решений $F = 5$. Значения компонент невязок Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 представлены в виде значений лингвистических переменных (терм): «Малое», «Большое».

Нечетким алгоритмом называется упорядоченное множество инструкций (правил), в формулировке которых содержатся нечеткие высказывания. Характеристикой нечеткого множества в данном случае выступает функция принадлежности, в качестве которой выбрана треугольная функция [9].

Логический вывод осуществляется поэтапно [10, 11]:

1. На этапе фаззификации (введения нечеткости) функции принадлежности, определенные на входных переменных, применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки для соответствующего нечеткого правила.

2. На этапе логического вывода вычисленное значение истинности для предпосылок каждого нечеткого правила применяется к заключениям каждого правила.

С помощью блока принятия решений осуществляется нечеткий логический вывод с использованием системы правил, объединяющих входные вектора и выходные реакции F_1, \dots, F_5 БПР. Рассмотрим пример задания такого правила для события «Исправное состояние датчика»:

Таблица 1

Проявление характера отказов

Событие	Компонент			Реакция БПР (F)
	Δ_1	Δ_2	Δ_3	
Исправное состояние	$\Delta_1 = \text{Малое}$	$\Delta_2 = \text{Малое}$	$\Delta_3 = \text{Малое}$	$F_1 = 0$
Отказ: датчика M1 M2	$\Delta_1 = \text{Большое}$	$\Delta_2 = \text{Большое}$	$\Delta_3 = \text{Малое}$	$F_2 = 1$
	$\Delta_1 = \text{Большое}$	$\Delta_2 = \text{Малое}$	$\Delta_3 = \text{Большое}$	$F_3 = 1$
	$\Delta_1 = \text{Малое}$	$\Delta_2 = \text{Большое}$	$\Delta_3 = \text{Большое}$	$F_4 = 1$
Неопределенность выхода БПР	$\Delta_1 = \text{Малое}$	$\Delta_2 = \text{Малое}$	$\Delta_3 = \text{Большое}$	$F_5 = 1$
	$\Delta_1 = \text{Малое}$	$\Delta_2 = \text{Большое}$	$\Delta_3 = \text{Малое}$	
	$\Delta_1 = \text{Большое}$	$\Delta_2 = \text{Малое}$	$\Delta_3 = \text{Малое}$	
	$\Delta_1 = \text{Большое}$	$\Delta_2 = \text{Большое}$	$\Delta_3 = \text{Большое}$	

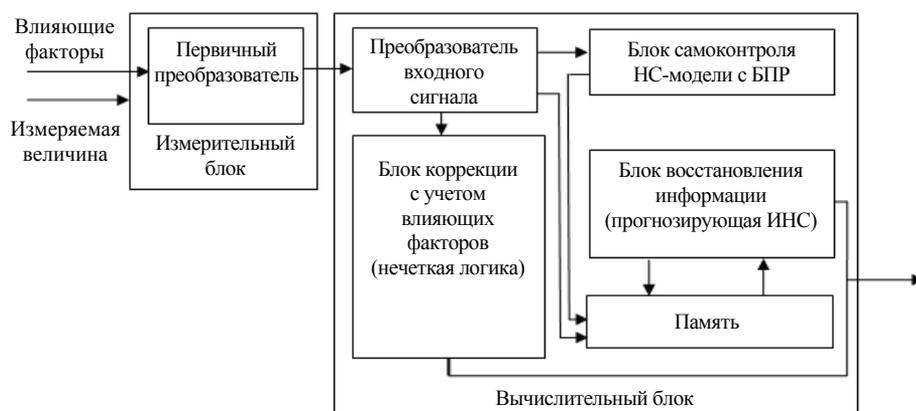


Рис. 8. Структурная схема multifunctional интеллектуального датчика, как части измерительной системы

ЕСЛИ ($\Delta_1 = \text{Малое}$ И $\Delta_2 = \text{Малое}$ И $\Delta_3 = \text{Малое}$), ТО ($F_1 = 0, F_2 = 0, F_3 = 0, F_4 = 0, F_5 = 0$).

Для события «Отказ М1» (нейросетевой модели М1) будет следующее правило:

ЕСЛИ ($\Delta_1 = \text{Большое}$ И $\Delta_2 = \text{Большое}$ И $\Delta_3 = \text{Малое}$), ТО ($F_1 = 1, F_2 = 1, F_3 = 0, F_4 = 0, F_5 = 0$).

Для других событий правила строятся аналогично.

Рассмотрим возможные решения (рекомендации) при обнаружении того или иного отказа:

1. При появлении сигнала «Отказ датчика» следует воспользоваться усреднением сигналов с выхода М1 и М2, то есть

$$Y = \frac{Y_{M1} + Y_{M2}}{2},$$

что позволяет обеспечить более высокую точность Y .

2. При появлении «Отказ М1» или «Отказ М2» система сохраняет работоспособность, но требуется проведение дообучения отказавшей ИНС. В случае, если процедура дообучения прошла неэффективно, отказавшую ИНС исключают из схемы голосования. Система остается двухканальной.

На рисунке 8 предлагается структурная схема разработанного ИД в составе измерительной системы, который состоит из первичного преобразователя – устройства преобразования неэлектрического сигнала в электрический, вычислительного блока, представляющего собой совокупность блоков: преобразователя входного сигнала; масштабирования (с учетом влияющей величины, калибровочной характеристики, временного дрейфа); самоконтроля (на основе ИНС с БПР); восстановления утраченной измерительной информации при появлении сбоев, отказов.

Заключение

Предложен вариант построения интеллектуальных датчиков, обеспечивающий стабильность измеряемых параметров в течение длительного необслуживаемого периода работы, в том числе в условиях внешних дестабилизирующих воздействий, с возможностью восстановления утраченной информации на период вынужденного прерывания работы, а также с функцией самоконтроля и диагностики технического состояния на примере маятникового акселерометра.

Список литературы

1. Хлыбов, В. Ф. Системы термостатирования : учебное пособие / В. Ф. Хлыбов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : [б. и.], 2005. – 420 с.
2. Белозубов, Е. М. Метрологический самоконтроль в интеллектуальных датчиках для информационно-измерительных и управляющих систем / Е. М. Белозубов, В. А. Васильев, П. С. Чернов // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 95 – 98.
3. Лоскутов, А. И. Автоматизация контроля состояния сложных технических систем на основе использования конечно-автоматной модели и нейросетевых структур / А. И. Лоскутов, В. Б. Вечеркин, О. Л. Шестопалова // *Информационно-управляющие системы*. – 2012. – № 2 (57). – С. 74 – 81.
4. Марченко, И. О. Система проектирования многофункциональных реконфигурируемых интеллектуальных датчиков : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.16 / Марченко Илья Олегович. – Новосибирск, 2015. – 181 с.
5. Применение искусственных нейронных сетей в задачах контроля и диагностики подсистем космических аппаратов. – Текст электронный / Н. С. Абрамов, В. Ф. Заднепровский, А. А. Талалаев, В. П. Фраленко // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 3. – URL : <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13242> (дата обращения: 15.10.2021).
6. Командно-измерительные приборы / Под ред. Б. И. Назарова. – М. : МО СССР, 1987. – 639 с.
7. Буянкин, В. М. Применение искусственной нейронной сети в режиме идентификации динамических параметров электродвигателя / В. М. Буянкин // *Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Серия: Приборостроение*. – 2006. – № 3 (64). – С. 25 – 30.
8. Буянкин, В. М. Нейроидентификация статических и динамических характеристик электропривода / В. М. Буянкин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2008. – № 9. – С. 43 – 46.
9. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М. : Физматлит, 2001. – 224 с.
10. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
11. Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата / Ю. Г. Емельянова, К. А. Константинов, С. В. Погодин [и др.] // *Программные системы: теория и приложения*. – 2010. – Т. 1, № 1 (1). – С. 45 – 59.

Intelligent Measuring System Based on Neural Network Technologies and Fuzzy Logic

A. V. Shilonosov

Research Center, artemjch@rambler.ru; Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great, Balashikha, Russia

Keywords: intelligent sensor; artificial neural networks; fuzzy logic; measurement accuracy.

Abstract: The paper describes the possibility of constructing an intelligent measuring system that ensures the accuracy of the measured value using the apparatus of artificial neural networks and fuzzy logic under the conditions of influencing

environmental factors. The issues of algorithmic compensation of the influence of temperature changes on the measuring accuracy of the device, restoration of lost measuring information as a result of interruptions in work caused by failures are considered; the implementation of the self-monitoring and diagnostics function of the technical condition of the measuring system is also proposed.

References

1. Khlybov V.F. *Sistemy termostatirovaniya: uchebnoye posobiye* [Temperature control systems: a tutorial], Moscow: [b. i.], 2005, 420 p. (In Russ.)
2. Belozubov Ye.M., Vasil'yev V.A., Chernov P.S. [Metrological self-control in intelligent sensors for information-measuring and control systems], *Fundamental'nyye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya* [Fundamental problems of radio electronic instrumentation], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 95-98. (In Russ.)
3. Loskutov A.I., Vecherkin V.B., Shestopalova O.L. [Automation of state control of complex technical systems based on the use of a finite automaton model and neural network structures], *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy* [Information and control systems], 2012, no. 2 (57), pp. 74-81. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Marchenko I.O. *PhD Dissertation (Technical)*, Novosibirsk, 2015, 181 p. (In Russ.)
5. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13242> (accessed 15 October 2021).
6. Nazarov B.I. [Ed.] *Komandno-izmeritel'nyye pribory* [Command-measuring devices], Moscow: MO SSSR, 1987, 639 p. (In Russ.)
7. Buyankin V.M. [Application of an artificial neural network in the mode of identification of the dynamic parameters of an electric motor], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Priborostroyeniye* [Bulletin of the Moscow State Technical University. N. E. Bauman. Series: Instrumentation], 2006, no. 3 (64), pp. 25-30. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Buyankin V.M. [Neuroidentification of static and dynamic characteristics of the electric drive], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of higher educational institutions. Engineering], 2008, no. 9, pp. 43-46. (In Russ.)
9. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Yu. *Nechetkaya logika i iskusstvennyye neyronnyye seti* [Fuzzy logic and artificial neural networks], Moscow: Fizmatlit, 2001, 224 p. (In Russ.)
10. Leonenkov A.V. *Nechetkoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH], St. Petersburg: BKHV-Peterburg, 2003, 736 p. (In Russ.)
11. Yemel'yanova Yu.G., Konstantinov K.A., Pogodin S.V. [et al.] [Neural network control system for spacecraft orientation and range sensors], *Programmnyye sistemy: teoriya i prilozheniya* [Program systems: theory and applications], 2010, vol. 1, no. 1 (1), pp. 45-59. (In Russ., abstract in Eng.)

Intelligentes Messsystem auf Grund der neuronalen Netzwerktechnologien und Fuzzy-Logik

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit aufgezeigt, ein intelligentes Messsystem aufzubauen, das mit dem Apparat künstlicher neuronaler Netze und Fuzzy-Logik die Genauigkeit des Messwertes unter den Bedingungen beeinflussender Umweltfaktoren sicherstellt. Dabei sind die Fragestellungen der algorithmischen

Kompensation des Einflusses von Temperaturänderungen auf die Messgenauigkeit des Gerätes, Wiederherstellung verlorener Messinformationen infolge störungs- oder störungsbedingter Arbeitsunterbrechungen betrachtet, sowie ist die Implementierung der Selbstkontrollfunktion und Diagnose des technischen Zustands des Messsystems vorgeschlagen.

Système de mesure intelligent basé sur la technologie du réseau neuronal et la logique floue

Résumé: Est montrée la possibilité de construction du système de mesure intelligent qui assure la précision de la valeur mesurée avec l'utilisation de l'appareil des réseaux neuronaux artificiels et de la logique floue dans les conditions des facteurs d'influence de l'environnement extérieur. Sont abordés les problèmes de la compensation algorithmique de l'influence de la température sur la précision de la mesure de l'appareil, la récupération de l'information de mesure perdue à la suite de l'interruption de travail causées par des défaillances ou des erreurs; est proposée la réalisation de la fonction d'autosurveillance et de diagnostic de l'état technique du système de mesure.

Автор: *Шилоносев Артем Владимирович* – докторант научно-исследовательского центра, ФГКВООУ ВО «Военная академия РВСН имени Петра Великого», Балашиха, Россия.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ПЛОДОВООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ В ВИРТУАЛЬНОЙ СИМУЛЯЦИОННОЙ СРЕДЕ

Н. И. Лебедь

*Кафедра «Электроснабжение и энергетические системы», nik8872@yandex.ru;
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»,
Волгоград, Россия*

Ключевые слова: автоматизация; автоматизированный электропривод; измельчитель; микроконтроллеры; ножевой аппарат; плодовоовощная продукция; резание.

Аннотация: Разработан измельчитель плодовоовощной продукции, к преимуществам которого относится высокая производительность при минимальных энергозатратах. Предложена система микропроцессорного управления измельчителем на основе аппаратной платформы программируемого микроконтроллера ATmega 328.

Смоделирована в облачной среде система управления автоматизированного электропривода измельчителя с применением языков программирования FBD и C++. Подобран список компонентов электрической схемы системы управления, построена графическая схема программного кода, а также показан список тэгов (входы, выходы, переменные). Проведена проверка системы на работоспособность в виртуальной симуляционной облачно-отладочной среде Autodesk Circuitson on Tinkercad, доказавшая ее работоспособность и эффективность.

Введение

Наиболее значимыми факторами, оказывающими важнейшее влияние на отрасль перерабатывающей промышленности, в частности производство продуктов из плодов и овощей, является эффективность применяемых технологий в совокупности с техническими средствами для их реализации [1].

При хранении плодов и овощей потери урожая составляет от 20 до 30 %. Транспортировке свежих плодов и овощей с минимальными потерями в отдаленные регионы страны препятствуют значительные расстояния и плохое качество дорожной сети. При этом комплексная переработка 1 млн т плодовоовощного сырья на пищевые продукты с минимальным количеством отходов позволяет уменьшить потери его при хранении на 83 тыс. т [2].

Также следует отметить, что в отраслях АПК России работают только 4 % техники, удовлетворяющей современным международным требованиям и стандартам. Способами обновления техники должны быть повсеместная автоматизация существующей и внедрение новой роботизированной техники, что делает актуальным применение способов разработки систем автоматизации посредством виртуальной симуляционной среды, позволяющей проводить проверку на работоспособность и моделирование в условиях, идентичных реальным.

Объекты и методы исследований

В качестве объекта исследований для разработки схемы автоматизации выбран разработанный ранее измельчитель плодовоовощной продукции [3] (рис. 1).

Устройство содержит опоры 1, цилиндрический корпус 2, закрепленный на нем загрузочный бункер 3 с вибратором-встряхивателем 4, дозатор барабанного типа 5, имеющий в нижней горловине 6 перекидной клапан 7, центробежный ротор 8 с тремя направляющими трубами 9, расположенными под углом 120° относительно друг друга, на концах которых установлены сменные ножевые стенки 10 с ножами, расположенными зигзагообразно, отражатели 11, электродвигатель 12, защитный кожух 13, емкость для сбора измельченного продукта 14, расположенная под выгрузными отверстиями 15 цилиндрического корпуса 2.

Устройство работает следующим образом.

Перед загрузкой материала запускали электродвигатель 12 устройства, чтобы задать центробежному ротору 8 необходимую частоту вращения. Обрабатываемый материал через загрузочный бункер 3 и дозатор барабанного типа 5 поступал в центробежный ротор 8. Посредством передачи крутящего момента валом электродвигателя 12 центробежный ротор 8 равномерно распределял плодовоовощной материал по трем направляющим трубам 9. В результате центробежной силы материал удалялся из направляющих труб 9 через ножи ножевых стенок 10 с линейной скоростью, необходимой для полного разрезания. При этом плодовоовощной материал проникал сквозь ножи, измельчался на ломтики необходимой толщины и далее через отражатели 11 и выгрузное отверстие 15 поступал в емкость для сбора измельченного материала 14 [4].

Проведенные ранее исследования были направлены на снижение энергоемкости измельчения и повышения качества готовой обработанной продукции [5]. Недостатком данного измельчителя было отсутствие системы управления и автоматизации электроприводом, что провоцировало дополнительные затраты за счет контроля и ручного управления при работе с устройством со стороны закрепленного оператора.

Так, при реализации рабочего режима измельчителя необходимо запускать сначала основной привод (ротора) и при достижении нужной частоты вращения через 2...8 с приводить в действие привод дозатора. Для отключения измельчителя и выхода из рабочего режима порядок обратный: вначале отключали привод

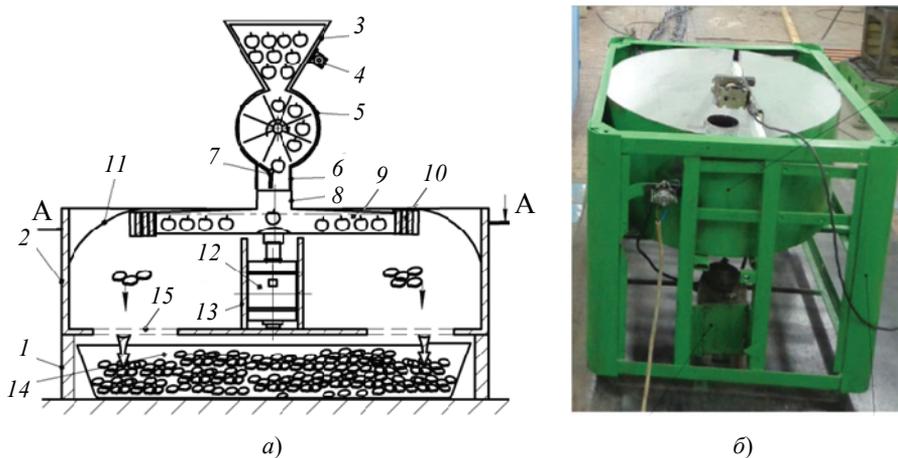


Рис. 1. Измельчитель плодовоовощной продукции [3]:
а – схематичный вид; б – изготовленная экспериментальная установка

дозатора и через 2...8 с основной привод (ротора). Такая схема выключения была обусловлена исключением перегрузок ротора и полным измельчением всего обрабатываемого плодовоовощного сырья, находящегося в трубах ротора, а также удалением ломтиков из межножевого пространства ножевого аппарата. Кроме этого отсутствовала возможность отладки ряда режимов работы измельчителя, в частности гибкого управления частотой вращения электродвигателей.

Для разработки и моделирования системы автоматизированного управления измельчителем использовалась симуляционная облачно-отладочная среда Autodesk Circuits on Tinkercad, где проводился подбор основных элементов системы управления и их подключение к микроконтроллеру. Разработка программного кода проекта проходила в системе графического программирования FLProg на языке FBD, далее проводилась проверка кода, затем преобразование кода на язык C++ и последующая компиляция в Arduino IDE [6]. Полученная программа загружалась в блок «Код» среды Autodesk Circuits on Tinkercad с предварительно созданной схемой системы автоматизированного управления измельчителем для последующей проверки на работоспособность и моделирования [7].

Результаты исследований

На рисунке 2 представлены результаты виртуального моделирования автоматизированного привода измельчителя плодовоовощной продукции в симуляционной облачно-отладочной среде Autodesk Circuits on Tinkercad.

Имитационная схема включала: сигнальные лампы приводов при рабочем режиме 1, сигнальные лампы приводов при отладочном режиме 2, потенциометр 4 привода дозатора 3, основной привод 5, потенциометр 6 основного привода 5, программная кнопка пошагового включения/выключения 7, источник питания 8, драйвер двигателей 9.

Для построения схемы автоматизированного привода использовали имеющиеся виртуальные электронные компоненты указанной программы, в которую не входят источники и электродвигатели переменного тока. Так как для выполнения программы управления выбранным микроконтроллером ATmega 328 (Arduino-UNO) не принципиально различие между использованием постоянного или переменного

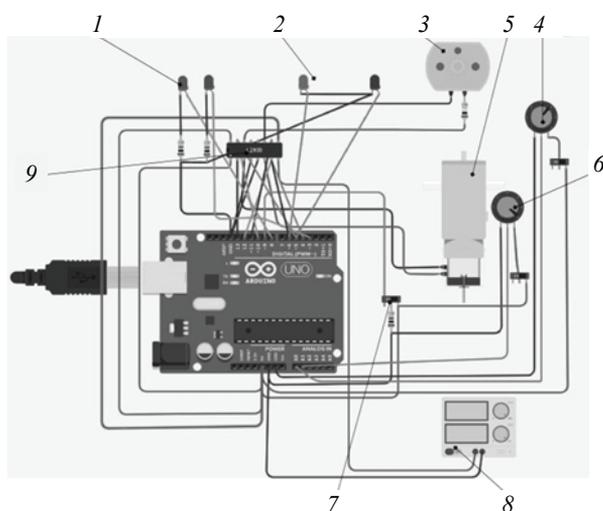


Рис. 2. Результаты виртуального моделирования автоматизированного привода измельчителя плодовоовощной продукции в симуляционной облачно-отладочной среде Autodesk Circuits on Tinkercad

тока, а также соответствующим им электроприборам, то вышеуказанную систему вполне можно протестировать на предлагаемой схеме (см. рис. 2) и в первом приближении рекомендовать для автоматизации разработанной ранее установки. В последующем схема будет дополнена соответствующими элементами: твердотельными реле (SSR AC), радиаторами для реле, шилдом управления мощной нагрузкой, электродвигателями переменного тока и др. [8, 9].

Для подключения электродвигателей к микроконтроллеру был использован драйвер двигателей 9 с H-мостом L293D, позволяющий управлять в широком диапазоне настроек двумя электродвигателями одновременно.

В качестве приводов для наглядности данной схемы, построенной в виртуальной симуляционной среде, использован мотор-редуктор – для основного привода 5 (ротора) и мотор постоянного тока с понижающим резистором для снижения частоты его вращения – для привода дозатора 3.

Мотор-редуктор и мотор постоянного тока подключены через драйвер 9 к цифровым выводам платы Arduino-UNO, а также ШИМ-выводам. Применение ШИМ-выводов обусловлено режимом отладки измельчителя, где для гибкой регулировки частоты вращения приводов использованы потенциометры 4, 6, подключенные с аналоговыми входами A0 и A1. Потенциометры 4, 6 имеют переключатели для принудительного отключения режима отладки. Кроме этого, к выводам подсоединены аноды светодиодов в качестве сигнальных ламп приводов 3, 5 при отладочном режиме с возможностью менять яркость при корректировке частоты вращения мотора-редуктора и мотора постоянного тока потенциометрами.

В качестве сигнальных ламп приводов рабочего режима представлены светодиоды 1, подключенные к цифровым выводам, связанные с программной кнопкой пошагового включения/выключения приводов, подсоединенной к цифровому выводу, выполняющего роль входа. Список компонентов схемы, их наименование и количество представлено в табл. 1.

На рисунке 3 представлены результаты графического программирования предлагаемой системы управления, выполненной на языке FBD. Согласно этой схеме (рис. 3, а) предусмотрен цифровой вход, выполняющий роль программной кнопки пошагового включения/выключения приводов (см. рис. 3, «кнопка вкл./выкл.»), соединенный через функциональные блоки «таймер» с выходами привода дозатора и основного привода (ротора). Для реализации рабочего режима – пошагового включения/отключения – использовано два блока «таймер» с задержкой на включение и отключение. Кроме этого к каждому из приводов подсоединена лампа сигнальная через функциональный блок «генератор – симметричный мультивибратор» для индикации рабочего режима путем мигания.

Для реализации режима отладки использованы аналоговые входы A0 и A1 для потенциометров основного привода (ротора) и привода дозатора, которые через функциональные блоки «масштабирование» связаны с выходами привода дозатора ШИМ и привода основного ШИМ. Наименование входов и выходов схемы, а также номера контактов представлены на рис. 3, б.

Разработанный графический код FBD преобразовывался до языка программирования C++, компилировался в Arduino IDE и загружался в блок «Код» симуляционной среды Autodesk Circuits on Tinkercad с предварительно собранной схемой автоматизации. Далее соответствующей командой в программе проводилось моделирование функционирования разработанной системы управления автоматизированного электропривода измельчителя плодовоовощной продукции, доказавшее работоспособность и эффективность схемы.

Список компонентов электрической схемы

Компонент	Имя	Количество
Ардуино Уно R3	U1	1
Мотор-редуктор	M1	1
Электрический привод с Н-мостом	U2	1
Двигатель постоянного тока	M2	1
Резистор 100 Ом	P2 P1 P3	3
Ползунковый переключатель	C5 C1 C2	3
Зеленый светодиод	Д1	1
Синий светодиод	Д2	1
Потенциометр 25 кОм	Rpot1	1
Резистор 100 кОм	R6	1
Потенциометр 250 кОм	Rpot2	1
Красный светодиод	Д3	1
Желтый светодиод	Д4	1
Источник питания	P1	1

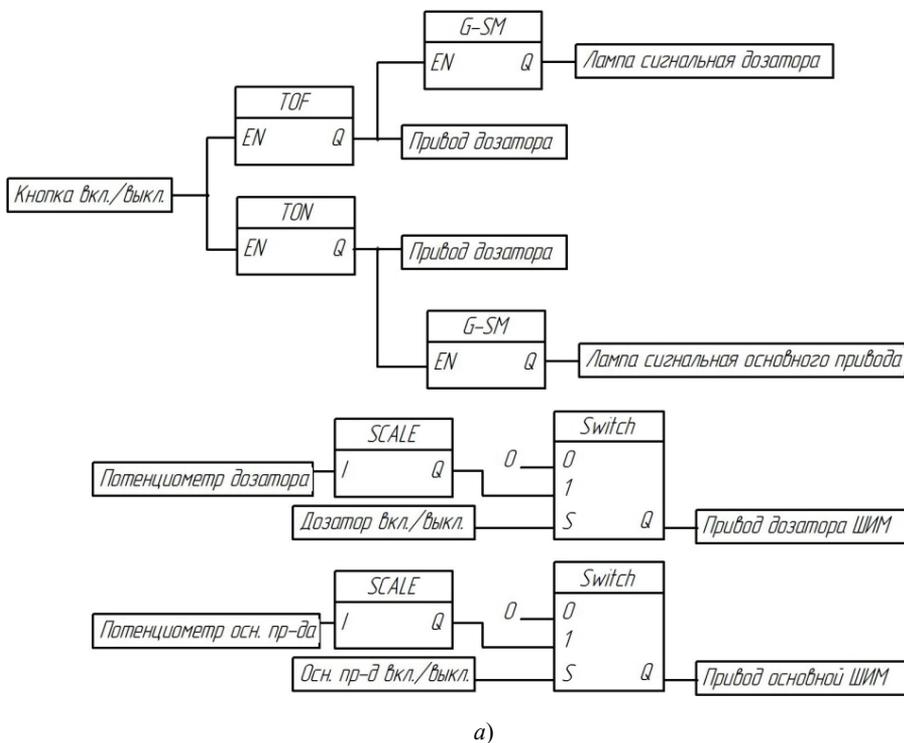
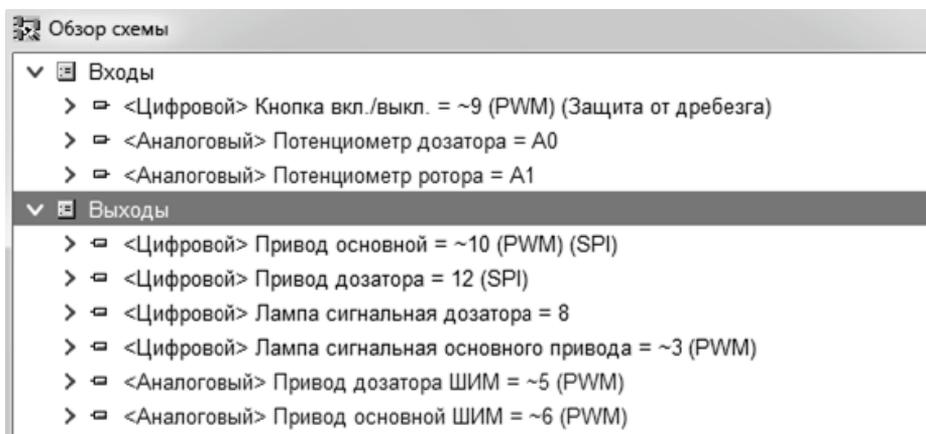


Рис. 3. Результаты графического программирования на языке FBD (начало):
а – графическая схема



б)

Рис. 3. Окончание:

б – обзор тэгов графической схемы

Заключение

Предлагаемое устройство позволяет осуществить процесс измельчения плодов и овощей без обильного соковыделения и защемления измельчаемых материалов между ножами при минимальных разрушениях их структуры с пониженными энергозатратами. Данные факторы обеспечиваются расположением ножей зигзагообразно, что существенно снижает трение продукта и эффект стесненного резания, а, следовательно, позволяет снизить энергозатраты и толщину ножей [10].

Применение сменных ножевых стенок, установленных на концах направляющих труб центробежного ротора, позволяет существенно снизить металлоемкость устройства, упростить конструкцию, а также повысить эффективность технологического процесса за счет исключения постоянной корректировки угла атаки ножей. Кроме этого, при использовании сменных ножевых стенок существенно повышается номенклатура получаемого готового продукта: ломтики, брусочки и др.

Предлагаемая система управления автоматизированного электропривода измельчителя плодоовощной продукции обеспечивает в рабочем режиме поочередный запуск и отключение основного привода и привода дозатора с индикацией режима путем мигающей световой сигнализации и возможностью корректировок задержки времени на включение и отключение. Также в режиме отладки предусмотрено гибкое настраивание частоты вращения приводов с отображением изменения яркости светодиодов, соответствующих приводам измельчителя.

Поочередный запуск/отключение приводов в рабочем режиме позволяет избежать перегрузок ротора плодоовощным материалом до выхода его привода на частоту вращения рабочего режима, а также предотвратить накопление неизмельченного материала в роторе и ножевых аппаратах после отключения рабочего режима. Устройство может быть реализовано в пищевой промышленности и сельскохозяйственном производстве.

Список литературы

1. Analysis of Root Crops Preparation System / A. A. H. Al-Maidi, A. V. Brusenkov, V. P. Kapustin, Yu. V. Rodionov // International Journal of Agricultural and Statistical Sciences. – 2021. – No. 16. – P. 1345 – 1350.

2. Антонов, Н. М. Результаты экспериментальных исследований по определению усилий резания плодов и корнеплодов / Н. М. Антонов, Ю. В. Искуснов, Н. И. Лебедь // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 2 (26). – С. 137 – 141.

3. Полезная модель 174962 Российская Федерация, МПК В02С 18/06. Измельчитель плодоовощной продукции / Н. М. Антонов, Н. И. Лебедь, А. В. Малолетов, А. К. Мамахай ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский аграрный университет». – № 2017116509 ; заявл. 11.05.2017 ; опубл. 13.11.2017, Бюл. № 32. – 7 с.

4. Antonov, N. M. Energetic Calculation of an Apple Chopper with Zigzagging Knife Location in the Cutting Unit / N. M. Antonov, N. I. Lebed, A. M. Makarov // Journal of Food Process Engineering. – 2017. – Vol. 40, Issue 2. – P. e12352. doi: 10.1111/jfpe.12352

5. Lebed, N. I. Investigation of Process of Cutting Fruit and Vegetable Raw Materials Into Slices Using Rotary Chopper / N. I. Lebed, N. M. Antonova, G. G. Rusakova // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2019, 25 – 29 March 2019, Sochi. – Springer, Cham., 2020. – P. 451 – 459. doi: 10.1007/978-3-030-22041-9_49

6. Соммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freduino : пер. с нем. языка / У. Соммер. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 256 с.

7. Борисов, И. И. Имитационное моделирование мехатронных систем : учеб. пособие / И. И. Борисов, С. А. Колюбин. – СПб. : Санкт-Петербургский нац. исслед. ун-т информационных технологий, механики и оптики, 2020. – 103 с.

8. Система управления брагоректификационной установкой / В. А. Кербель, М. А. Ложкин, И. А. Елизаров [и др.] // Управление большими системами : материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых, 10 – 13 сентября 2019 г., Тамбов. – Тамбов, 2019. – С. 135 – 141.

9. Елизаров, И. А. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры : учеб. пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе. – Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2021. – 236 с.

10. Антонов, Н. М. Оптимизация конструктивных параметров измельчителя плодов и корнеплодов / Н. М. Антонов, Н. И. Лебедь, А. К. Мамахай // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 3 (43). – С. 231 – 238.

Modeling the Control System of an Automated Electric Drive for a Fruit and Vegetable Chopper in a Virtual Simulation Environment

N. I. Lebed

*Department of Power Supply and Energy Systems, nik8872@yandex.ru;
Volgograd State Agrarian University, Volgograd, Russia*

Keywords: automation; automated electric drive; grinder; microcontrollers; knife machine; fruit and vegetable products; cutting.

Abstract: A grinder for fruit and vegetable products has been developed, the advantages of which include high productivity with minimal energy consumption. A system of microprocessor control of the grinder based on the hardware platform of the programmable microcontroller ATmega 328 is proposed.

The control system of an automated grinder electric drive was modeled in a cloud environment using FBD and C++ programming languages. A list of components of the electrical circuit of the control system was selected, a graphical diagram of the program code was built, and a list of tags (inputs, outputs, variables) was also shown. The system was tested for operability in the virtual simulation cloud-debugging environment Autodesk Circuitson on Tinkercad, which proved its operability and efficiency.

References

1. Al-Maidi A.A.H., Brusenkov A.V., Kapustin V.P., Rodionov Yu.V. Analysis of Root Crops Preparation System, *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 2021, no. 16, pp. 1345-1350.

2. Antonov N.M., Iskusnov Yu.V., Lebed' N.I. [Results of experimental studies to determine the cutting forces of fruits and root crops], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshye professional'noye obrazovaniye* [News of the Nizhnevolzhsky agro-university complex: Science and higher professional education], 2012, no. 2 (26), pp. 137-141. (In Russ.)

3. Antonov N.M., Lebed' N.I., Maloletov A.V., Mamakhay A.K. *Izmel'chitel' plodoovoshchnoy produktsii* [Fruit and vegetable grinder], Russian Federation, 2017, Utility model 174962. (In Russ.)

4. Antonov N.M., Lebed N.I., Makarov A.M. Energetic Calculation of an Apple Chopper with Zigzagging Knife Location in the Cutting Unit, *Journal of Food Process Engineering*, 2017, vol. 40, issue 2, p. e12352, doi: 10.1111/jfpe.12352

5. Lebed N.I., Antonova N.M., Rusakova G.G. Investigation of Process of Cutting Fruit and Vegetable Raw Materials Into Slices Using Rotary Chopper, *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2019*, 25 - 29 March, 2019, Sochi, Springer, Cham., 2020, pp. 451-459, doi: 10.1007/978-3-030-22041-9_49

6. Sommer, U. *Programmirovaniye mikrokontrollernykh plat Arduino/Freeduino* [Programming microcontroller boards Arduino/Freeduino], St. Petersburg: BKHV-Peterburg, 2012, 256 p. (In Russ.)

7. Borisov I.I., Kolyubin S.A. *Imitatsionnoye modelirovaniye mekhatronnykh sistem: uchebnoye posobiye* [Simulation modeling of mechatronic systems: textbook], St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki, 2020, 103 p. (In Russ.)

8. Kerbel' V.A., Lozhkin M.A., Yelizarov I.A., Nazarov V.N., Tret'yakov A.A. *Upravleniye bol'shimi sistemami* [Management of large systems], *Proceedings of the XVI All-Russian school-conference of young scientists*, 10 - 13 September, 2019, Tambov, 2019, pp. 135-141. (In Russ.)

9. Yelizarov I.A., Martem'yanov Yu.F., Skhirtladze A.G. *Tekhnicheskiye sredstva avtomatizatsii. Programmno-tekhnicheskiye komplekсы i kontrollery: uchebnoye posobiye* [Technical means of automation. Software and hardware complexes and controllers: a tutorial], Stary Oskol: OOO "Tonkiye naukoymkiye tekhnologii", 2021, 236 p. (In Russ.)

10. Antonov N.M., Lebed' N.I., Mamakhay A.K. [Optimization of the design parameters of the grinder of fruits and root crops], *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshye professional'noye obrazovaniye* [News of the Nizhnevolzhsky agro-university complex: Science and higher professional education], 2016, no. 3 (43), pp. 231-238. (In Russ.)

Simulation des automatisierten Steuerungssystems des Elektroantriebs für Obst- und Gemüsehacker in einer virtuellen Simulationsumgebung

Zusammenfassung: Es ist ein Zerkleinerer für Obst- und Gemüseprodukte entwickelt, zu dessen Vorteilen eine hohe Produktivität bei minimalem Energieverbrauch gehört. Es ist ein System zur Mikroprozessorsteuerung des Häckslers vorgeschlagen, das auf der Hardwareplattform des programmierbaren Mikrocontrollers ATmega 328 basiert.

Die Steuerung des automatisierten Elektroantriebs des Häckslers ist in einer Cloud-Umgebung mit FBD-Programmiersprachen und C++ modelliert. Eine Liste der Komponenten des elektrischen Schaltkreises des Steuersystems ist ausgewählt, ein grafisches Diagramm des Programmcodes ist erstellt und eine Liste von Tags (Eingänge, Ausgänge, Variablen) ist ebenfalls angezeigt. Das System ist in der virtuellen Simulations-Cloud-Debugging-Umgebung Autodesk Circuitson auf Tinkercad auf Funktionsfähigkeit getestet, was seine Funktionsfähigkeit und Effizienz bewiesen hat.

Simulation du système de contrôle du broyeur électrique automatisé de fruits dans un environnement de simulation virtuel

Résumé: Est élaboré un broyeur de fruits dont les avantages incluent une productivité élevée avec des coûts énergétiques minimes. Est proposé le système de contrôle par microprocesseur du broyeur à la base de la plate-forme matérielle du micro-contrôleur programmable Atmega 328.

Dans un environnement cloud, est modélisé le système de contrôle du mécanisme de commande électrique automatisé utilisant les langages de programmation FBD et C++. Est choisi une liste des composants du circuit électrique du système de contrôle, est montré un schéma graphique du code du programme (entrées, sorties, variables). Est effectué le contrôle du système dans l'environnement de simulation de cloud virtuel d'Autodesk Circuitson on Tinkercad qui a prouvé son capacité et son efficacité.

Автор: *Лебедь Никита Игоревич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и энергетические системы», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград, Россия.

АНАЛИЗ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

А. Н. Анненков, О. В. Белоусова

*Кафедра «Электроэнергетика», sova.ol@mail.ru;
АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий»,
Воронеж, Россия*

Ключевые слова: автоматическая установка нанесения фоторезиста; параметры технологического процесса; рекомендации по проектированию; функциональные технологические модули.

Аннотация: Показано, что обеспечение выпуска продукции микро- и радиоэлектроники с качественно более высокими технологическими нормами возможно за счет разработки автоматизированных установок, выполненных из совокупности ряда функциональных модулей, полностью закрывающих каждую технологическую операцию фотолитографии, размещенных в контролируемой газовой среде; выполнен анализ развития технологии и оборудования фотолитографии, определены требования к параметрам слоя фоторезиста и технологическим режимам для его формирования, дано описание базового технологического процесса и определено влияние различных параметров на него, разработана общая компоновка автоматизированной установки нанесения фоторезиста, а также выработаны практические рекомендации по проектированию данного оборудования.

Введение

Развитие фотолитографического оборудования фактически определяет прогресс на протяжении всего времени существования микро- и радиоэлектроники. Основной характеристикой процесса фотолитографии является разрешающая способность, то есть способность разделять субмикронные, а в последние годы уже нанометровые элементы топологического рельефа. Минимальный размер между элементами топологического слоя на обрабатываемой подложке, называемый топологическим параметром, определяет предельно малые размеры создаваемой элементной базы. Другими словами, технологии фотолитографии и оборудование, на которых они реализованы, в значительной степени определяют технологический и технический прогресс в важнейших производствах.

Фотолитография основана на применении фоторезистов, чувствительных к потоку излучения, которые способны переходить в устойчивое к действию травителей состояние (негативные) или разрушаться (позитивные) [1]. Для получения интегральных микросхем с элементами размером менее микрона, тем более на пластинах большого диаметра, фоторезист должен отличаться хорошей адгезией, давать равномерное покрытие и не содержать загрязнений. Еще одной немаловажной особенностью малых элементов микросхемы является высокая чувствительность к малейшим частицам, загрязняющим поверхность пластины и способным привести ее в негодность. К этому необходимо добавить слежение за техническим процессом нанесения, без чего невозможно получить требуемое качество пленок в течение достаточно продолжительного времени [1, 2].

Основным технологическим оборудованием фотолитографии являются установки совмещения и экспонирования. Остальное технологическое оборудование также является важным, тем не менее, существенно отличаясь по степени сложности. В первую очередь это установки нанесения и проявления фоторезистов; жидкостного химического травления и очистки; сухого плазмохимического травления и очистки и некоторое другое оборудование.

Важной особенностью нанометровой фотолитографии является высокая чувствительность к малейшим частицам, загрязняющим поверхность пластины и способным привести к браку в ходе ее обработки. Наиболее реальный выход из создавшейся ситуации – использование стандартного механического интерфейса, при котором риск загрязнений можно снизить благодаря объединению серии различных операций обработки и транспортировки подложек в единую кластерную систему с контролируемой газовой средой, тем самым повысив выход годных изделий.

На российском рынке оборудования для фотолитографии отсутствует оборудование на кластерной платформе, отвечающее мировому уровню. Подавляющее большинство отечественного фотолитографического оборудования технически соответствует экспериментальному уровню для проведения разработок, оно характеризуется слабыми техническими параметрами, низким уровнем автоматизации.

С точки зрения окупаемости и удовлетворения ряда потребителей в современном высокотехнологичном оборудовании, сегодня актуальна задача разработки автоматизированных установок, выполненных из совокупности ряда функциональных модулей, полностью закрывающих каждую технологическую операцию фотолитографии, размещенных в контролируемой газовой среде. Данный подход отражен в разработках конструкторского бюро технологических машин г. Воронежа (ВКБТМ), входящего в инженерно-технический центр АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий» [3]. В частности, впервые в РФ именно в ВКБТМ разработана автоматизированная установка нанесения фоторезиста в кластерном конструктивном исполнении (с единым объемом контролируемой газовой среды).

В дальнейшем в течение более 10 лет конструкция основных технологических модулей и программное обеспечение системы управления постоянно совершенствовались. За это время на основании государственных контрактов и прямых НИОКР была поставлена целая гамма различных модификаций указанных установок известным предприятиям РФ, нуждающимся в современном высокотехнологичном оборудовании, среди которых можно назвать такие, как ОАО «Лианозовский электромеханический завод» (Лианозовские радары), г. Москва; Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова, г. Санкт-Петербург; АО «Государственный оптический институт им. Вавилова», г. Санкт-Петербург и ряд др.

Требования к параметрам слоя фоторезиста и технологическим режимам для его формирования

Для обеспечения требований технологии проекционной фотолитографии в производстве сверхбольших интегральных схем (СБИС) на пластинах диаметром 150 и 200 мм технологического уровня 65 нм и ниже, необходимо разработать технологический процесс формирования пленок фоторезистов толщиной (0,03...3) мкм и более 3 мкм [4].

При этом должен выполняться ряд требований.

Поверхность пластины должна быть полностью покрыта однородным слоем фоторезиста.

1. Разброс толщин фоторезиста по поверхности пластин
 - не более $\pm 0,0025$ мкм (3σ) для пленок толщиной (0,03...3) мкм;
 - не более $\pm 0,025$ мкм (3σ) для пленок толщиной свыше 3 мкм.

2. Равномерность отмывки краевого валика должна быть менее $\pm 0,3$ мм.
3. Привносимая дефектность операции нанесения по лицевой стороне менее $\pm 0,0003$ частицы/мм² или менее 10 частиц размером более 0,2 мкм.

В автоматической установке нанесения фоторезиста предъявляются высокие требования к однородности толщины нанесения фоторезистивных масок. При нанесении фоторезиста методом центрифугирования:

- скорость вращения центрифуги, рад/с – $1 \dots 1000$;
- равномерность скорости ротора центрифуги, рад/с – $0,1$;
- диапазон регулирования ускорения центрифуги, рад/с² – $(20 \dots 50) \times 10^3$;
- коэффициент линейности динамической характеристики $0,99$;
- точность подачи дозы фоторезиста меньше ± 3 %.

Кроме того требуется управлять внешними факторами, влияющими на однородность толщины слоя фоторезиста [5, 6], к которым относится поддержание климатических условий (температуры окружающей среды, влажности, воздушного потока).

Условия окружающей среды для формирования фоторезистивных масок:

- чистое помещение;
- температура $T = 20 \dots 25$ °С;
- влажность $H = 40 - 50$ %;
- изменение температуры ± 1 °/10 мин;
- изменение влажности ± 1 %/10 мин;
- диапазон изменений $T \pm 1$ °С, $H \pm 5$ %.

Особые требования предъявляются к горячим плитам для термообработки пластин, которые могут нести несколько различных функций и быть ориентированы на различные процессы.

Для этого необходимо обеспечить управление граничными значениями температур поверхностей различных плит в интервалах, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Диапазоны граничных значений температур поверхностей различных плит

Интервал температуры T , °С	Разброс, менее °С
<i>Низкотемпературная горячая плита (ЛНР)</i>	
50,0...90	0,5
90,1...120	0,7
120,1...150	1,0
150,1...200	1,4
<i>Высокотемпературная горячая плита (ННР)</i>	
50,0...120	1,0
120,1...150	1,5
150,1...200	2,0
200,1...300	3,0
300,1...350	5,0
<i>Прецизионная горячая плита (РНР)</i>	
50,0...120	0,2
120,1...150	0,3
150,1...200	0,5
200,1...250	0,6

Для снижения дефектности и проведения последующих операций фотолитографии необходимо обеспечить функцию удаления краевого валика с управляемыми значениями ширины. Для уменьшения дефектности от процессов нанесения и проявления по обратной стороне пластины должна использоваться функция отмывки обратной стороны растворителем.

Описание базового технологического процесса на автоматизированной установке нанесения фоторезиста

Фоторезист подается на неподвижную пластину либо на медленно вращающуюся; растекается на пластине под действием центробежных сил. Когда вся поверхность пластины покрывается резистом, скорость вращения пластины увеличивается.

Большая часть резиста сбрасывается с поверхности пластины в чашу, находящуюся под ней. Предусмотрены специальные системы для отвода жидкого резиста и его паров. На поверхности пластины образуется равномерная по толщине пленка светочувствительного полимера. Резист удаляется и с торца пластины до извлечения ее из модуля.

На качество пленки фоторезиста влияет тип сопла и применяемый метод удержания резиста в трубке. После выдачи резиста оставшаяся в трубке жидкость должна быть удержана. На равномерность пленки определенное влияние оказывают колебания скорости вращения.

Требуемая для получения СБИС равномерность пленок резиста может быть достигнута при наименьших колебаниях скорости. На равномерность пленок существенно влияет ускорение. При увеличении ускорения удается получить более тонкие и максимально равномерные пленки по сравнению с меньшим ускорением при одинаковой конечной скорости.

Для получения на пластинах диаметром 150 и 200 мм пленок с разбросом $\pm 20 \text{ \AA}$, необходимо иметь хорошо работающую вытяжную систему. Растворитель быстро испаряется с поверхности пластины, поэтому если поток воздуха над пластиной не равномерный и не постоянный, то из-за колебаний скорости потока имеют место колебания скорости испарения резиста, что в свою очередь вызывает неравномерность покрытия. Удаление избыточного резиста, загрязняющего все перечисленные части пластины, осуществляется сразу после завершения операции центрифугирования. Резист удаляется на этапе замедления скорости (торможения). Метод удаления – растворение резиста в химических веществах: распылением вещества на обратную сторону пластины достигается его смыв в результате действия капиллярных сил.

Общая компоновка и характеристики автоматической установки нанесения фоторезиста

В состав установки входят модули центрифугирования, инструмента дозирования фоторезиста, подогрева фоторезиста, термообработки, термостабилизации, загрузки/выгрузки пластин; транспортный модуль-манипулятор, а также система управления установкой и защитный бокс. На рисунке 1 показана схема компоновки модулей установки.

Потребительские и технические характеристики установки приведены на сайте ВКБТМ [3]. Они не уступают, а по некоторым параметрам превосходят зарубежные аналоги данной продукции [7]. Система управления установкой – на базе промышленной IBM PC.

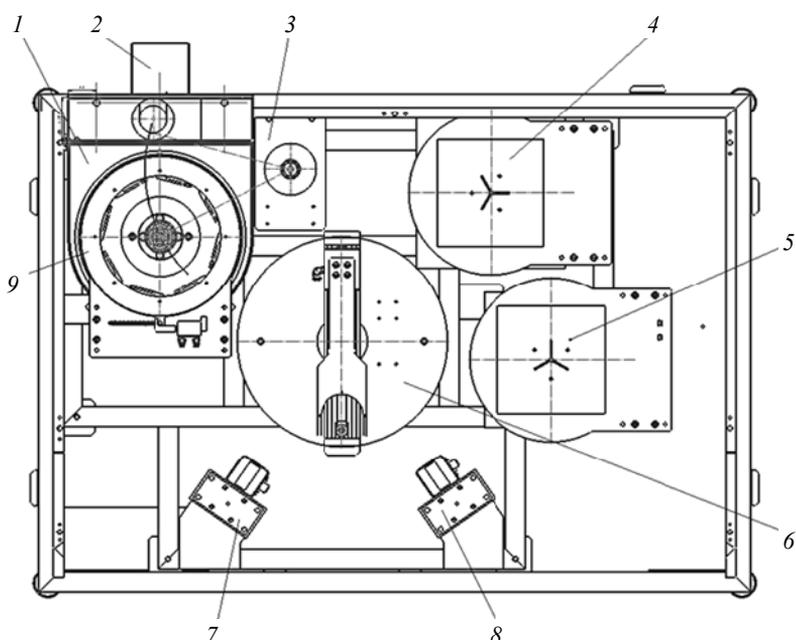


Рис. 1. Схема компоновки модулей установки:

1 – модуль центрифуги; 2 – вытяжной патрубок; 3 – модуль инструмента; 4 – модуль термической сушки (задубливание); 5 – модуль термостабилизации; 6 – транспортный модуль; 7, 8 – загрузочные модули (соответственно заготовки и готовые подложки); 9 – механизм центрирования

Рекомендации по проектированию автоматизированных установок нанесения фоторезиста в кластерном конструктивном исполнении

Важным моментом является скорость выдачи дозы фоторезиста. Наилучшие результаты удастся получить при выдаче резиста без разбрызгивания. При быстрой выдаче скапливается, что резист, попавший на пластину в самом начале цикла, начинает засыхать. Фоторезист в завершающей части подаваемой дозы в определенной мере подсыхает. В результате этого в центре обычно образуется либо выпуклость, либо блюдце (в зависимости от толщины слоя).

На качество пленки фоторезиста влияют также тип сопла и применяемый метод удержания резиста в трубке. После выдачи резиста оставшаяся в трубке жидкость должна быть удержана. Если диаметр отверстия слишком велик, а для отсоса используется слишком большое давление, то в трубке останется тонкая пленка резиста, которая затем засохнет и при очередной подаче дозы попадет на пластину. Если же давление недостаточно, то резист будет падать на поверхность пластины и во время центрифугирования. Избежать это можно, используя перемещающиеся сопла с очень малыми отверстиями, которые к тому же еще и скошены.

Фоторезист растекается на пластине под действием центробежных сил. Когда вся поверхность пластины покрывается резистом, скорость вращения пластины увеличивается с заданным ускорением.

На равномерность пленок существенно влияет ускорение центрифуги и его постоянство. Можно утверждать, что при увеличении ускорения удастся получить более тонкие и равномерные пленки, по сравнению с меньшим ускорением при одинаковой конечной скорости. Также на равномерность пленки определенное влияние оказывают и колебания скорости вращения. Требуемая для получения СБИС равномерность пленок резиста может быть достигнута при колебаниях скорости $\geq \pm 1$ об/мин.

Большая часть резиста сбрасывается с поверхности пластины в чашу, находящуюся под пластиной. Предусмотрены специальные системы для отвода жидкого резиста и его паров. На поверхности пластины образуется равномерная по толщине пленка светочувствительного полимера.

Равномерность нанесения пленки фоторезиста зависит и от формы чаши под пластиной и вокруг нее. Это в значительной степени вопрос аэродинамики. Даже дефлекторное кольцо (кольцо, не позволяющее резисту каким-либо образом вернуться из слива), расположенное в нижней части чаши, может изменить характер истока потока воздуха, если оно установлено не параллельно плоскости пластины, что способно нарушить равномерность потока воздуха над пластиной и привести к колебаниям толщины пленки. Если же скорость пропускаемого над пластиной воздуха контролируется, чаша имеет оптимальную форму, а скорость вращения центрифуги не изменяется, то колебания толщины слоя не превышает $\pm 10 \text{ \AA}$.

Равномерность пленки зависит и от горизонтальности центрифуги. Если установка хотя бы немного наклонена, пластина будет также наклонена, и резист будет иметь возможность стекать на какую-то одну сторону. Обычно оборудование устанавливается правильно, но если по какой-либо причине оно будет смещено, то идет брак.

Важную роль играет центровка пластины. При недостаточно хорошо отцентрированной пластине возникают биения, влияющие на поток воздуха, работу вытяжки и приводящие к сокращению ресурса работы серводвигателя центрифуги. Пластина должна быть хорошо отцентрирована, только тогда можно ожидать воспроизводимости результатов.

В ходе нанесения резиста поток воздуха и скорость потока выхлопных газов контролируются в целях управления процессом испарения растворителя из фоторезиста, так как от этого зависят свойства формируемого слоя, при этом иногда контролируют парциальное давление паров растворителя вблизи поверхности подложки, регулируя в зависимости от него поток выхлопных газов и/или вводя растворитель вблизи поверхности подложки.

Во время нанесения фоторезиста необходимо контролировать влажность. Влага влияет не только на адгезию фоторезиста, но и на сам резист. Позитивный резист наносится на увлажненную поверхность, но при избытке влаги адгезия может недопустимо снизиться. В целом можно утверждать, что влажность менее 50 % наиболее подходящая.

Следует обращать внимание на вытяжную систему. Если резист отводится недостаточно энергично в слив, то его капли могут вновь рикошетом попасть на пластину с нежелательным эффектом. Но это только часть работы вытяжки. Для получения на пластинах диаметром 150 и 200 мм пленок с разбросом $\pm 20 \text{ \AA}$, необходимо иметь высокопроизводительную вытяжную систему.

Растворитель быстро испаряется с поверхности пластины, поэтому если поток воздуха над пластиной не равномерный и не постоянный, то из-за колебаний скорости потока имеют место колебания скорости испарения резиста, что тоже может привести к неравномерности покрытия. Равномерность растет при снижении скорости потока воздуха до достижения такого ее значения, при котором равномерность толщины пленки становится оптимальной. При дальнейшем снижении скорости потока воздуха равномерность толщины пленки вновь ухудшается.

На равномерность влияют колебания давления воздуха в рабочем помещении. Так, если во время центрифугирования будет открыта дверь в помещение с меньшим давлением, то, естественно, упадет давление и в чистой комнате. Если корпус установки недостаточно герметичен, то давление упадет и на центрифуге, растворитель начнет испаряться с другой скоростью и толщина пленки фоторези-

ста изменится. Существуют специальные вентили, которые в реальном масштабе времени компенсируют такие изменения давления, поддерживая его вблизи центрифуги постоянным.

Одним из приемов улучшения качества наносимой пленки является снижение испарения и повышение таким образом равномерности. Для этого можно отключать вытяжку во время подачи резиста и включать ее во время центрифугирования.

Как правило, резист удаляется с торца пластины до извлечения ее из модуля. Обработка краевого валика может осуществляться при помощи специально разработанных для этого блоков. Блоки такого типа изготавливает фирма USHIO America, Inc. Cypress, Calif. Другие производители используют термин Wafer Edge Exposure (WEE) (экспонирование края пластины).

Мнение о необходимости очистки торца пластины разбилось на две противоположные точки зрения. Одни считают, что это необходимо делать для обеспечения максимального процента выхода. Другие – только в случае крайней необходимости. Если объединить вопросы, относящиеся к удалению резиста с обратной стороны пластины, с торца и примерно на расстоянии 1 мм от края пластины, то удаление избыточного резиста, загрязняющего все перечисленные части пластины, осуществляется сразу после завершения операции центрифугирования. Резист удаляется на этапе торможения центрифуги. Метод удаления – растворение резиста в химических веществах. Основная цель всех этих действий – устранение загрязнения. Во время центрифугирования фоторезист затекает на край и под пластину. Затем он засыхает и отрывается на горячих плитах, прилипает к установкам экспонирования и т.д. Распылением вещества на обратную сторону пластины достигается распространение его и вверх в результате действия капиллярных сил. Степень обработки верхней части можно контролировать скоростью вращения пластин. Чем ниже скорость, тем сильнее внедрения вещества в резист. Здесь важно подобрать скорость вращения, которой соответствует оптимальное удаление фоторезиста.

Другой метод, приводящий к хорошим результатам, состоит в том, что на первом этапе пластина вращается с небольшим ускорением до достижения определенной скорости, при которой сбрасывается большая часть резиста. На втором этапе, при разгоне с большим ускорением, сбрасываются остатки резиста и сглаживаются образовавшиеся дефекты на краях пластины. Так удается получить очень ровный край резиста на краю пластины.

На практике имеются установки с фронтальным удалением валика фоторезиста. Сложилось мнение, что этот метод точнее и аккуратнее. Для удаления резиста используется очень тонкая струя растворителя. Такой метод хорош тем, что внедрение растворителя в резист может идти на любую глубину. Известен также метод с фронтальным и тыльным удалением резиста. В них тыльная система очищает обратную сторону, торцы и верхние части, а фронтальная система используется для очистки и придания стенкам отвесности. Но даже при использовании всех этих методов остаются проблемы, которые могут отразиться на работе транспортных систем.

Несмотря на то что большая часть растворителя удаляется на этапе сушки на центрифуге при повышенных оборотах, досушивание сформированной пленки при повышенных температурах гарантирует полное удаление растворителя из резиста и (в некоторых случаях) улучшает адгезию резистивного слоя к нижнему антиотражающему покрытию. Температура на данном этапе зависит от типа резиста, но обычно не более 250 °С. Время операции зависит от температуры и, как правило, не превышает 60 с.

Охлаждение фоторезиста – важный этап для стабильности технического процесса, так как температурно-временной профиль влияет на свойства пленки резиста. Температура обычно поддерживается близкой к температуре окружаю-

шей среды. Время термостабилизации будет зависеть от температуры подложки после выхода с предыдущей позиции, но обычно не превышает 30 с.

Особенностью малых элементов чипа является высокая чувствительность даже к малейшим частицам, загрязняющим поверхность пластины и способным привести ее в негодность. Наиболее реальный выход из создавшейся ситуации – использование стандартного механического интерфейса. Риск загрязнений можно снизить благодаря объединению серии различных операций обработки и транспортировки в единую кластерную систему, тем самым повысив выход годных изделий.

Избежать загрязнений можно только при использовании чистого оборудования, хорошо контролируемого технического процесса, а также чистых фоторезистов и рабочей среды.

Федеральный стандарт США 209E определяет «запыленность» рабочих помещений. Номер класса чистоты помещения – число частиц размером 0,5 мкм в 1 кубическом футе (0,3048 м). В 1 м³ воздуха комнаты класса 10 – не более 300 частиц, а класса 100 – не более 3600 [8].

Для технологии 180 нм приемлемым является обеспечение класса чистоты ISO 1 внутри оборудования фотолитографии. По мере снижения размеров элементов загрязнения становятся все более критичным моментом производства. В субмикронных технологиях частицы сравнимых и даже больших размеров способны легко вызвать повреждения схем. Частицы, присутствующие в фоторезисте, часто вымываются во время проявления, образуя проколы в рисунках.

Чистый резист невозможен без чистых исходных материалов. Так, японская полупроводниковая промышленность достигла больших успехов в очистке резистов в сравнении с другими производителями. Их требования к содержанию ионов металлов в резисте значительно жестче.

Получение очень чистого состава требует применения многочисленных дополнительных операций очистки, а это влечет за собой лишние расходы, которые, в конечном счете, отражаются как на цене фоторезиста, так и цене оборудования для его нанесения.

Кроме того, сам резист способен привести к нежелательным загрязнениям. Выяснилось, что места хранения резиста, находившиеся под центрифугами, являются источниками загрязнений. Фоторезист часто разбрызгивался во время смены бутылей, что приводило к скоплению в таких местах пыли. Засохший резист вместе с пылью попадает в емкости с резистом.

Как правило, фоторезист подается по гибким трубкам, которые часто свиваются в емкостях с резистом. Если при смене емкостей в трубки подачи фоторезиста заходит воздух, это, в конечном итоге, приводит к ухудшению качества нанесения. К этому необходимо добавить засыхание резиста на поверхности трубок в полупустых емкостях. Для борьбы с такими нежелательными явлениями, разработаны специальные устройства извлечения фоторезиста.

Важную роль играет оборудование. В настоящее время разработчики и изготовители оборудования для максимального уменьшения генерируемых загрязнений ведут изготовление машин в чистых помещениях, причем количество движущихся частей стремятся свести к минимуму (так как они способны привести к концентрации частиц). Если без вращающихся или движущихся деталей обойтись нельзя, то они помещаются под поверхность пластин или изолируются так, чтобы генерируемые ими загрязнения не могли попасть на пластину.

Заметна тенденция к замене ременных устройств механизмами подъема и переноса пластин. Ремни могут генерировать статическое электричество, которое в свою очередь способно «захватить» заряженную частицу на поверхность пластины.

Заключение

На основании десятилетнего опыта проектирования, наладки, испытаний, гарантийного и постгарантийного обслуживания широкого ряда конструктивных исполнений автоматизированных установок нанесения фоторезиста в работе сформулированы подробные рекомендации по проектированию установок данного типа, имеющие, по мнению авторов, большую практическую ценность.

В автоматизированной установке нанесения фоторезиста в кластерном конструктивном исполнении предъявляются высокие требования к однородности толщины нанесения фоторезистивных масок, для чего следует управлять внешними факторами, влияющими на однородность толщины слоя фоторезиста. К ним относится поддержание климатических условий (температуры окружающей среды, влажности, воздушного потока).

Особые требования предъявляются к горячим плитам для термообработки пластин, которые могут нести несколько функций и быть ориентированы на различные процессы. Необходим контроль над временем и температурой сушки пленки фоторезиста. При недостаточной температуре и/или времени сушки в пленке сохраняется много остаточного растворителя, что ухудшает стойкость пленки в проявителе. При избыточной температуре и/или времени сушки происходит избыточный термический распад светочувствительного продукта, что также ухудшает разрешение и стойкость пленки.

Для снижения дефектности и проведения последующих операций фотолитографии в установке рекомендуется использовать функцию удаления краевого валика с управляемыми значениями ширины. Для снижения дефектности от процессов нанесения и проявления по обратной стороне пластины в установке следует использовать функцию отмывки обратной стороны на нанесении растворителем.

Автоматизированная установка нанесения фоторезиста в кластерном конструктивном исполнении имеет высокие потребительские и технические характеристики, в частности ускорение центрифуги $(4...6) \times 10^3$ рад/с²; коэффициент линейности скоростной характеристики 0,999 о.е.; среднее время наработки установки на отказ 10 000 ч.

В механизме подачи вакуума на модуль центрифуги использованы специальные уплотнения. В данных уплотнениях рабочим элементом является кольцо с бортиком из коксонаполненного фторопласта с минимальным контактом с валом. Установив два зеркально расположенных уплотнения, удалось значительно снизить трение без существенной потери вакуума в системе ротора, что позволяет работать на установке при выпуске крупной серии продукции в автоматическом режиме без остановки на охлаждение.

В составе транспортного модуля использована оригинальная конструкция манипулятора. Манипулятор содержит вращающееся звено, приводимое в движение электродвигателем, и расположенное на нем звено линейного перемещения с кинематической связью с приводным двигателем посредством зубчатого ремня. Транспортный модуль-манипулятор состоит из опорной плиты, которая крепится непосредственно к каркасу установки. Под плитой на опоре установлен серводвигатель, который передает вращение манипулятору при помощи шестеренчатой передачи. На манипуляторе установлен рабочий орган – схват вилкообразной формы, удобный для транспортировки и позиционирования полупроводниковых пластин, который может горизонтально перемещаться с помощью второго серводвигателя через зубчатую ременную передачу. На схвате расположен закрытый канал, выходящий к трем отверстиям, через которые подается вакуум для удержания подложки. Снизу на плите установлены датчики и концевой выключатель, связанные с серводвигателем, отвечающим за поворот манипулятора и опреде-

ляющие начальную точку положения манипулятора со схватом в пространстве. Программное обеспечение позволяет поворачивать манипулятор на заданный угол, выдвигать схват на заданное расстояние, включать или выключать вакуум. Выбранная конструкция манипулятора обеспечивает механизму наработку на отказ не менее 10 000 ч.

В резистивных нагревателях с тепловой подачей от проволоки высокого сопротивления с миканитовой (или слюдяной) изоляцией обеспечена надежная электрическая изоляция при высоких рабочих температурах и, одновременно, высокоэффективная теплопередача, то есть гарантирован повышенный ресурс работы. В установке применена высокоточная система дозирования компании Nordson, которая включает в себя пневмоклапан и микроконтроллер.

Список литературы

1. Фавини, К. Выбор фоторезиста для различных технологий. – Текст : электронный / Ф. Карло, EIGA Europe // Контракт Электроника. – URL : <https://www.contractelectronica.ru/articles/12-pechatnye-platy/vybor-fotorezista-dlya-razlichnykh-tehnologij-proizvodstva-pechatnykh-plat> (дата обращения: 15.02.2022).
2. Зеленцов, С. В. Современная фотолитография / С. В. Зеленцов, Н. В. Зеленцова. – Н. Новгород : Изд-во Нижегородского гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского, 2006. – 56 с.
3. Установка нанесения фоторезиста автоматическая // Конструкторское бюро технологических машин (КБТМ). – URL : <http://vkbtm.ru/catalog/cpf150a> (дата обращения: 15.02.2022).
4. Tyona, M. D. A Comprehensive Study of Spin Coating as a thin Film Deposition Technique and Spin Coating Equipment / M. D. Tyona // *Advances in Materials Research*. – 2013. – Vol. 2, No. 4. – P. 181 – 193. doi: 10.12989/amr.2013.2.4.181
5. Mammeri, F. Nanostructured Flexible PVDF and Fluoropolymer-Based Hybrid Films / F. Mammeri // *Frontiers of Nanoscience*. – 2019. – Vol. 14. – P. 67 – 101. doi: 10.1016/B978-0-08-102572-7.00003-9
6. Huerta, H. Spin-Coater Machine Control Via Passivity with Sliding Modes / H. Huerta, N. Vazquez // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 9760 – 9769. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2965188
7. Полуавтоматическая установка нанесения фоторезиста НФ-150П. Оборудование фотолитографии. – Текст : электронный // Сайт НИИПМ. – URL : <http://vniiipm.ru/ru/produkcija/product/view/3/4> (дата обращения: 15.02.2022).
8. Bearda, T. Overview of Wafer Contamination and Defectivity. Part I: Introduction and Overview / T. Bearda, P. W. Mertens, S. P. Beaudoin // *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology Book*. – William Andrew, 2008. – P. 93 – 164. doi: 10.1016/B978-081551554-8.50005-7

Analysis of an Automated Installation for Applying Photoresist as a Control Object

A. N. Annenkov, O. V. Belousova

*Department of Electric Power Engineering, sova.ol@mail.ru;
International Institute of Computer Technology, Voronezh, Russia*

Keywords: automatic installation for applying photoresist; technological process parameters; design recommendations; functional technological modules.

Abstract: The production of micro- and radioelectronics products with qualitatively higher technological standards is possible through the development of automated installations made from a combination of a number of functional modules that completely cover each technological operation of photolithography, placed in a controlled gas environment; the analysis of the development of technology and equipment for photolithography was carried out, the requirements for parameters of the photoresist layer and technological modes for its formation were determined, the description of the basic technological process was given and the influence of various parameters on it was determined, the general layout of the automated installation for applying photoresist was developed, and practical recommendations for the design of this equipment were developed.

References

1. <https://www.contractelectronica.ru/articles/12-pechatnye-platy/vybor-fotorezista-dlya-razlichnykh-tehnologij-proizvodstva-pechatnykh-plat> (accessed 15 February 2022).
2. Zelentsov S.V., Zelentsova N.V. *Sovremennaya fotolitografiya* [Modern photolithography], Nizhny Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo, 2006, 56 p. (In Russ.)
3. <http://vkbtm.ru/catalog/cpf150a> (accessed 15 February 2022).
4. Tyona M.D. A Comprehensive Study of Spin Coating as a thin Film Deposition Technique and Spin Coating Equipment, *Advances in Materials Research*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 181-193, doi: 10.12989/amr.2013.2.4.181
5. Mammeri F. Nanostructured Flexible PVDF and Fluoropolymer-Based Hybrid Films, *Frontiers of Nanoscience*, 2019, vol. 14, pp. 67-101, doi: 10.1016/B978-0-08-102572-7.00003-9
6. Huerta H., Vazquez N. Spin-Coater Machine Control Via Passivity with Sliding Modes, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 9760-9769, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2965188
7. <http://vniipm.ru/ru/produkcija/product/view/3/4> (accessed 15 February 2022).
8. Bearda T., Mertens P.W., Beaudoin S.P. *Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology Book*, William Andrew, 2008, pp. 93-164, doi: 10.1016/B978-081551554-8.50005-7

Analyse der automatisierten Installation des Aufbringens des Fotolacks als Kontrollobjektes

Zusammenfassung: Es ist gezeigt, dass die Bereitstellung von Mikro- und Funkelektronik mit qualitativ höheren technologischen Standards durch die Entwicklung automatisierter Anlagen aufgrund der Ausführung aus einer Reihe von funktionellen Modulen, die jeden technologischen Vorgang der Fotolithographie vollständig abdecken und in einer kontrollierten Gasatmosphäre platziert sind, möglich ist. Es ist eine Analyse der Entwicklung von Technologie und Ausrüstung für die Fotolithografie durchgeführt, die Anforderungen an die Parameter der Fotolackschicht und die technologischen Modi für ihre Bildung sind bestimmt, die Beschreibung des grundlegenden technologischen Prozesses und des Einflusses verschiedener Parameter darauf ist gegeben und der Einfluss von verschiedenen Parametern auf ihn ist festgelegt, das allgemeine Layout der automatisierten Anlage zum Aufbringen von Fotolack ist entwickelt und praktische Empfehlungen für die Gestaltung dieser Ausrüstung sind gegeben.

Analyse de l'installation automatisée de l'application de photorésist en tant qu'objet de contrôle

Résumé: Est montré que l'assurance du lancement de la production de la micro-électronique et de la radio-électronique avec des normes technologiques qualitativement plus élevées est possible grâce à l'élaboration des installations automatisées réalisées à partir de l'ensemble des modules fonctionnels qui forment entièrement chaque technologie de l'opération de photolithographie, placés dans le milieu gazeux contrôlé; est effectuée l'analyse du développement de la technologie et de l'équipement de la photolithographie; sont définis les paramètres de la couche de résine photosensible et les régimes technologiques de la formation. Est donnée une description de base des processus; est définie l'influence de différents paramètres. Est élaborée la disposition générale d'une installation automatisée et sont également formulés des recommandations pratiques sur la conception de l'équipement.

Авторы: *Анненков Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе; *Белусова Олеся Владимировна* – старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика», АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий», Воронеж, Россия.

МЕТОД АДАПТАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ АМПЛИТУДЫ И ТЕМБРА СУБЪЕКТОВ ПЕРЕГОВОРОВ

М. В. Волчихина

*Кафедра «Информационные системы и защита информации»,
mariyamoiseeva@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: адаптация параметров средства защиты информации; адаптивные системы защиты информации; информационная безопасность; организация систем защиты информации; типовая модель адаптивной системы защиты информации.

Аннотация: Предложен метод адаптации параметров средств защиты информации на основе дискретного изменения амплитуды и тембра субъектов переговоров. Отмечены недостатки современных подавителей помех от ведущих мировых производителей. На основе метода адаптации разработана математическая модель изменения параметров средств защиты информации для обеспечения заданного уровня защищенности офисного помещения.

Введение

На сегодняшний день рынок аппаратных средств защиты информации (СЗИ) насыщен не только продуктами отечественных производителей, но и импортными средствами. Опираясь на требование подтвержденной надежности устройств, выбор производителя средств будет проводиться среди компаний, деятельность которых лицензирована, а продукты сертифицированы.

Анализ существующих СЗИ показал, что в них отсутствует адаптация параметров к амплитуде и тембру субъектов переговоров [1].

Для разработки метода адаптации параметров СЗИ необходимо провести мониторинг современных технологий формирования и анализа речи. Акустический речевой сигнал возникает в результате сложных координированных движений, происходящих в органах человека, вся совокупность которых называется речевым аппаратом. Источниками возбуждения голосовых колебаний являются колебания голосовых связок (голосовой источник), а также турбулентные шумы, возникающие при прохождении потока воздуха через сужения речевого тракта (шумовой источник) [1].

В зависимости от положения и движения артикуляторных органов в процессе речеобразования, а также источника возбуждения речевых колебаний возникают различные звуки речи, акустическое представление которых представляет собой звучащие абстрактные аналоги букв алфавита – фонемы. Основное отличие фонем от символов алфавита состоит в их существенно большей изменчивости: вариантов произношения фонем значительно больше вариантов написания букв вследствие существенно большего числа факторов, влияющих на параметры формирования звука. Кроме того, процесс формирования звуков является динамиче-

ским, протяженным во времени, при этом инерционность артикуляторных движений приводит к взаимовлиянию соседних звуков, в результате фонем в идеальном их выражении просто не существует – они реализуются в виде позиционных вариантов – аллофонов, изменчивость которых еще выше. В экспериментальной фонетике существует классификация звуков речи по способу и месту образования, учитывающая, например, степень подъема языка и продвинутости его вперед или назад, положение и степень раскрытия губ, при этом учитывается также характер источника возбуждения и место его образования (для шумных звуков). Данные признаки часто имеют противопоставительный характер (высокий – низкий, передний – задний и т.п.), что дает основание построить систему так называемых дифференциальных признаков, являющихся перспективной системой установления связи между фонетическими и акустическими характеристиками речевых сигналов, необходимой для решения многих задач речевых технологий. Важную роль как при исследовании процессов речеобразования, так и технической реализации каналов речевой коммуникации играют физические и математические модели речевого тракта. Выбор адекватной физической модели и ее математическая формализация позволяют строить системы синтеза речи, то есть машинного генерирования речевого сигнала.

Развитие систем автоматического управления связано с адаптацией к параметрам внешней среды, что позволяет исключить человеческое вмешательство в процесс управления системой. Автоматизация процесса управления наиболее актуальна для систем, которые несут потенциальную и реальную угрозу здоровью или жизни человека (например, заводы перерабатывающей промышленности) или системы, угрозой которым является человек (транспортные системы). Другим направлением автоматизации является сфера информационной безопасности. Существует необходимость в переходе на следующий уровень исключения человеческого фактора – внедрение адаптивных систем, которые позволят перенести процесс защиты информации в совершенно иную плоскость.

Организация адаптивных систем защиты информации строится на применении существующих методов адаптации из других областей научного знания в отношении вопросов информационной безопасности. Особенности такого прикладного применения обобщенных принципов адаптации отражают специфику предметной области, не нарушая общепринятых норм. В данной работе под адаптацией понимается процесс, в ходе которого устанавливается или поддерживается приспособленность системы (то есть поддержание ее основных параметров) при изменении условий внешней и внутренней среды.

Так, принципы организации адаптивных систем защиты информации основываются на модели адаптации систем управления. Рассматриваются два основных вида адаптации:

- параметрическая – коррекция, подстройка параметров систем без изменения принципов работы системы;
- структурная – адаптация структуры модели, допускающая сохранение значений параметров системы.

Помимо классификации видов адаптации систем, необходимо рассмотреть обобщенный алгоритм построения моделей адаптивных систем. Так, в общем виде, он содержит следующие этапы:

1. Исследование методов и моделей адаптации для поиска удовлетворяющих требованиям разрабатываемой системы.
2. Модификация выбранных методов и моделей для корректного функционирования в рамках текущей области применения.
3. Апробация внедрения адаптивных принципов по отношению к разрабатываемой системе и проверка на соответствие итогов планируемыми результатам.



Рис. 1. Типовая адаптивная система защиты информации

Вопрос применения принципов адаптивного управления в области информационной безопасности выдвигается не впервые. Анализ предметной области показал, что кроме типовых моделей адаптивной системы защиты информации существуют и прикладные модели, учитывающие особенности конкретных областей защиты информации.

При разработке конкретной модели адаптации СЗИ, необходимо рассмотреть типовую модель адаптивной системы защиты информации (рис. 1) [2]. Данная модель отображает общий подход к функционированию СЗИ с адаптивным управлением без учета особенностей подсистем защиты информации.

Метод адаптации параметров СЗИ

Минимальным необходимым комплексом аппаратных средств защиты является пакет из блока электропитания и управления, генератора-акустоизлучателя и генератора-вибровозбудителя.

Рассмотрим устройство защиты объектов информатизации от утечки информации за счет побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) «Соната-АВ» модель 4Б. Данная система предназначена для защиты речевой информации в выделенных помещениях от утечки по акустическим, акустовибрационным, акустоэлектрическим и оптико-электронным (лазерным) каналам.

Производство изделия «Соната-АВ» модель 4Б сертифицировано. Первым его системообразующим признаком является построение по принципу «единый источник электропитания в сочетании с генератором-электроакустическим преобразователем (излучателем)». Данный подход предложен, запатентован и апробирован ООО «Анна» (патент № 27442, приоритет от 16.04.2002 г. и свидетельство на полезную модель № 24610 приоритет от 20.05.2002 г.) в 2002 году. Основным положительным следствием такого построения является потенциально более высокая стойкость защиты речевой информации вследствие статистической независимости возбуждения маскирующего шума во всех точках [3 – 8].

Кроме того, такое построение системы акустовибрационной защиты информации (в противовес «классическому» подходу – «центральный генератор в сочетании с электроакустическим преобразователем») существенно упрощает проектирование и монтаж (возможно подключение к одному питающему шлейфу любых сочетаний генераторов-излучателей) и позволяет реализовать при заданном уровне защищенности потенциально меньшее мешающее действие системы

вследствие возможности индивидуальной регулировки интегрального уровня и корректировки спектра каждого генератора-излучателя.

Структурная схема работы устройства «Соната» представлена на рис. 2.

Недостатки устройства «Соната-АВ»:

- дискретное изменение настроек уровней шума и тембра;
- система работает непрерывно, в связи с чем злоумышленник может подбирать уровень шума и методы обработки, чтобы подавить поступающие помехи.

Для устранения перечисленных недостатков предложены метод и модель адаптации параметров СЗИ к амплитуде и тембру субъектов переговоров.

Адаптивные системы защиты информации применяются для защиты акустической информации. Идея заключается в том, чтобы в пределах контролируемой зоны создать область, за пределами которой уровень звука либо отсутствует, либо значительно искажается до неразборчивого состояния.

При работе акустической адаптивной системы можно выделить три аспекта, в значительной мере влияющих на их устройство и эффективность [9]:

1. Выбор алгоритма управления или метода компенсации волнового фронта акустического сигнала, зависящий как от способа компенсации, так и свойств компенсирующего объекта.

2. Пространственные и временные корреляционные функции компенсации волнового фронта, которые во многом определяются основными характеристиками компенсаторной системы – необходимым количеством акустических систем. В значительной степени компенсация определяется выбором датчика волнового фронта акустической волны, его фазовыми искажениями, а также выбором системы управления.

3. Выбор системы датчиков и той информации, на основании которой строится процесс управления.

Сущность метода адаптации характеристик СЗИ заключается в обеспечении заданного уровня словесной разборчивости на границе контролируемой зоны при ограничении параметров помехового сигнала (мощность и ширина спектра). Этапы реализации метода адаптации характеристик СЗИ:

- получение исходных данных (определение границы контролируемой зоны);
- автоматическая оценка амплитуды и тембра субъектов переговоров;
- адаптация параметров выходных элементов средства защиты информации к амплитуде и тембру субъектов переговоров;
- автоматическое поддержание параметров помехового сигнала при изменениях амплитуды и тембра субъектов переговоров.

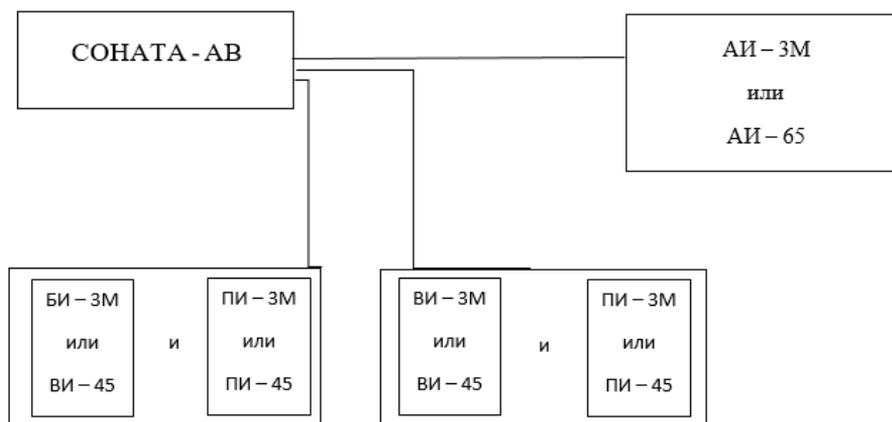


Рис. 2. Структурная схема устройства «Соната-АВ»

Модель адаптации параметров СЗИ

Для реализации метода адаптации характеристик СЗИ необходимо построить модель.

Так как характеристики заранее неизвестны, то в подсистеме подавления используется адаптивная цифровая фильтрация.

Для синтеза фильтра не требуется априорных сведений о сигналах и их статистических или детерминистических взаимосвязях [1].

Выходной сигнал адаптивного СЗИ:

$$e = s + n_0 - y, \quad (1)$$

где s – полезный речевой сигнал; n_0 – аддитивная помеха; y – обработанный сигнал.

Сигнал (1) также служит сигналом ошибки, по которому перестраивается фильтр.

Возведем обе части равенства в квадрат

$$e^2 = s^2 + (n_0 - y)^2 + 2s(n_0 - y). \quad (2)$$

Для обеих частей (2) найдем математическое ожидание и, поскольку s не коррелирован с n_0 и y , получим:

$$E[e^2] = E[s^2] + E[(n_0 - y)^2]. \quad (3)$$

Мощность сигнала $E[s^2]$ не изменяется при перестройке фильтра в процессе минимизации $E[e^2]$. В соответствии с этим минимальная мощность выходного сигнала выражается

$$E_{\min}[e^2] = E[s^2] + E_{\min}[(n_0 - y)^2]. \quad (4)$$

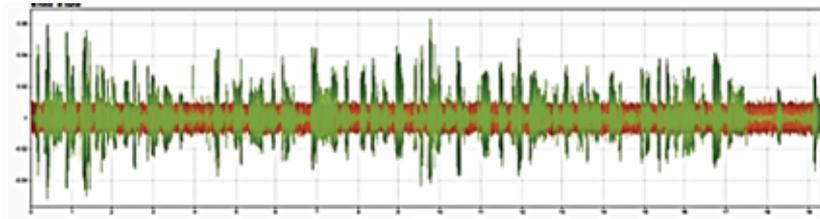
Фильтр построен так, что $E[e^2]$ минимально, следовательно минимально и $E[(n_0 - y)^2]$, в результате выходной сигнал фильтра является наилучшей среднеквадратической оценкой помехи n_0 .

Таким образом, перестройка и адаптация для минимизации общей мощности выходного сигнала равносильна тому, что при заданной структуре адаптивного фильтра и эталонном входном сигнале выходной сигнал изменяется так, чтобы он являлся наилучшим в среднеквадратическом смысле приближением сигнала s [4 – 7].

Анализ модели

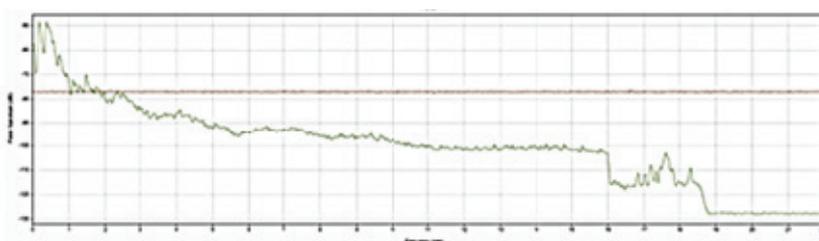
Математическая постановка дает возможность реализации алгоритма в виде модели адаптации параметров помехового сигнала.

Модель реализована в программной среде MATLAB. Результат моделирования (рис. 3) показывает достаточную схожесть данных спектра помехи и адаптированного сигнала.

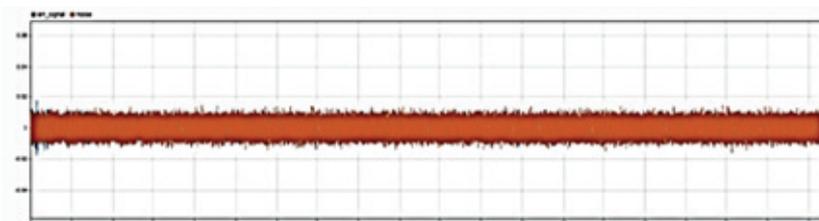


a)

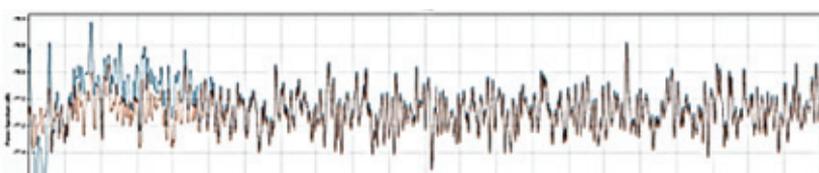
Рис. 3. Результат моделирования (начало):
a – речевой сигнал + помеха



б)



в)



г)

Рис. 3. Окончание:

б – спектр сигнала и помехи; в – помеха и адаптированный сигнал;
г – спектр помехи и адаптированного сигнала

В ходе исследования модели получены спектры речевого сигнала и адаптированного сигнала, а также показаны исходный сигнал, адаптированный сигнал и его смесь с исходным речевым сигналом. Результат моделирования показывает достаточную схожесть данных спектров.

Заключение

Предложен метод адаптации параметров средства защиты информации к характеристикам субъектов переговоров, сущность которого заключается в обеспечении заданного уровня словесной разборчивости на границе контролируемой зоны при ограничении параметров помехового сигнала (мощность и ширина спектра).

Разработана и реализована в математическом пакете MATLAB модель изменения параметров средств защиты информации для обеспечения заданного уровня защищенности офисного помещения. Результат моделирования показывает схожесть спектров помехи и адаптированного сигнала. Дальнейшее направление исследования предложенного метода будет продолжено разработкой алгоритмов функционирования модели и оценки эффективности системы интеллектуального управления защитой информации, при моделировании (при искусственном зашумлении сигнала) с генерируемыми задержками и уровнем мощности удалось

спрогнозировать помеху до ее появления и выполнить адаптацию, исключив речевой сигнал из усилительного тракта. Отфильтрованный сигнал соответствовал исходной помехе.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-3790146\20.

Список литературы

1. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов : пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз ; под ред. В. В. Шахгильдяна. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с.
2. Левкин, И. М. Типовая структура и состав адаптивной системы защиты информации большой информационной систем. – Текст : электронный / И. М. Левкин, А. А. Володина. – URL : http://ubs.mtas.ru/bitrix/components/bitrix/forum.interface/show_file.php?fid=16693 (дата обращения: 21.04.2022).
3. Артюшенко, В. М. Алгоритмы адаптивной нелинейной обработки сигналов блоками нелинейного преобразования дискриминаторов с прямой и обратной связью. – Текст : электронный / В. М. Артюшенко, В. И. Воловач // Журнал радиоэлектроники : электронный журнал. – 2018. – № 3. – 29 с. – URL : <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/10/text.pdf> (дата обращения: 21.04.2022).
4. Адаптивная компенсация помех обратного акустического тракта в процессе эксплуатации конференц-систем / К. В. Кондратьев, О. В. Непомнящий, А. Ф. Шишкина, В. Н. Сергеевич // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 3. – С. 53 – 59.
5. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 608 с.
6. Шишкина, А. Ф. Об одном способе подавления шумов в переговорных устройствах / А. Ф. Шишкина, А. Л. Галиев, А. Н. Ликонцев // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 10. – С. 31 – 35.
7. Метод подавления акустической обратной связи на основе цифрового фильтра предварительного вычисления сигнала коррекции / О. В. Непомнящий, В. Б. Дрыжак, К. В. Кондратьев [и др.] // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – Т. 10, № 3. – С. 19 – 22.
8. Репин, В. Г. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптации информационных систем / В. Г. Репин, Г. П. Тартаковский. – М. : Советское радио, 1977. – 432 с.
9. Алексеев, В. В. Сравнительная характеристика методов разборчивости речи / В. В. Алексеев, А. В. Яковлев, М. В. Моисеева // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации : материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., 14 – 20 сентября 2019 г., Алушта. – М., 2019. – С. 85–86.

A Method for Adapting the Parameters of Information Security Tools Using a Discrete Change in the Amplitude and Timbre of the Subjects of Negotiations

M. V. Volchikhina

*Department of Information Systems and Information Security,
mariyamoiseva@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: adaptation of parameters of the information security tool; adaptive information security systems; Information Security; organization of information security systems; typical model of an adaptive information security system.

Abstract: A method is proposed for adapting the parameters of information security means based on a discrete change in the amplitude and timbre of the subjects of negotiations. The shortcomings of modern noise suppressors from the world's leading manufacturers are noted. Based on the adaptation method, a mathematical model has been developed for changing the parameters of information security tools to ensure a given level of office space security.

References

1. Uidrou B., Stirnz S., Shakhgil'dyan V.V. [Ed.] *Adaptivnaya obrabotka signalov* [Adaptive signal processing], Moscow: Radio i svyaz', 1989, 440 p. (In Russ.)
2. http://ubs.mtas.ru/bitrix/components/bitrix/forum.interface/show_file.php?fid=16693 (accessed 21 April 2022).
3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/10/text.pdf> (accessed 21 April 2022).
4. Kondrat'yev K.V., Nepomnyashchiy O.V., Shishkina A.F., Sergeyevich V.N. [Adaptive noise compensation of the return acoustic path during the operation of conference systems], *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems. Management, control, diagnostics], 2014, no. 3, pp. 53-59. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Sergiyenko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing], St. Petersburg: Piter, 2003, 608 p. (In Russ.)
6. Shishkina A.F., Galiyev A.L., Likontsev A.N. [About one method of noise suppression in intercoms], *Aviakosmicheskoye priborostroyeniye* [Aerospace Instrumentation], 2015, no. 10, pp. 31-35. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Nepomnyashchiy O.V., Dryzhak V.B., Kondrat'yev K.V., Matyukha N.V., Sergeyevich V.N. [The method of acoustic feedback suppression based on the digital filter of preliminary calculation of the correction signal], *Informatsionno-izmeritel'nyye i upravlyayushchiye sistemy* [Information-measuring and control systems], 2012, vol. 10, no. 3, pp. 19-22. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Repin V.G., Tartakovskiy G.P. *Statisticheskyy sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsii informatsionnykh sistem* [Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems], Moscow: Sovetskoye radio, 1977, 432 p. (In Russ.)
9. Alekseyev V.V., Yakovlev A.V., Moiseyeva M.V. *Sovremennyye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii* [Modern technologies in tasks of control, automation and information processing], Proceedings of the XXVIII International Scientific and Technical conference, 14 - 20 September, 2019, Alushta, Moscow, 2019, pp. 85-86. (In Russ.)

Die Methode der Anpassung der Parameter von Informationssicherheitsmittel aufgrund der diskreten Änderung der Amplitude und der Klangfarbe der Subjekte der Verhandlungen

Zusammenfassung: Es ist ein Verfahren zum Anpassen der Parameter von Informationssicherheitsmitteln basierend auf einer diskreten Änderung in der Amplitude und Klangfarbe der Verhandlungssubjekte vorgeschlagen. Die Mängel moderner Störsignalunterdrücker von weltweit führenden Herstellern sind angemerkt. Auf der Grundlage der Anpassungsmethode ist ein mathematisches Modell der Änderung der Parameter von Informationssicherheitswerkzeugen entwickelt, um ein bestimmtes Sicherheitsniveau für Büroräume zu gewährleisten.

Méthode d'adaptation des paramètres des moyens de protection de l'information à la base d'un changement discret de l'amplitude et du timbre des sujets de négociation

Résumé: Est proposée une méthode d'adaptation des paramètres des moyens de protection de l'information basée sur un changement discret de l'amplitude et du timbre des sujets de la négociation. Sont notés les inconvénients des supprimeurs d'interférences modernes des principaux fabricants mondiaux. A la base de la méthode d'adaptation, est mis au point un modèle mathématique de la modification des paramètres des outils de protection de l'information afin d'assurer un niveau de sécurité spécifié de l'espace de bureau.

Автор: *Волчихина Мария Владимировна* – аспирант кафедры Информационные системы и защита информации», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

УСТОЙЧИВОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ СТАБИЛЬНОГО КАТАЛИЗАТА В СТАБИЛИЗАЦИОННОЙ КОЛОННЕ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

А. М. Джамбеков¹, Б. С. Дмитриевский², А. А. Терехова²

*ГБПОУ АО «Астраханский колледж вычислительной техники» (1),
dzhambekovat@yandex.ru, Астрахань, Россия;
Кафедра «Информационные процессы и управление»,
terehova.aa@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ» (2), Тамбов, Россия*

Ключевые слова: автоматическая система регулирования; каталитический риформинг; множество неопределенностей; номинальный полином; робастная устойчивость; семейство полиномов; стабилизация катализата.

Аннотация: Предложен учет влияния неконтролируемых возмущений на регулирование уровня процесса стабилизации катализата изменением коэффициентов передаточной функции автоматической системы регулирования уровня в стабилизационной колонне блока стабилизации катализата установки каталитического риформинга на основе методов робастной устойчивости. Для исследования робастной устойчивости автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата представлена типовая схема системы регулирования. Получен общий вид передаточной функции автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата. Поставлена задача определения робастной устойчивости замкнутой автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата. Рассмотрено семейство передаточных функций автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата с частотной неопределенностью. Задача определения робастной устойчивости замкнутой автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата сведена к заданию области частотной неопределенности и построению годографа робастного критерия Найквиста. Для определения робастной устойчивости замкнутой автоматической системы регулирования уровня процесса стабилизации катализата задана номинальная передаточная функция разомкнутой части автоматической системы регулирования уровня и функция, ограничивающая область неопределенности.

Введение

В работе [1] выполнено моделирование автоматической системы регулирования (АСР) температуры низа стабилизационной колонны (СК) блока стабилизации катализата (БСК) установки каталитического риформинга (КР) [2]. Октавное число продуктовой смеси БСК (стабильного катализата) определяет качество всей цепочки процесса КР [3]. Для эффективного управления БСК помимо разработки эффективных алгоритмов управления, обеспечивающих достижение экономического или иного эффекта, необходимо обеспечение устойчивого режима работы АСР технологических параметров (температуры, давления, расхода, уровня и пр.) [4]. Одним из основных технологических параметров БСК является уро-

вень катализата в СК [5]. На регулирование уровня в СК оказывают влияние неконтролируемые возмущения: расход сбрасываемого газа стабилизации, перепад температуры в СК [6].

Данные возмущения необходимо учитывать при разработке АСР уровня катализата в СК. Коэффициенты полинома знаменателя передаточной функции АСР уровня в СК постоянные. В настоящей работе предложен учет влияния возмущений путем изменения коэффициентов полинома знаменателя передаточной функции АСР уровня в СК на основе методов робастной устойчивости [7]. Предполагается, что данные коэффициенты изменяются под влиянием возмущений с течением времени. Важной является задача исследования робастной устойчивости АСР уровня в СК.

Постановка задачи

Для исследования робастной устойчивости АСР уровня в СК рассмотрим типовую схему, представленную на рис. 1, где обозначены: задающее воздействие $r(t)$; ошибка управления $e(t)$; управление $u(t)$; выход $y(t)$; регулятор (ПИД-регулятор) R; объект управления (процесс в СК) OU [1]. В качестве регулируемого параметра $y(t)$ рассмотрен уровень в СК. Задающее воздействие $r(t)$ – ступенчатое изменение положения (хода) регулирующего органа (здвижки) на линии (трубопроводе) стабильного катализата [1].

Передаточная функция разомкнутой части АСР уровня в СК, определенная на основе экспериментальной переходной кривой для установки КР Л-35-11/1000, имеет вид [8]

$$W(s) = \frac{25}{1 + 2,28s + 1,19s^2 + 4,16s^3}. \quad (1)$$

Для описания задачи в общем виде получим передаточную функцию (1)

$$W(s) = \frac{k}{a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3}, \quad (2)$$

где k – коэффициент усиления, $k = 25$; a_i – постоянные коэффициенты; s – оператор Лапласа.

Предполагается, что при воздействии возмущений коэффициенты передаточной функции (2) изменяются с течением времени.

Пусть разомкнутая часть АСР уровня в СК описывается семейством скалярных передаточных функций

$$W(s) = W_0(s) + \Delta(s), \quad (3)$$

где $W_0(s)$ – номинальная передаточная функция (2); $\Delta(s)$ – частотная неопределенность, удовлетворяющая условию

$$\Delta(j\omega) \leq \nu |H(j\omega)| \quad (4)$$

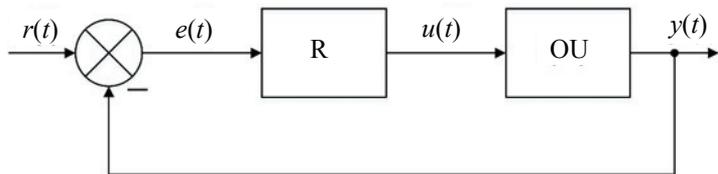


Рис. 1. Структурная схема АСР уровня в СК

при всех ω для некоторой функции $H(s)$, такой, что $H^{-1}(s)$ – устойчивая реализуемая дробно-рациональная функция.

Необходимо знать, будет ли робастно устойчива АСР уровня в СК, замкнутая единичной обратной связью (см. рис. 1). Как известно, при отсутствии неопределенностей вопрос решается с помощью годографа Найквиста. Рассмотрим его робастную модификацию применительно к настоящей работе.

При использовании робастного критерия Найквиста предполагается, что все передаточные функции из семейства (3) имеют одинаковое число N неустойчивых полюсов с $W_0(s)$ при всех допустимых $\Delta(s)$.

Построим годограф

$$\tilde{W}(j\omega) = \frac{W_0(j\omega)+1}{|H(j\omega)|} - 1, \quad 0 \leq \omega < \infty. \quad (5)$$

Исходя из робастного критерия Найквиста замкнутая АСР уровня в СК робастно устойчива тогда и только тогда, когда годограф $\tilde{W}(j\omega)$ охватывает круг с центром в точке $(-1, j0)$ и радиусом $\nu/2$ раз против часовой стрелки, при этом не пересекая его.

Задача заключается в определении робастной устойчивости замкнутой АСР уровня в СК (см. рис. 1) при заданной номинальной передаточной функции разомкнутой части АСР $W_0(s)$, частотной неопределенности $\Delta(s)$ и подтверждении (не подтверждении) выполнения условия робастного критерия Найквиста, на основании которого делаем вывод о робастной устойчивости (неустойчивости) замкнутой АСР уровня в СК.

Определим робастную устойчивость замкнутой АСР уровня в СК.

Робастная устойчивость замкнутой автоматической системы регулирования уровня в стабилизационной колонне

С учетом (1) имеем номинальную передаточную функцию разомкнутой АСР уровня в СК

$$W_0(s) = \frac{25}{1 + 2,28s + 1,19s^2 + 4,16s^3}.$$

Передаточная функция имеет два неустойчивых полюса: $s_{1,2} \approx 0,059 \pm j 0,769$; один устойчивый $s_3 \approx -0,404$.

Зададим функцию $H^{-1}(s)$ в виде

$$H^{-1}(s) = \frac{1 + 2s + s^2}{1 + 3s + 4s^2 + 2s^3}.$$

С учетом (4) зададим частотную неопределенность

$$\begin{aligned} \Delta(j\omega) \leq \nu |H(j\omega)| &= \nu \left| \frac{1 + 3j\omega + 4(j\omega)^2 + 2(j\omega)^3}{1 + 2j\omega + (j\omega)^2} \right| = \\ &= \nu \left| \frac{1 - 4\omega^2 + j(3\omega - 2\omega^3)}{1 - \omega^2 + j2\omega} \right| = \nu \sqrt{\frac{(1 - 4\omega^2)^2 + (3\omega - 2\omega^3)^2}{(1 - \omega^2)^2 + 4\omega^2}}. \end{aligned}$$

Все передаточные функции из семейства (3) имеют одинаковое число $N = 2$ неустойчивых полюсов с $W_0(s)$ при всех допустимых $\Delta(s)$.

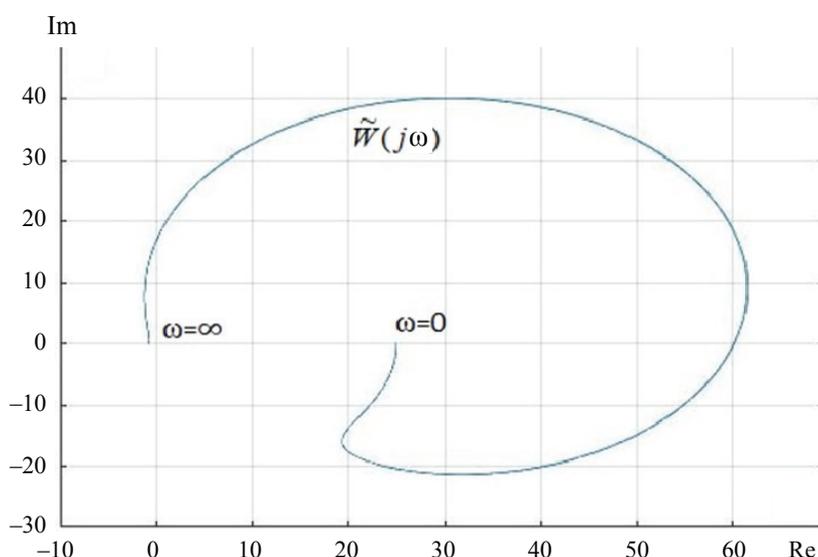


Рис. 2. Годограф робастного критерия Найквиста

Построим годограф робастного критерия Найквиста

$$\tilde{W}(j\omega) = \frac{W_0(j\omega)+1}{|H(j\omega)|} - 1 = \frac{1 + 2,28j\omega + 1,19(j\omega)^2 + 4,16(j\omega)^3 + 1}{\sqrt{\frac{(1-4\omega^2)^2 + (3\omega-2\omega^3)^2}{(1-\omega^2)^2 + 4\omega^2}}} - 1, \quad 0 \leq \omega < \infty.$$

Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Поскольку выполняется условие робастного критерия Найквиста, делаем вывод о робастной устойчивости замкнутой АСР уровня в СК.

Заключение

Таким образом, на основе построения годографа робастного критерия Найквиста замкнутая АСР уровня в СК обладает робастной устойчивостью. Данный результат может быть использован при разработке АСР расхода орошения в СК и выборе настроек регуляторов.

Список литературы

1. Джамбеков, А. М. Локальный ПИД-регулятор стабилизации катализата / А. М. Джамбеков, И. А. Щербатов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 3 (51). – С. 98 – 104.
2. Ancheyta, J. Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining / J. Ancheyta. – Hoboken : Wiley, 2011. – 528 p.
3. Smith, J. M. Chemical Engineering Kinetics / J. M. Smith. – St. Louis : McGraw-Hill, 1981. – 676 p.
4. Gumen, M. I. Increasing of the Efficiency of the Reforming LG-35-11/300 / M. I. Gumen // Petroleum Processing and Petrochemistry. – 2001. – No. 11. – P. 54 – 57.
5. Fluid Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation and Control / C. I. C. Pinheiro, J. L. Fernandes, L. Domingues [et al.] // Industrial Engineering Chemistry Research. – 2012. – Vol. 51 (1). – P. 1 – 29. doi: 10.1021/IE200743C

6. Weekman, V. A. Model of Catalytic Cracking Conversion in Fixed, Moving and Fluid-Bed Reactors / V. A. Weekman // *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*. – 1968. – Vol. 7 (1). – P. 90 – 95. doi: 10.1021/I260025A018
7. Ефремов, В. В. Расчет робастно-устойчивости автоматической системы регулирования температуры водогреваемой спецодежды водолаза / В. В. Ефремов, А. Г. Шелудько, А. А. Анисимов // *Дизайн и технологии*. – 2013. – № 34 (76). – С. 75 – 79.
8. Cristea, M. V. Simulation and Model Predictive Control of a UOP Fluid Catalytic Cracking Unit / M. V. Cristea, S. P. Agachi, V. Marinoiu // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2003. – Vol. 42, Issue 2. – P. 67 – 91. doi: 10.1016/S0255-2701(02)00017-X
9. Поляк, Б. Т. Робастная устойчивость и управление / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М. : Наука, 2002. – 303 с.
10. Nguang, S. K. Robust Stabilization of a Class of Time-Delay Nonlinear Systems / S. K. Nguang // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2000. – Vol. 45, No. 4. – P. 756 – 762. doi: 10.1109/9.847117
11. Wu, L. Delay-Dependent Robust Stabilization for Uncertain Singular Systems with Discrete and Distributed Delays / L. Wu, W. Zhou // *Journal of Control Theory and Applications*. – 2008. – Vol. 6. – P. 171 – 176. doi: 10.1007/S11768-008-6166-3
12. Мартьянов, Е. И. Проблемно-ориентированная система управления и оптимизации основных параметров технически сложных систем / Е. И. Мартьянов, С. В. Карпушкин, В. В. Алексеев // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 336 – 344. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344
13. Математические модели многосвязных объектов управления / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 53 – 62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062

Stability of an Automatic System for Controlling the Level of Stable Catalyzate in the Stabilization Column of a Catalytic Reformer

A. M. Dzhambekov¹, B. S. Dmitrievsky², A. A. Terekhova²

*Astrakhan College of Computer Engineering (1),
dzhambekovam@yandex.ru, Astrakhan, Russia;
Department of Information Processes and Management,
terekhova.aa@mail.tstu.ru; TSTU (2), Tambov, Russia*

Keywords: automatic control system; catalytic reforming; a lot of uncertainty; nominal polynomial; robust stability; family of polynomials; catalyst stabilization.

Abstract: It is proposed to take into account the influence of uncontrolled disturbances on the level control of the catalyzate stabilization process by changing the transfer function coefficients of the automatic level control system in the stabilization column of the catalyzate stabilization unit of a catalytic reformer based on robust stability methods. To study the robust stability of an automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process, a typical scheme of the control system is considered. To describe the problem in a general form, a general view of the transfer function of the automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process is obtained. The problem of determining the robust stability of a closed automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process is

posed. A family of transfer functions of an automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process with frequency uncertainty is considered. The problem of determining the robust stability of a closed-loop automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process is reduced to setting the region of frequency uncertainty and constructing a hodograph of the robust Nyquist criterion. To determine the robust stability of the closed-loop automatic level control system of the catalyzate stabilization process, the nominal transfer function of the open-loop part of the automatic level control system and the function limiting the uncertainty area are given. Based on the construction of the hodograph of the robust Nyquist criterion, the closed automatic system for controlling the level of the catalyzate stabilization process has robust stability.

References

1. Dzhambekov A.M., Shcherbatov I.A. [Local PID-controller for catalyzate stabilization], *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2016, no. 3 (51), pp. 98-104. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Ancheyta J. *Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining*, Hoboken: Wiley, 2011, 528 p.
3. Smith J.M. *Chemical Engineering Kinetics*, St. Louis: McGraw-Hill, 1981, 676 p.
4. Gumen M.I. Increasing of the Efficiency of the Reforming LG-35-11/300, *Petroleum Processing and Petrochemistry*, 2001, no. 11, pp. 54-57.
5. Pinheiro C.I.C., Fernandes J.L., Domingues L. [et al.] Fluid Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation and Control, *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2012, vol. 51 (1), pp. 1-29, doi: 10.1021/IE200743C
6. Weekman V.A. Model of Catalytic Cracking Conversion in Fixed, Moving and Fluid-Bed Reactors, *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1968, vol. 7 (1), pp. 90-95, doi: 10.1021/I260025A018
7. Yefremov V.V., Shelud'ko A.G., Anisimov A.A. [Calculation of robust stability of an automatic temperature control system for a diver's water-heated overalls], *Dizayn i tekhnologii* [Design and technologies], 2013, no. 34 (76), pp. 75-79. (In Russ.)
8. Cristea M.V., Agachi S.P., Marinoiu V. Simulation and Model Predictive Control of a UOP Fluid Catalytic Cracking Unit, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2003, vol. 42, issue 2, pp. 67-91, doi: 10.1016/S0255-2701(02)00017-X
9. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. *Robastnaya ustoychivost' i upravleniye* [Robust stability and control], Moscow: Nauka, 2002, 303 p. (In Russ.)
10. Nguang S.K. Robust Stabilization of a Class of Time-Delay Nonlinear Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, vol. 45, no. 4, pp. 756-762, doi: 10.1109/9.847117
11. Wu L., Zhou W. Delay-Dependent Robust Stabilization for Uncertain Singular Systems with Discrete and Distributed Delays, *Journal of Control Theory and Applications*, 2008, vol. 6, pp. 171-176, doi: 10.1007/S11768-008-6166-3
12. Mart'yanov Ye.I., Karpushkin S.V., Alekseyev V.V. [Problem-oriented control system and optimization of the main parameters of technically complex systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 336-344, doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.336-344 (In Russ., abstract in Eng.)
13. Saif M.N.M., Matveykin V.G., Dmitriyevskiy B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Mathematical models of multiply connected control objects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 53-62, doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062 (In Russ., abstract in Eng.)

Stabilität der automatischen Niveauregulierung des stabilen Katalysators in der Stabilisierungskolonne der katalytischen Reformieranlage

Zusammenfassung: Es ist vorgeschlagen, den Einfluss unkontrollierter Störungen auf die Niveauregelung des Katalysatorstabilisierungsprozesses durch Veränderung der Übertragungsfunktionskoeffizienten der automatischen Niveauregelung in der Stabilisierungskolonne der Katalysatorstabilisierungseinheit der katalytischen Reformierungseinheit basierend auf robusten Stabilitätsmethoden zu berücksichtigen. Um die robuste Stabilität eines automatischen Systems zur Steuerung des Niveaus des Katalysatorstabilisierungsprozesses zu untersuchen, ist ein typisches Schema des Steuerungssystems betrachtet. Um das Problem in allgemeiner Form zu beschreiben, ist ein allgemeiner Überblick über die Übertragungsfunktion des automatischen Systems zum Steuern des Niveaus des Katalysatorstabilisierungsprozesses erhalten. Das Problem besteht darin, die robuste Stabilität eines geschlossenen automatischen Systems zur Steuerung des Niveaus des Katalysatorstabilisierungsprozesses zu bestimmen. Es ist eine Familie von Übertragungsfunktionen eines automatischen Systems zum Steuern des Niveaus des Katalysatorstabilisierungsprozesses mit Frequenzunsicherheit betrachtet. Um die robuste Stabilität des automatischen Niveauregelsystems mit geschlossenem Regelkreis des Katalysatorstabilisierungsprozesses zu bestimmen, sind die nominelle Übertragungsfunktion des offenen Regelkreisteils des automatischen Niveauregelungssystems und die den Unsicherheitsbereich begrenzende Funktion angegeben.

Stabilité du système de contrôle automatique du niveau du catalyseur stable dans la colonne de stabilisation de l'installation de reformage catalytique

Résumé: Est proposée la prise en compte de l'effet des perturbations incontrôlées sur la régulation du niveau du processus de stabilisation du catalyseur en modifiant les coefficients de la fonction de transfert de l'installation de reformage catalytique basée sur des méthodes de la stabilité robuste. Est étudié le schéma type du système de la régulation. Est obtenu une vue d'ensemble de la fonction de transfert du système automatique de régulation du niveau du processus de la stabilisation du catalyseur. Est examinée la famille des fonctions de transfert du système avec une incertitude de fréquence. Pour la détermination de la stabilité du système automatique fermé est définie la fonction de transfert nominale de la partie ouverte du système automatique de régulation du niveau et la fonction limitant la zone d'incertitude. A la base de la construction du godographe du test robuste de Nyquist, le système automatique fermé du contrôle du niveau du processus de stabilisation de catalyseur possède une stabilité robuste.

Авторы: *Джамбеков Азамат Матифулаевич* – кандидат технических наук, преподаватель, ГБПОУ АО «Астраханский колледж вычислительной техники», Астрахань, Россия; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Терехова Анастасия Андреевна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

A THREE-LEVEL DIODE-CLAMP INVERTER WITH A PULSE GENERATOR AND PULSE WIDTH MODULATION AS A CASE STUDY

A. Lecheloh, B. Oussama, I. Chaouki, V. F. Kalinin

Department of Power Engineering, kalinin@tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: diode clamp inverters; three-level inverter; multi-level inverter; pulse generator.

Abstract: To demonstrate the efficiency of the logic control approach, three-level diode clamp inverters (DCI), employing two different switching scheme technologies, namely pulse generator (PG) and pulse width modulation (PWM), using MATLAB Simulink, are designed and constructed. The PG is believed to send out a square pulse signal that is exact, consistent, and accurate. The current state of PG innovation is far too vast to be properly encapsulated. The most appropriate dominance and modification methods for these converters are PG and PWM, which are used to drive the MOSFET switching device and produce consistent high voltage pulses with a pulse electric range of up to high intensity.

Introduction

Many industrial appliances work on variable power (medium or low power), and some sectors demand high power. The multi-level inverter (MLI) was first proposed in 1975 as an option in high-power and medium-voltage circumstances [1]. It uses multiple switches, diodes, and capacitors to convert medium-voltage sources (solar cells, batteries, and megacapacitors) into high power output [2]. With MLI you can provide output voltages with minimal distortion, reduce dv/dt stresses and input current draw with minimal distortion, and reduce stress in motor bearings by producing a lower voltage in common mode. It can also function at both low and high pulse width modulation (PWM) switching frequencies. (Because of the reduced conversion frequency, there is less conversion loss and more efficiency.) [3, 4]. Here's a rundown of some of MLI's advantages; the biggest disadvantage is that it necessitates a large number of semiconductor switches [5]. Whereas each drive circuit switch necessitates a relevant gate, each kind has its own set of benefits, which may cause the overall system overhead to rise. Figure 1 and Table 1 show how MLI is separated into three primary kinds, each with its own set of benefits and drawbacks.

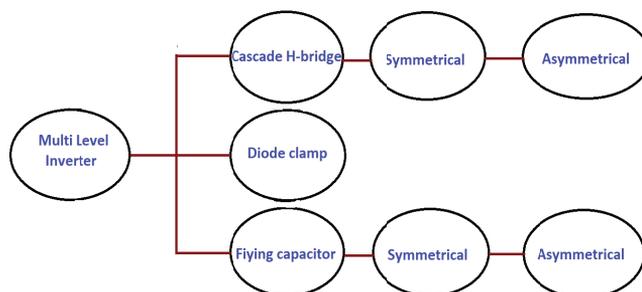


Fig. 1. Types of MLI

Table 1

Applications, Benefits, and drawbacks of MLI types

Names	Advantages	Disadvantages	Applications
Diode Clamped Multilevel Inverter	<p>Capacitance is low</p> <p>Back to back inverters can be used</p> <p>Capacitors are pre-charged</p> <p>Efficiency is high at fundamental frequency</p>	<p>The number of clamping diodes increases with the increase in each level</p> <p>DC level will be discharge when control and monitoring are not precise</p>	<p>Static varcompensation</p> <p>Variable speed motor drives</p> <p>High voltage system interconnections</p> <p>High voltage DC and AC transmission lines</p>
Flying Capacitor Multilevel Inverter	<p>Static var</p> <p>For balancing capacitors voltage levels, phase redundancies are available</p> <p>We can control reactive and real power flow</p>	<p>Voltage regulation is difficult for all capacitors</p> <p>Difficult startup</p> <p>Switching efficiency is low</p> <p>Capacitors are more expensive than diodes</p>	<p>Introduction to motor control</p> <p>Static variable generation.</p> <p>AC-DC and DC-AC conversion applications. Harmonic distortion converters. Sinusoidal current rectifiers are used</p>
Cascade H Bridge Multilevel Inverters	<p>Output voltage levels are doubled to double the number of sources</p> <p>Easy and quick production</p> <p>Packaging and layout is modularized</p> <p>We can control it easily with a transformer</p> <p>Inexpensive</p>	<p>Every H bridge needs a separate DC source</p> <p>Due to the large number of DC sources, applications are limited</p>	<p>Active Filters</p> <p>Electric vehicle drives</p> <p>DC power source utilization</p> <p>Power factor frequency link system</p> <p>Interfacing with renewable energy resources</p>

Diode clamp (DCMLI)

This inverter employs diodes to deliver amplified voltage levels from various phases to the capacitor banks in the chain [1, 6]. A diode only transfers a small amount of electricity, lessening the load on other electrical components. The main disadvantage

is that the maximum output voltage is only half that of the input DC voltage. However, this can be overcome by increasing the number of switches, diodes, and capacitors. This inverter has a high efficiency and is a simple technique for back-to-back power transmission systems [7] because it uses fundamental frequency for all switching components.

The voltage across each capacitor is $V_{dc}/2$. In Table 2, the switching modes are plotted versus the magnitude of the o/p voltage. For each mode, two switches are turned on, while the other two are turned off with varying degrees of o/p. Two capacitors, C1 and C2, connected in series, divide the DC bus voltage into three-levels [6, 8, 9].

The purpose of the switching modes is to ensure that switches operate in the proper manner. Van's o/p voltage has three situations ($V_{dc}/2$), (Zero), and ($-V_{dc}/2$), as shown in Fig. 2. All three of these scenarios are possible when using newer logic states.

Upper switches (IGBT and IGBT1) are ON and all lower switches (IGBT2 and IGBT3) are OFF to get ($V_{dc}/2$).

Switches (IGBT 1 and IGBT 2) be ON, IGBT and IGBT3 be Off to get Zero.

Switches (IGBT 2 and IGBT 3) be ON, IGBT and IGBT1 be Off to get ($-V_{dc}/2$).

Table 2

Switches modes against the magnitude of o/p voltage

Switch Number	Output Voltage		
	$+V_{dc}/2$	Zero	$-V_{dc}/2$
IGBT	1	0	0
IGBT-1	1	1	0
IGBT-2	0	1	1
IGBT-3	0	0	1

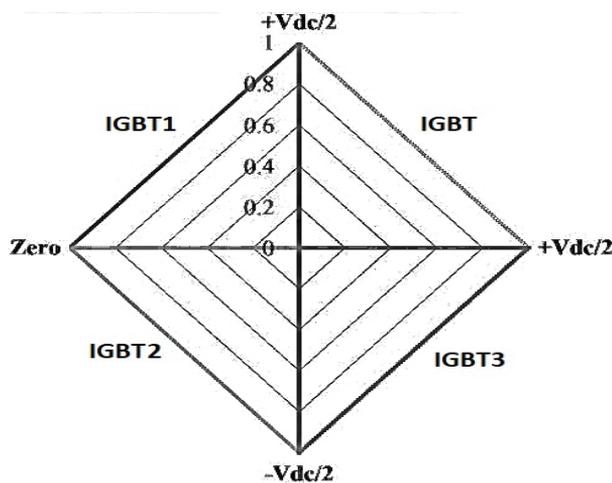


Fig. 2. Sector divisions of three-level DCI

Pulse Generators PG

Pulse generators are control techniques in the MATLAB program that issue a square wave at fixed intervals utilizing the parameters in the source block of each switch (amplitude, period, pulse width, and phase delay) in Fig. 3. The amplitudes are the same for all switches with a period of $1/f$, but the phase delay and pulse width vary according to table 2. Switch 1, for example, is ON for one-time $V_{dc}/2$ o/p and OFF the rest of the time, accounting for 10 % of the life cycle.

The phase delay is zero because Switch 1 has no delay, and the pulse width is 12.5 % of the period. Because Switch 2 operates without a delay, the phase delay is also zero. Switch 2 is ON twice in $V_{dc}/2$ and 0 the rest of the time, so the pulse width is equal to 25 % of the period, and so on for the remaining switches, as shown in Figs. 4, 5.

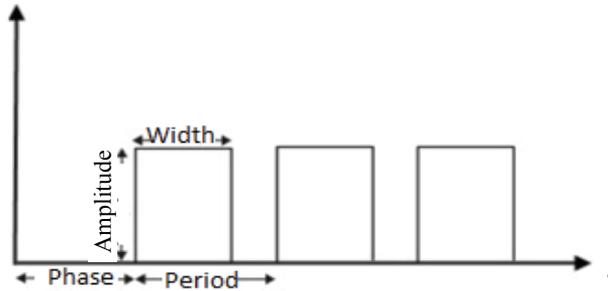


Fig. 3. Explanation of wave measurements

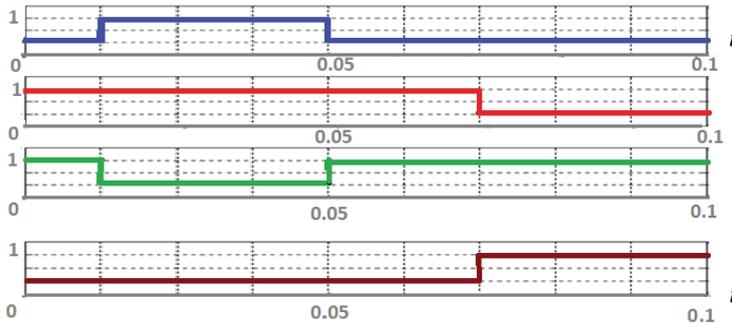


Fig. 4. Switching Sequence

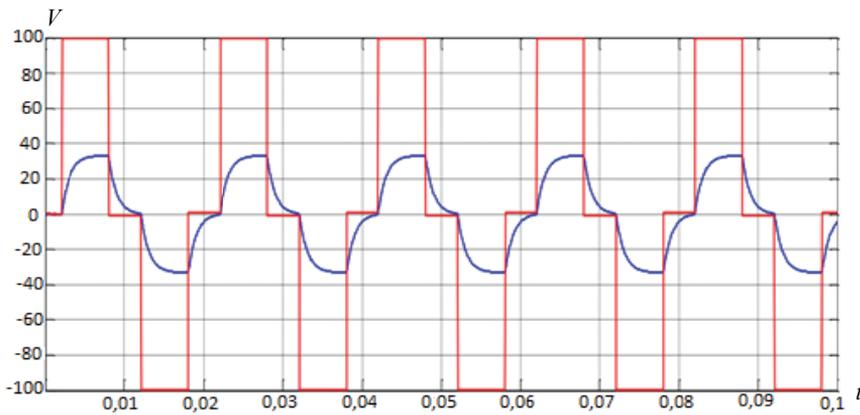


Fig. 5. Three-level output waveform (PG)

Pulse Width Modulation PWM

The converter output is controlled by varying the phase delay, period, and pulse width (as shown in Figs. 3, 4), and the third order harmonic is the easiest to filter out [9 – 12].

Every half cycle, switches are switched. The output voltage is regulated by adjusting the width of the pulses, which is referred to as a PWM control in Figs. 6, 7 shows the gateway signals produced by combining a DC signal with a triangle wave. By adjusting the number of pulses, lower order harmonics can be eliminated. As a result, increasing the number of pulses should increase the number of higher-order harmonics, making filtering simpler. In comparison to inverters built with other technologies, inverters built using PWM technology are outstanding in many factories. A PWM is a way of adjusting the pulse chain's pulse width at a direct rate to a modest control signal. PWM creates a way of reducing overall harmonic distortion in the load current [14, 15]. The THD requirement is generally met by a PWM inverter output (together with several filters, which are more readily available from the quadrate wave switching planner). The THD of the unfiltered PWM output is relatively high, making fabrication filtering easier (the harmonics are higher frequencies in proportion to a square wave). The output voltage amplitude can be changed together with the modifying waveforms in PWM. Two distinct benefits of PWM are the elimination of filter concerns for harmonic reduction and output voltage amplitude control [11]. PWM has a number of drawbacks, including difficult control and frequent switching losses. A reference signal, which is a triangular wave that observes the switching frequency, is required for the switches to control the sinusoidal PWM output (a sinusoidal and a carrier signal in this case). These inverters are made according to the following instructions:

- Input voltage $V_{dc} = 100$ volt;
- Capacitors $100 \mu\text{F}$;
- Switching frequency $f_{sw} = 50$ KHZ;
- O/P voltage 100-volt peak-peak;
- $V_{dc} = V_{c1} + V_{c2} \times V_{ci} = V_{c2} = V_{dc}/2$;
- Period time = $1/f_{sw}$.

In the Fourier series, the fundamental frequency of the PWM output voltage is the same as the reference signal. Multiples of harmonic frequencies exist at and around switching frequencies. A natural low-pass filter could be effective in ejecting some harmonics due to their high frequencies, because their bulk is perfectly significant. The ratio of carrier frequencies to reference signals is known as the frequency modulation ratio m_f [13].

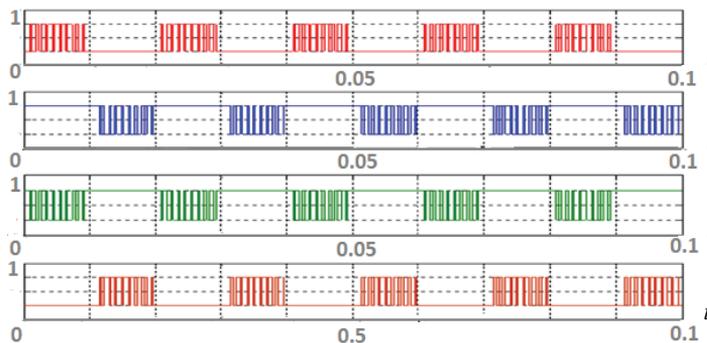


Fig. 6. Switching sequence (PWM)

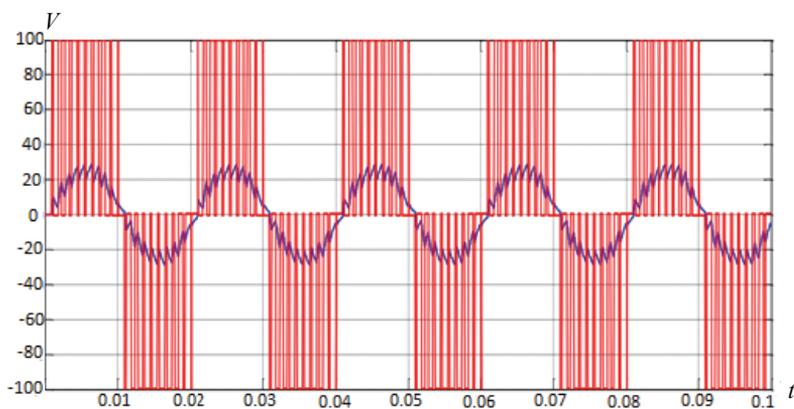


Fig. 7. Level output waveform (PWM)

When the carrier frequency rises, the frequencies at which the harmonics occur rise as well (mf rises). High switching frequencies have the disadvantage of causing additional losses at the inverter switches. The amplitude modulation ratio “ma” is used to assign reference signal amplitudes to carrier signals.

The PWM output will then be controlled by ma (amplitude of the essential frequency). This is significant for an unorganized DC supply voltage since the value of ma could be modified to compensate for the changes in the DC supply voltage, resulting in a fixed amplitude output [14]. Because of the different ma, the output amplitude can change. If ma is greater than one, the output of amplitude grows in lockstep with ma (rather than linearly). For PWM, the switches must be capable of carrying current in all directions (full-bridge circuit), just as they were for square-wave operation. The physical switches are not immediately turned on or off. As a result, much like with a square wave inverter, switching control times must be factored in. The sinusoidal reference voltage should come from an incoming reference or be generated by the inverter control circuit. A sinusoidal voltage must exist before the bridge can provide a sinusoidal output (so it seems the function of the inverter bridge is needless). The inverter's purpose is to provide load power from a DC power source.

Conclusion

Both PG and PWM are switching scheme methods. In a PG, there is just one pulse every half cycle, whereas in PWM, the switches are turned on and off repeatedly during the same time period. The output voltage of a PG converter is controlled by altering the phase delay, period, and pulse width, whereas the output voltage of a PWM converter is controlled by adjusting the pulse width. Lower order harmonics can be decreased in PWM by adjusting the number of pulses per half cycle. As a result, increasing the number of pulses should increase the number of higher-order harmonics (which primarily corresponds to THD demand), making filtering easier. The third harmonic is the lowest order harmonic in a PG (and it's difficult to filter out). PWM has a number of drawbacks, including difficult control and frequent switching losses.

References

1. Mali M.S., Patil B.G. THD Minimization in Multilevel Inverter Using Optimization Approach, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2018, vol. 7, issue 6, pp. 97-100.
2. Hultman A. *Bachelor of Science Thesis in Electrical Engineering*, Linköping University, 2017, 49 p.

3. Lecheloh A. *Master's Thesis in Electrical Engineering*, Batna University, 2016, 59 p.
4. Prayag A., Bodkhe S. A Comparative Analysis of Classical Three Phase Multilevel (Five Level) Inverter Topologies, Proceedings of the 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 4 - 6 July, 2016, Delhi, India, IEEE, 2016, 5 p., doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853567
5. Cooper G.S. The MLI - Australia's other income tax treaty, *Tax Specialist*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 85-103, doi: 10.3316/informit.742175582536289
6. Tashakor N., Kilictas M., Fang J., Goetz S.M. Switch-Clamped Modular Multilevel Converters With Sensorless Voltage Balancing Control, *Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 68, issue 10, pp. 9586-9597, doi: 10.1109/TIE.2020.3028814
7. <https://www.elprocus.com/multilevel-inverter-types-advantages/> (accessed 06 April 2022).
8. <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pulsegenerator.html> (accessed 06 April 2022).
9. Kusagur A., Kodad S.F., Sankar Ram B.V. AI Based Design of a Fuzzy Logic Scheme for Speed Control of Induction Motors Using SVPWM Technique, *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2009, vol. 9, no. 1, pp. 74-80.
10. Seifi A., Hosseinpour M., Dejamkhooy A. A Switch-Source Cell-Based Cascaded Multilevel Inverter Topology with Minimum Number of Power Electronics Components, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2021, vol. 43, no. 5, pp. 9-12, doi: 10.1177/0142331220974137
11. Peddapelli S.K. *Pulse Width Modulation. Analysis and Performance in Multilevel Inverters*, De Gruyter Oldenbourg, 2016.
12. Singh S., Agnihotri A., Bind S., Kumar S. Matlab Simulation Study and Comparison of Different Multiple Carrier PWM Schemes For Multi-Level CHB Inverter, Proceedings of the First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), 25-26 September, 2020, Nagpur, India, IEEE, 2020, 6 p., doi:10.1109/STPEC49749.2020.9297693
13. Kavali J., Mittal A. Analysis of Various Control Schemes for Minimal Total Harmonic Distortion in Cascaded H-bridge Multilevel Inverter, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2016, vol. 3, issue 3, pp. 428-441, doi: 10.1016/j.jesit.2016.01.007
14. Maheshwari R., Busquets-Monge S., Nicolas-Apruzzese J. A Novel Approach to Generate Effective Carrier-Based Pulse width Modulation Strategies for Diode-Clamped Multilevel DC±AC Converters, *Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63, issue 11, pp. 7243-7252, doi: 10.1109/TIE.2016.2538198
15. Prabakaran N., Palanisamy K. Comparative Analysis of Symmetric and Asymmetric Reduced Switch MLI Topologies Using Unipolar Pulse width Modulation Strategies, *IET Power Electronics*, 2016, vol. 9, issue 15, pp. 2808-2823, doi: 10.1049/iet-pel.2016.0283

Трехуровневый диодно-зажимный инвертор с генератором импульсов и широтно-импульсной модуляцией

А. Лешелах, Б. Уссама, И. Шауки, В. Ф. Калинин

*Кафедра «Электроэнергетика», kalinin@tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: инверторы с диодным зажимом; инвертор трехуровневый; многоуровневый инвертор; генератор импульсов.

Аннотация: Для демонстрации эффективного логического управления сконструированы и построены трехуровневые диодные зажимные инверторы (DCI), использующие две различные технологии схемных переключений, генератор импульсов (PG) и широтно-импульсную модуляцию (PWM) с применением для расчетов программный пакет MATLAB Simulink. Считается, что PG посылает прямоугольный импульсный сигнал, который отличается последовательностью и высоким качеством. Наиболее подходящими методами модификации таких электрических преобразователей являются использование PG и PWM, которые применяются для устройств коммутации MOSFET с высокой интенсивностью.

Список литературы

1. Mali, M. S. THD Minimization in Multilevel Inverter Using Optimization Approach / M. S. Mali, B. G. Patil // *International Journal of Engineering Research & Technology*. – 2018. – Vol. 7, Issue 6. – P. 97 – 100.
2. Hultman, A. DC-DC Converter Design for Solar Power in Hot Environments : Bachelor of Science Thesis in Electrical Engineering / A. Hultman. – Linköping University, 2017. – 49 p.
3. Lechelah, A. Simulation d'un onduleur trois niveau niveaux en pont pour des applications photovoltaïques : Master's Thesis in Electrical Engineering / A. Lechelah. – Batna University, 2016. – 59 c.
4. Prayag, A. A Comparative Analysis of Classical Three Phase Multilevel (Five Level) Inverter Topologies / A. Prayag, S. Bodkhe // *Proceedings of the 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 4 – 6 July 2016, Delhi, India. – IEEE, 2016. – 5 p. doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853567
5. Cooper, G. S. The MLI – Australia's other income tax treaty / G. S. Cooper // *Tax Specialist*. – 2019. – Vol. 23, No. 2. – P. 85 – 103. doi: 10.3316/informit.742175582536289
6. Switch-Clamped Modular Multilevel Converters With Sensorless Voltage Balancing Control / N. Tashakor, M. Kilicatas, J. Fang, S. M. Goetz // *Transactions on Industrial Electronics*. – 2021. – Vol. 68, Issue 10. – P. 9586 – 9597. doi: 10.1109/TIE.2020.3028814
7. Multilevel Inverter – Types & Advantages. – Текст : электронный. – URL : <https://www.elprocus.com/multilevel-inverter-types-advantages/> (дата обращения: 06.04.2022).
8. Pulse Generator. – Текст : электронный // *Math Works*. – URL : <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pulsegenerator.html> (дата обращения: 06.04.2022).
9. Kusagur, A. AI Based Design of a Fuzzy Logic Scheme for Speed Control of Induction Motors Using SVPWM Technique / A. Kusagur, S. F. Kodad, B. V. Sankar Ram // *International Journal of Computer Science and Network Security*. – 2009. – Vol. 9, No. 1. – P. 74 – 80.
10. Seifi, A. A Switch-Source Cell-Based Cascaded Multilevel Inverter Topology with Minimum Number of Power Electronics Components / A. Seifi, M. Hosseinpour, A. Dejamkhooy // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. – 2021. – Vol. 43, No. 5. – P. 9 – 12. doi: 10.1177/0142331220974137
11. Peddapelli, S. K. Pulse Width Modulation. Analysis and Performance in Multilevel Inverters / S. K. Peddapelli. – De Gruyter Oldenbourg, 2016.
12. Matlab Simulation Study and Comparison of Different Multiple Carrier PWM Schemes For Multi-Level CHB Inverter / S. Singh, A. Agnihotri, S. Bind, S. Kumar // *Proceedings of the First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, 25–26 September 2020, Nagpur, India. – IEEE, 2020. – 6 p. doi:10.1109/STPEC49749.2020.9297693

13. Kavali, J. Analysis of Various Control Schemes for Minimal Total Harmonic Distortion in Cascaded H-bridge Multilevel Inverter / J. Kavali, A. Mittal // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2016. – Vol. 3, Issue 3. – P. 428 – 441. doi: 10.1016/j.jesit.2016.01.007

14. Maheshwari, R. A Novel Approach to Generate Effective Carrier-Based Pulse width Modulation Strategies for Diode-Clamped Multilevel DC±AC Converters / R. Maheshwari, S. Busquets-Monge, J. Nicolas-Apruzzese // Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Vol. 63, Issue 11. – P. 7243 – 7252. doi: 10.1109/TIE.2016.2538198

15. Prabaharan, N. Comparative Analysis of Symmetric and Asymmetric Reduced Switch MLI Topologies Using Unipolar Pulse width Modulation Strategies / N. Prabaharan, K. Palanisamy // IET Power Electronics. – 2016. – Vol. 9, Issue 15. – P. 2808 – 2823. doi: 10.1049/iet-pel.2016.0283

Der dreistufige Dioden-Klemme-Gleichwechler mit einem Impulsgenerator und Pulsweitenmodulation

Zusammenfassung: Um eine effiziente Logiksteuerung zu demonstrieren, sind dreistufige Dioden-Klemm-Wechselrichter (DCI) unter Verwendung von zwei verschiedenen Schalttechnologien, Pulsgeneratoren (PG) und Pulsweitenmodulation (PWM) unter Verwendung des MATLAB Simulink-Softwarepakets für Berechnungen entworfen und gebaut. Es ist angenommen, dass das PG ein Rechteckimpulssignal sendet, das sich durch die Sequenz und Hochwertigkeit auszeichnet. Die am besten geeigneten Modifikationsverfahren für solche elektrischen Wandler sind die Verwendung von PG und PWM, die für hochintensive MOSFET-Schaltvorrichtungen verwendet werden.

Onduleur à diode à trois niveaux avec un générateur d'impulsions et modulation de largeur d'impulsion

Résumé: Pour démontrer un contrôle logique efficace, sont conçus et construits des onduleurs à diodes à trois niveaux (DTR) utilisant deux technologies de commutation de circuits différentes, le générateur d'impulsions (GI) et la modulation de largeur d'impulsion (PLI), avec le logiciel MATLAB Simulink. On pense que GI envoie un signal d'impulsion rectangulaire qui se distingue par une séquence et une haute qualité. Les méthodes les plus appropriées pour modifier de tels transducteurs électriques sont l'utilisation de GI et PLI, qui sont appliquées aux dispositifs de commutation MOSFET à haute intensité.

Авторы: *Лешелак Ахмед* – аспирант кафедры «Электроэнергетика»; *Уссама Беларусси* – аспирант кафедры «Электроэнергетика»; *Шауки Илиес* – аспирант кафедры «Электроэнергетика»; *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика»; ФГБОУ ВО «ГТТУ», Тамбов, Россия.

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО ПАРАМЕТРА ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ В НЕКОТОРОЙ СТРУКТУРЕ ВРЕМЕННЫХ СООТНОШЕНИЙ

Е. И. Алгазин

*Кафедра «Электроника и электротехника», evgeniialgazin@gmail.com;
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
Новосибирск, Россия*

Ключевые слова: линейная система автоматики; поворотный множитель; структуры временных соотношений.

Аннотация. Исследованы вопросы возможности наблюдения параметра U_C (напряжения на конденсаторе), сформированного в любой из трех структур времени. Показаны варианты формирования мгновенного значения исследуемого параметра как для цепей с обычным резистивным элементом, так и с элементом, обладающим отрицательным сопротивлением. Используются подходы и понятия электротехники и математический аппарат теории функции комплексной переменной, применительно к линейным системам автоматики.

Введение

В данной работе исследуемым параметром является напряжение на конденсаторе U_C в цепи, состоящей из последовательно соединенных резистора и емкости, предварительно заряженной до напряжения U_0 [1].

Существует несколько форм представления исследуемого параметра: экспоненциальная, тригонометрическая и алгебраическая. Еще одна форма, получаемая из экспоненциальной формы исследуемого параметра, называется *мгновенные значения параметра*.

Имея электрическую цепь линейной системы автоматики (ЛСА), можно получить аналитическое выражение исследуемого параметра в требуемой структуре временных соотношений [2]. Выражение, полученное с учетом такой структуры, позволяет сформировать конечное аналитическое выражение исследуемого параметра U_C , реализованное в вещественной структуре.

Получить в расчетном виде требуемые аналитические выражения инструментально – не очень сложная задача. Она сводится к использованию формулы Эйлера, с помощью которой экспонента с мнимым показателем сводится к сумме тригонометрических функций. Более сложной задачей является построение электрической схемы, формирующей требуемый закон изменения исследуемого параметра. В этом случае целесообразно начать с качественного решения задачи, заключающегося в нахождении конфигурации электрической ЛСА, обеспечивающей формирование требуемого либо близкого к требуемому закону изменения напряжения U_C .

Следует отметить важный аспект – в мнимой структуре времени при наличии резистора имеет место отсутствие диссипации, так как в показателе экспоненты корень, умноженный на мнимое время тождественен мнимому корню, умноженному на вещественное время. А мнимый корень обуславливает незатухающие процессы, свойственные исследуемому параметру.

Цель работы – найти аналитические выражения мгновенных значений U_C в пилотной цепи с учетом структуры временных соотношений, с использованием методов и подходов, свойственных электротехнике и понятных большинству технических специалистов, а также положений теории комплексных чисел и функций комплексного переменного.

Постановка задачи

Дана пилотная цепь, состоящая из последовательно соединенных резистора, обладающего сопротивлением R , и конденсатора, обладающего емкостью C . Конденсатор предварительно заряжен до напряжения U_0 . В дальнейшем такая цепь будет называться $R-C-0-U_0$.

Приняты следующие допущения:

- все элементы рассматриваемой цепи сосредоточенные и линейны;
- существует мнимая, комплексная и вещественная структуры времени.

Необходимо:

1. Использовать выражение исследуемого параметра $U_C(t) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}$ для формирования и анализа выражения мгновенного значения U_C во всех трех структурах.
2. Для полноты оценки структур времени дополнить описание U_C выражением мгновенного значения в цепи $R-C-0-U_0$ в каждой структуре времени.
3. Используя энергетический критерий вида

$$\frac{CU_0^2}{2} - R \int_0^{T_{\text{дисс}}} i^2(t) dt = \epsilon ps,$$

где ϵps – константа порядка $10^{-3} \dots 10^{-5}$, позволяющая качественно оценить время диссипации $T_{\text{дисс}}$ в каждой структуре времени.

Пути решения

Сформируем выражения для мгновенных значений исследуемого параметра во всех трех структурах времени.

В структуре jt :

$$U_C(jt) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}jt} = U_0 \cos\left(\frac{1}{RC}t\right) - jU_0 \sin\left(\frac{1}{RC}t\right) = a(t) + jb(t),$$

где $a(t)$, $b(t)$ – соответственно вещественная и мнимая части $U_C(jt)$;

$$U_m(t) = \sqrt{a^2(t) + b^2(t)}, \quad \varphi(t) = \arctg\left(-\frac{b(t)}{a(t)}\right),$$

где $U_m(t)$ – модуль; $\varphi(t)$ – фаза исследуемого параметра.

Выражение мгновенного значения U_C для пилотной цепи $R-C-0-U_0$ в структуре jt , сформированное в вещественном времени t , примет вид

$$U_C(jt) = U_m(t) \sin\left(\frac{1}{RC}t - \varphi(t)\right).$$

В структуре $t + jt$:

$$U_C(t + jt) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t - j\frac{1}{RC}t} = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \cos\left(\frac{1}{RC}t - jU_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \sin\left(\frac{1}{RC}t\right)\right) = e^{-\frac{1}{RC}t} (a(t) - jb(t)),$$

где $a(t)$, $b(t)$ – соответственно вещественная и мнимая части $U_C(t + jt)$;

$$U_m(t) = \sqrt{a^2(t) + b^2(t)}, \quad \varphi(t) = \operatorname{arctg}\left(-\frac{b(t)}{a(t)}\right).$$

Выражение для мгновенного значения U_C для пилотной цепи R–C–0– U_0 в структуре $t + jt$, сформированное в вещественном времени, следующее:

$$U_C(t + jt) = U_m(t) e^{-\frac{1}{RC}t} \sin\left(\frac{1}{RC}t - \varphi(t)\right).$$

В структуре t выражение для мгновенного значения U_C для пилотной цепи R–C–0– U_0 , сформированное в вещественном времени, имеет вид

$$U_C(t) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

Следует различать вещественную структуру временных соотношений t и параметр t под знаком \sin . Такой параметр измеряется независимым временем t хронометра независимого наблюдателя. В вещественной структуре t время описывается вещественной переменной t , которая измеряется аналогично.

Сформируем окончательные выражения для мгновенных значений исследуемого параметра U_C , находящегося в структурах jt , $t + jt$ или t в виде функции, зависящей от t . Обычно в качестве такой функции используют тригонометрическую функцию $\sin\left(\frac{1}{RC}t\right)$.

В структуре jt :

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg}\left(-\frac{b(t)}{a(t)}\right) = \operatorname{arctg}\left(-\frac{\sin\left(\frac{1}{RC}t\right)}{\cos\left(\frac{1}{RC}t\right)}\right) = -\operatorname{arctg}\left(\operatorname{tg}\left(\frac{1}{RC}t\right)\right) = -\frac{1}{RC}t;$$

$$U_m(t) = \sqrt{a^2(t) + b^2(t)} = \sqrt{U_0^2 \cos^2\left(\frac{1}{RC}t\right) + U_0^2 \sin^2\left(\frac{1}{RC}t\right)} = \sqrt{U_0^2 \left(\cos^2\left(\frac{1}{RC}t\right) + \sin^2\left(\frac{1}{RC}t\right)\right)} = \sqrt{U_0^2 \cdot 1} = U_0.$$

Таким образом, требуемое представление для исследуемого параметра в структуре jt будет иметь следующий вид:

$$U_C(jt) = U_m(t) \sin\left(\frac{1}{RC}t - \varphi(t)\right) = U_0 \sin\left(\frac{1}{RC}t - \frac{1}{RC}t\right) = U_0 \sin(0) = 0.$$

На рисунке 1 изображен исследуемый параметр $U_C(jt)$.

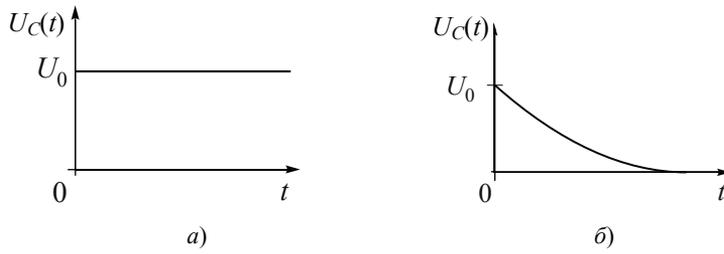


Рис. 1. Мгновенные значения $U_C(jt)$, $U_C(t + jt)$ (а) и $U_C(t)$ (б) в структуре t

В структуре $t + jt$:

$$\varphi(t) = \arctg\left(-\frac{b(t)}{a(t)}\right) = \arctg\left(-\frac{\sin\left(\frac{1}{RC}t\right)}{\cos\left(\frac{1}{RC}t\right)}\right) = -\arctg\left(\operatorname{tg}\left(\frac{1}{RC}t\right)\right) = -\frac{1}{RC}t;$$

$$U_m(t) = \sqrt{a^2(t) + b^2(t)} = \sqrt{U_0^2 \cos^2\left(\frac{1}{RC}t\right) + U_0^2 \sin^2\left(\frac{1}{RC}t\right)} =$$

$$= \sqrt{U_0^2 \left(\cos^2\left(\frac{1}{RC}t\right) + \sin^2\left(\frac{1}{RC}t\right)\right)} = \sqrt{U_0^2 \cdot 1} = U_0.$$

Таким образом, требуемое представление для исследуемого параметра в структуре $t + jt$ будет иметь следующий вид:

$$U_C(t + jt) = U_m(t) e^{-\frac{1}{RC}t} \sin\left(\frac{1}{RC}t - \varphi(t)\right) =$$

$$= U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \sin\left(\frac{1}{RC}t - \frac{1}{RC}t\right) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \sin(0) = 0.$$

Исследуемый параметр $U_C(t + jt)$ имеет такую же картину что и для $U_C(jt)$ (см. рис. 1, а).

В структуре t

$$U_C(t) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

На рисунке 1, б, изображена затухающая экспонента.

Таким образом, можно использовать поворотный множитель, чтобы перевести U_C в требуемую структуру времени.

Необходимо также получить выражение для мгновенного значения U_C , находящегося в структуре jt или $t + jt$ в вещественном времени.

Для мгновенных значений и для U_C в структурах jt , $t + jt$ и t должно выполняться равенство: при $t = 0$ $U_C = U_0$.

В структуре jt :

$$U_C(jt) = U_0 e^{-jt \frac{1}{RC}};$$

при $t = 0$

$$U_C(jt) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}j \cdot 0} = U_0 \cdot 1 = U_0.$$

В структуре $t + jt$:

$$U_C(t + jt) = U_0 e^{-\frac{(t+jt)}{RC}};$$

при $t = 0$

$$U_C(t + jt) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}(0+j0)} = U_0 \cdot 1 = U_0.$$

В структуре t :

$$U_C(t) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t};$$

при $t = 0$

$$U_C(t) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}0} = U_0 \cdot 1 = U_0.$$

Следовательно, при выборе представления мгновенного значения U_C , находящегося в структуре jt и $t + jt$, необходимо выбирать функцию косинус, а не синус.

Тогда получим:

В структуре jt

$$U_C(jt) = U_0 \cos\left(\frac{1}{RC}t - \frac{1}{RC}t\right) = U_0 \cos(0) = U_0 \cdot 1 = U_0.$$

В структуре $t + jt$

$$U_C(t + jt) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \cos\left(\frac{1}{RC}t - \frac{1}{RC}t\right) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \cos(0) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t} \cdot 1 = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

В структуре t

$$U_C(t) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

Графики исследуемого параметра, находящегося в структурах jt , $t + jt$ и t совпадают (см. рис 1, 2). При этом в структуре jt отсутствует диссипация, а $t + jt$ и t – имеет место быть. Параметр представлен мгновенными значениями в структуре t .

Сформируем поворотный множитель для структуры jt . Воздействуя им на исследуемый параметр U_C в структуре t , получим $U_C(t) = U_0$ без затухания при всех значениях $t \in [0, \infty]$, при этом наблюдаем мгновенные значения $U_C(jt)$ в структуре t .

Сформируем поворотный множитель для структуры $t + jt$. Воздействуя им на исследуемый параметр U_C в структуре t , получим $U_C(t) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}$ с затуханием при всех значениях $t \in [0, \infty]$, при этом наблюдаем мгновенные значения $U_C(t + jt)$ в структуре t .

В структуре t наблюдаем параметр $U_C(t) = U_0 e^{-\frac{1}{RC}t}$ непосредственно.

Как видим, в структуре jt отсутствует свободная составляющая исследуемого параметра U_C в цепи $R-C-0-U_0$. Поэтому переходного процесса нет.

Длительность функционирования равна либо от момента включения до ∞ , либо от момента включения t_0 до времени выключения ключа $t_{\text{выкл}}$.

Рассмотрим вышеописанные аналитические выражения при условии $R < 0$ как для синусного, так и косинусного представления мгновенных значений исследуемого параметра U_C , сформированного во всех трех структурах временных соотношений.

В структуре jt :

$$R(t) = U_0;$$

$$\varphi(t) = \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \left(\frac{1}{RC} t \right) \right) = \frac{1}{RC} t;$$

$$U_C(jt) = R(t) \sin \left(\frac{1}{RC} t + \frac{1}{RC} t \right) = U_0 \sin \left(\frac{2}{RC} t \right)$$

либо

$$R(t) = U_0; \quad \varphi(t) = \frac{1}{RC} t;$$

$$U_C(jt) = R(t) \cos \left(\frac{1}{RC} t + \frac{1}{RC} t \right) = U_0 \cos \left(\frac{2}{RC} t \right).$$

В структуре $t + jt$:

$$R(t) = U_0 e^{\frac{1}{RC} t}; \quad \varphi(t) = \frac{1}{RC} t;$$

$$U_C(t + jt) = U_0 e^{\frac{1}{RC} t} \sin \left(\frac{2}{RC} t \right)$$

либо

$$R(t) = U_0 e^{\frac{1}{RC} t}; \quad \varphi(t) = \frac{1}{RC} t;$$

$$U_C(t + jt) = U_0 e^{\frac{1}{RC} t} \cos \left(\frac{2}{RC} t \right).$$

В структуре t

$$U_C(t) = U_0 e^{\frac{1}{RC} t}.$$

Используя энергетический критерий вида $\frac{CU_0^2}{2} - R \int_0^{T_{\text{дисс}}} i^2(t) dt = 0$, оценим

$T_{\text{дисс}}$ во всех трех структурах.

В структуре jt – нет диссипации при наличии R . Такое возможно лишь в случае, когда $T_{\text{дисс}} = 0$, то есть время диссипации никогда не начинается, и

$$R \int_0^{T_{\text{дисс}}=0} i^2(t) dt = 0$$

как в вещественной, так и мнимой частях $U_C(jt)$.

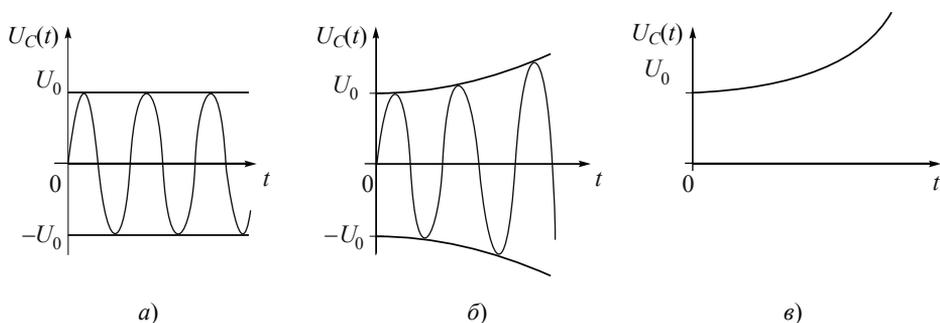


Рис. 2. Мгновенные значения U_C структур jt (а), $t + jt$ (б) и t (в) в структуре t

В структуре $t + jt$: за счет убывающей экспоненты $e^{-\frac{1}{RC}t}$ исследуемый параметр $U_C(t + jt)$ убывает в обеих частях $U_C(t + jt)$. Время полной диссипации энергии $T_{\text{дисс}} \neq 0$. Но $T_{\text{дисс}}$ конечно, так как нет источника питания. Оценка $T_{\text{дисс}}$ осуществляется отдельно в рассматриваемых частях $U_C(t + jt)$.

В структуре t : за счет убывающей экспоненты $e^{-\frac{1}{RC}t}$ исследуемый параметр убывает в вещественной части $U_C(t)$. Мнимая часть $U_C(t)$ равна нулю. Время полной диссипации энергии $T_{\text{дисс}} \neq 0$. Но $T_{\text{дисс}}$ конечно, так как нет источника питания. Оценка $T_{\text{дисс}}$ осуществляется только в вещественной части $U_C(t)$.

В структуре jt : нет диссипации при наличии $-R$. Возможно при $T_{\text{дисс}} = 0$.

В структуре $t + jt$: за счет возрастающей экспоненты $e^{\frac{1}{RC}t}$ исследуемый параметр U_C возрастает.

В структуре t : за счет возрастающей экспоненты $e^{\frac{1}{RC}t}$ исследуемый параметр U_C возрастает.

На рисунке 2 изображены графики исследуемого параметра, находящегося в структурах jt , $t + jt$ и t . Во всех трех случаях диссипация отсутствует. Использовано синусное представление U_C . Параметр представлен мгновенными значениями в структуре t .

Результаты

В настоящей работе в ходе исследования получены следующие результаты.

1. Получены аналитические выражения мгновенных значений $U_C(t)$ для цепи $R-C-0-U_0$ при всех трех структурах временных соотношений.

2. Проведена оценка длительности времени полной диссипации энергии $T_{\text{дисс}}$ для предложенного энергетического критерия в цепи $R-C-0-U_0$ во всех трех структурах временных соотношений.

3. Прежде чем получить мгновенные значения $U_C(jt)$ или $U_C(t + jt)$, необходимо повернуть $U_C(t)$ с помощью поворотного множителя в структуру jt или $t + jt$, после чего формировать мгновенные значения U_C в данных структурах.

4. Все операции п. 3 необходимо выполнить на протяжении интервала $T_{\text{дисс}}$ – времени полной диссипации энергии в рассматриваемой структуре.

5. Следует также рассмотреть вариант непосредственного формирования мгновенных значений исследуемого параметра в требуемой структуре.

Выводы

Дополнен набор инструментов, позволяющих проводить анализ ЛСА и использовать их для решения поставленной в данной работе задачи. Предложенный набор инструментов можно использовать в дополнение к уже существующим инструментам. Увеличение порядка пилотной цепи не ведет к качественно новым результатам исследования, а только лишь усложняет получение результата. Поэтому рассмотрены только цепи ЛСА первого и второго порядка без потери общности.

Дальнейшее развитие инструментов анализа состояния ЛСА заключается в формировании и моделировании структурных схем, обеспечивающих нахождение исследуемого параметра в требуемой структуре времени либо перевод этого параметра из текущей структуры в требуемую, что позволяет перейти к формированию и синтезу электрических принципиальных схем. Наблюдатель, находящийся в вещественной структуре времени, может измерять мгновенные значения U_C как функции от t , тогда как U_C находится в структуре jt или $t + jt$.

Список литературы

1. Веселовский, О. Н. Основы электротехники и электротехнические устройства радиоэлектронной аппаратуры : учеб. пособие для вузов / О. Н. Веселовский, Л. М. Браславский. – М. : Высш. школа, 1977. – 312 с.
2. Алгазин, Е. И. Особенности описания линейных систем автоматизации при различных структурах временных соотношений / Е. И. Алгазин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 388 – 392. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.388-392

On the Possibility of Observing the Investigated Parameter of Linear Automation Systems in a Certain Structure of Time Relations

E. I. Algazin

*Department of Electronics and Electrical Engineering, evgenialgazin@gmail.com;
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

Keywords: linear automation system; rotary multiplier; timing structures.

Abstract: The issues of the possibility of observing the U_C parameter (capacitor voltage) formed in any of the three time structures are investigated. Variants of forming the instantaneous value of the parameter under study are shown both for circuits with an ordinary resistive element and with an element with negative resistance. The approaches and concepts of electrical engineering and the mathematical apparatus of the theory of the function of a complex variable are used, as applied to linear automation systems.

References

1. Veselovskiy O.N., Braslavskiy L.M. *Osnovy elektrotehniki i elektrotekhnicheskoye ustroystva radioelektronnoy apparatury: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Fundamentals of electrical engineering and electrical devices of electronic equipment: a textbook for high schools], Moscow: Vysshaya shkola, 1977, 312 p. (In Russ.)

2. Algazin Ye.I. [Features of the description of linear automation systems with different structures of temporal relationships], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 388-392, doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.388-392 (In Russ., abstract in Eng.)

Über die Möglichkeit der Beobachtung des zu untersuchenden Parameters der linearen Automatisierungssysteme in einer bestimmten Struktur von Zeitverhältnissen

Zusammenfassung: Es sind Fragen zur Beobachtungsmöglichkeit des in jeder der drei Zeitstrukturen gebildeten Parameters U_C (Kondensatorspannung) untersucht. Es sind Optionen für die Bildung eines momentanen Werts des zu untersuchenden Parameters sowohl für Schaltungen mit einem herkömmlichen Widerstandselement als auch für ein Element mit einem negativen Widerstand gezeigt. Die Ansätze und Konzepte der Elektrotechnik und der mathematische Apparat der Theorie der Funktionen der komplexen Variablen sind in Bezug auf lineare Automatisierungssysteme verwendet.

Sur la possibilité d'observation du paramètre étudié des systèmes d'automatisation linéaires dans une certaine structure des rapports temporels

Résumé: Est étudiée la possibilité d'observer le paramètre U_C (tension aux bornes du condensateur) formé dans l'une des trois structures temporelles. Sont présentées les options pour la formation de la valeur instantanée du paramètre étudié pour les circuits avec un élément résistif ordinaire et ceux avec un élément ayant une résistance négative. Sont utilisés les approches et les concepts de l'Ingénierie électrique et l'appareil mathématique de la théorie des fonctions d'une variable complexe appliqués aux systèmes linéaires d'automatisation.

Автор: *Алгазин Евгений Игоревич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника и электротехника», ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ СЛОЕВ
В РАСЧЕТЕ КИНЕТИКИ СУШКИ
ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ НА ПОДЛОЖКАХ**

А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,
panpost@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: алгоритм; диффузия; жидкие дисперсные продукты; испарение; кинетика; массообмен; подложка; слой; сушка; теплообмен; теплопроводность.

Аннотация: Представлен анализ кинетических кривых сушки, формирующихся при высушивании на подложках жидких дисперсных продуктов. Выявлены основные особенности термограмм, связанные с процессом структурообразования в процессе нагрева и испарения высыхающего слоя продукта. На основании анализа состояния продукта в процессе сушки жидких дисперсных систем на подложках выявлено формирование специфических подслоев в высыхающей жидкости. Показано, что новые подслои формируются или вырождаются в зависимости от характера температурного поля и поля влажности. Предложен алгоритм выделения и эволюции таких подслоев в высыхающем продукте. Представлены результаты применения предлагаемого метода расчета кинетики сушки с учетом разработанного алгоритма формирования/вырождения слоев для расчета кинетики сушки жидкой послеспиртовой барды на подложке.

Обозначения

T_p, T_3 – соответственно расчетная и экспериментальная температуры, °С	δ – толщина подложки, мм;
T_c – температура сушильного агента, °С	$\delta_{\text{дисп}}$ – расчетная толщина высыхающего слоя, м;
g_p, g_3 – соответственно расчетная и экспериментальная убыль влаги, г;	τ – время, с;
	w – скорость, сушильного агента, м/с

Для моделирования процессов теплопроводности (диффузии) в материалах, подвергаемых сушке, необходимо классифицировать формы высушиваемых продуктов с геометрической точки зрения. Традиционно реальные формы высушиваемых материалов приводят к одной из канонических форм, к которым относят:

- пластину: по размерам выделяют конечноразмерные и бесконечные; по количеству слоев – одно- и многослойные;
- шар: по количеству слоев в теле – одно- и многослойные;
- цилиндр: по размерам – конечноразмерные и бесконечные; по количеству слоев – одно- и многослойные.

При моделировании тепловых и массообменных процессов возможно рассмотрение физически однослойного тела как многослойного. Такое искусственное выделение слоев оправдано при наличии в теле значительных градиентов температур и/или концентраций и сильной зависимости теплофизических свойств материала от них.

Как показывают результаты моделирования процессов сушки и термообработки дисперсных продуктов на подложках, выделение в материале слоев различной толщины позволит получить более корректное описание исследуемого процесса [1 – 5, 10]. Особенностью подобного выделения отдельных слоев в физически однослойном теле является возможность изменения количества и размеров слоев в процессе расчета. При этом появление или вырождения заданного слоя должно иметь под собой четкий физический смысл.

Для демонстрации физического механизма формирования и вырождения отдельных слоев в высушиваемом материале выбраны следующие характерные жидкие дисперсные продукты: послеспиртовая барда, мясокостная жидкость, жидкий пластификатор бетона на основе полиметиленафталинсульфонатов. В работах [2, 5 – 8, 11, 12] определены основные теплофизические свойства рассматриваемых жидких дисперсных продуктов и получены характерные термограммы их сушки на подложках.

На рисунке 1 представлены характерные термограммы, формирующиеся в процессе сушки исследуемых продуктов при выбранных режимах, где кривые приведены к единому масштабу по времени.

Термограмма сушки мясокостной жидкости является термограммой классической сушки простого капиллярно-пористого тела [3, 11, 12]. В процессе сушки мясокостной жидкости жидкая фаза не формирует на поверхности и в объеме тела никаких структур (пленок, агломератов, корок и т.п.). В этом случае для расчета кинетики сушки мясокостной жидкости на подложке систему «жидкость – подложка» можно рассматривать как двухслойную: первый слой – высушиваемая жидкость – изменяет свою толщину в начальном периоде сушки за счет поверхностного испарения влаги и постоянен по толщине во втором периоде; второй – подложка, как правило, монолитная, диффузионно-непроницаемая [12]. Для расчета тепло-массообмена при испарении с поверхности в первом периоде и критического влагосодержания рекомендуется использовать уравнения, полученные в работах [1 – 4].

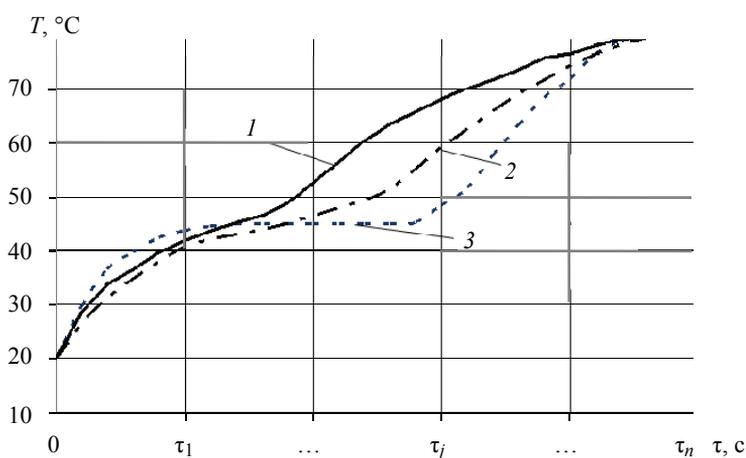


Рис. 1. Характерный вид термограмм сушки исследованных жидких дисперсных продуктов:

1 – пластификатор; 2 – послеспиртовая барда; 3 – мясокостная жидкость

Процесс сушки жидкой послеспиртовой барды можно разделить на отдельные этапы. При этом, в зависимости от этапа, слой высушиваемой жидкости можно разделять на несколько частей. На начальном этапе (от начала процесса сушки до появления на поверхности пленки) слой жидкости рассматривается как однородный, а система «высушиваемый продукт – подложка» – как двухслойная. Аналогично мясокостной жидкости один слой – подложка, второй – жидкость. Второй слой изменяет свою толщину в первом периоде сушки за счет поверхностного испарения влаги [12].

Второй этап характеризуется появлением на поверхности пленки. Характер появления и эволюции пленки в процессе сушки жидкой послеспиртовой барды на подложках подробно исследовался в работах [2, 5, 7, 8]. Там же отмечены характерные изменения термограммы сушки и даны уравнения, позволяющие рассчитать время начала формирования пленки. Таким образом, пленка создает дополнительный слой. Схема высушающей на подложке жидкости становится трехслойной.

Далее в процессе сушки послеспиртовой барды слой пленки эволюционирует в более жесткую структуру – корку, под которой формируется подслой, по своим свойствам схожий со слоем пленки, формирующейся на предыдущем этапе [2, 5, 7, 12]. Кинетика процесса формирования слоя корки и его теплофизические свойства при сушке жидкой послеспиртовой барды исследовались в работах [2, 5, 7, 8]. Соответственно, в высушиваемом материале можно выделить дополнительный слой корки, при этом получаем четырехслойную схему [12].

Дальнейшее ведение процесса приводит к тому, что оставшийся слой жидкости уменьшается до полного исчезновения. Схема высушающего на подложке продукта снова становится трехслойной. При этом на каждом этапе имеем слои разных свойств. В дальнейшем весь слой пленки приобретает свойства корки. Соответственно, можно убрать из рассмотрения один слой, и схема становится двухслойной: первый слой – сухой продукт, второй – подложка [4, 10, 12].

Исходя из анализа физических особенностей формирования определенных структур (для мясокостной жидкости и послеспиртовой барды), можно сделать вывод о возможности постановки задач переноса в многослойных телах канонической формы. Такие постановки позволяют решать подобного рода задачи не только численно, но и аналитически. При этом необходимо учитывать характер изменения геометрических размеров слоев и их свойств.

Процесс сушки жидкого пластификатора на подложке является наиболее сложным для анализа. Первоначально испарение идет с поверхности жидкого продукта, аналогично рассмотренным выше материалам. В определенный момент времени на поверхности испарения начинает формироваться структура – эластичная пленка. Визуально наблюдается пульсация жидкой фазы, находящейся между пленкой и подложкой. В процессе сушки жидкость испаряется из-под пленки с образованием воздушного пространства определенной геометрической формы. Процесс сушки происходит в режиме закрепления контактной линии. Соответственно характеру процесса сушки возможно выделение отдельных слоев в высушающем материале, однако аналитическая постановка задачи переноса для пластификатора (вследствие наличия непредсказуемой геометрической деформации поверхностных слоев) возможна только в упрощенном виде [12].

Рассмотрим характер выделения/сокращения числа слоев. Для динамически изменяющегося числа слоев, в зависимости от механизма процесса, необходимо выделение схем и условий разделения и объединения слоев. Исходя из механизма структурообразования и его отражения на кинетических кривых, предлагаются следующие виды трансформации слоев, используемых в решении задачи переноса и связанных с изменениями в высушающем продукте.

Возможные состояния слоя:

- жидкость;
- пленка;
- объемный остаток (корка).

Соответственно, наиболее удобно делить один слой на два и объединять два слоя в один.

Приведем пример разделения одного слоя на два: слой жидкости 0 разделяется на два: жидкость 1 и жидкость 2 (рис. 2).

В момент разделения слоя: $\delta_0 = \delta_1 + \delta_2$.

В дальнейшем для каждого слоя отдельно рассчитываются теплофизические свойства, граничные условия и толщина слоя по временным интервалам в границах существования слоя.

Границы существования слоя оцениваются по температурному полю. Условие разделения слоя: градиент температуры в начальном слое больше заданного порогового значения. Пороговое значение градиента оценено в $30\text{ }^\circ\text{C}$, исходя из анализа результатов расчетов кинетики сушки для рассматриваемых жидкостей в исследуемом диапазоне режимных параметров по минимизации среднеквадратичного отклонения экспериментальных и расчетных данных (то есть некоторая интегральная характеристика). Блок-схема алгоритма разделения одного слоя на два представлена на рис. 3.

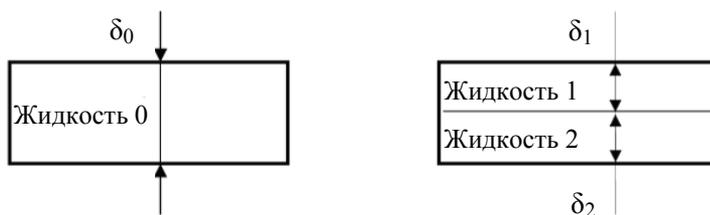


Рис. 2. Схема разделения одного слоя жидкости на два слоя жидкости с разными теплофизическими свойствами и размерами

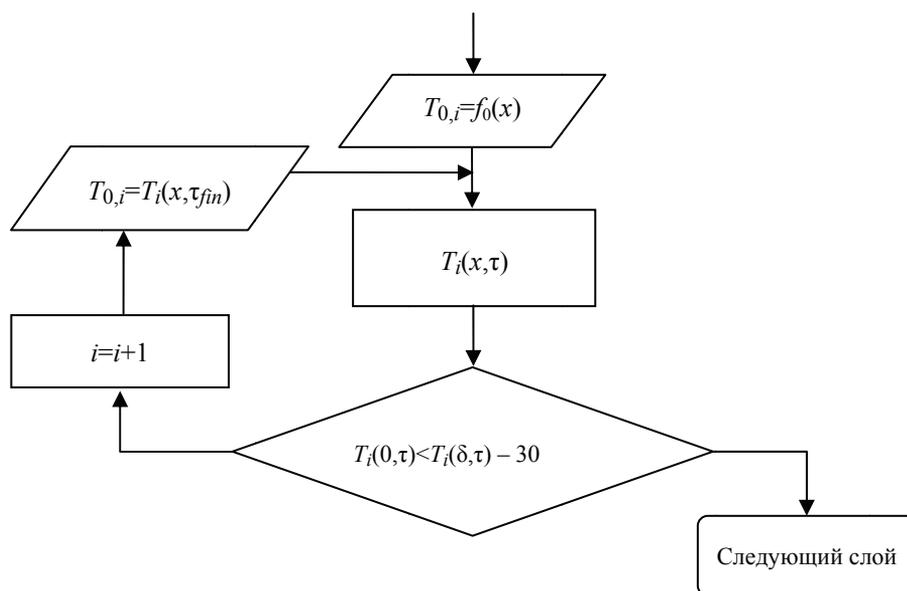


Рис. 3. Алгоритм разделения одного слоя на два

Температурное поле исходного слоя в момент разделения (конечный момент времени для исходного слоя и начальный – для двух формирующихся слоев) формирует температурные поля новых слоев либо в функционально заданном виде (для аналитического решения задачи переноса в виде распределения температуры в конечный момент времени), либо численно по координатам (в зависимости от метода решения, например по сетке). Данное правило справедливо для всех вариантов объединения и разделения слоев.

Расчет кинетики сушки дисперсных продуктов на подложках основан на применении аналитических постановок задач переноса в многослойных телах канонической формы с учетом изменения количества слоев (выделения/сокращения), их теплофизических свойств и размеров. Основное уравнение процесса переноса (теплопроводности/диффузии) в n -слойных телах канонической формы, имеет вид

$$\frac{\partial P(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 P(x, \tau)}{\partial^2 x} + \frac{\Gamma}{x} \frac{\partial P(x, \tau)}{\partial x} \right), \quad (1)$$

в котором принимаем для пластины $\Gamma = 0$, цилиндра $\Gamma = 1$, шара $\Gamma = 2$; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$ [1 – 3].

Постановка задачи переноса (1) должна быть дополнена начальными и граничными условиями. В случае если $n > 1$ необходимо задание стыковых условий между слоями.

Как правило, в большинстве случаев, начальные условия задаются в виде некоторой функциональной зависимости (в явном виде или табличном). Выбор задаваемых граничных условий зависит от вида тепло-массообмена. Обычно граничные условия 1 рода оказываются упрощенными и не позволяют адекватно оценить условия теплообмена на границе (хотя активно используются при простых расчетах). Граничные условия 2 рода обычно применяются при описании интенсивного теплоподвода излучением. Наиболее распространенными являются граничные условия 3 рода, характеризующие конвективный теплообмен. В случае процессов сушки на подложках необходимо применять несимметричные граничные условия. Для многослойных тел обычно используют стыковые условия, представленные как условия идеального теплового контакта.

В случае постоянства тепло-массопереносных свойств, геометрии тела и граничных условий, на некотором временном интервале, получаем линейную замкнутую систему уравнений. Подобные системы уравнений хорошо решаются с применением аналитических (методы Фурье, функций Грина и интегральных преобразований) и численных (методы конечных элементов, конечных разностей) методов. Для получения решения нестационарных задач переноса, сопровождающихся изменением свойств продукта, характера граничных условий, геометрических размеров тела (при сохранении канонической формы) применяем хорошо себя зарекомендовавшие интервальные методы, разработанные и используемые в работах [1 – 5, 9 – 11].

Представим результаты расчета кинетики сушки с учетом разработанного алгоритма формирования/вырождения слоев для жидкой послеспиртовой барды на подложке. Режим сушки – конвективная, $T_c = 80$ °С, $w = 5$ м/с, подложка – фторопласт $\delta = 2$ мм. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных приведены в табл. 1 и на рис.4.

Разработка алгоритма выделения слоев в физически однородном высушиваемом продукте, а также получение зависимостей для временных границ существования слоев позволяют моделировать процессы сушки жидких дисперсных продуктов при наличии поверхностных явлений с использованием аналитических постановок задач переноса в многослойных телах канонической формы и интервальных методов их решений.

**Результаты расчета кинетики сушки жидкой послеспиртовой барды
на мягком режиме**

τ	T_3	T_p	g_3	g_p	$\delta_{\text{дисп}}$	Слои		
0	15,6	15,98	1,34	1,34	0,002	Ж	–	–
30	35,3	36,66	1,12	1,07	0,002		Ж	–
60	38,6	39,64	0,94	0,95	0,0019			Пл
90	39,8	40,70	0,81	0,83	0,00161		Пл	–
120	40,7	41,36	0,68	0,71	0,00138			–
150	41,5	42,28	0,57	0,60	0,00111			–
180	42,2	43,01	0,48	0,50	0,00089			–
210	43,7	43,56	0,42	0,41	0,00064			–
240	46,6	48,51	0,29	0,33	0,00042			–
270	51	55,56	0,24	0,25	0,00038			К
300	57,5	60,39	0,17	0,18	0,00032		Пл	К
330	63,5	63,64	0,13	0,12	0,00026			–
360	70	72,83	0,07	0,07	0,00021			–
390	75	77,31	0,05	0,05	0,0002	–		
420	78	78,31	0,02	0,03		–		
460	79	78,61	0,00	0,01		К	–	
500	80	79,30		0,00	0,00	–		
540	80	80,00	0,00	0,00	0,0002	К	–	

Примечание. Ж – жидкость; К – корка; Пл – пленка.

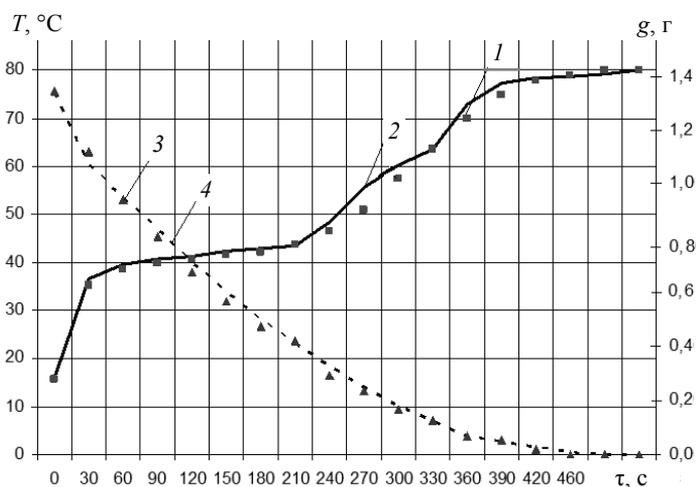


Рис. 4. Результаты расчета кинетики сушки жидкой послеспиртовой барды:

1 – T_3 ; 2 – T_p ; 3 – g_3 ; 4 – g_p

Список литературы

1. Гатапова, Н. Ц. Кинетика и моделирование процессов сушки растворителей, покрытий, дисперсий, растворов и волокнистых материалов: единый подход : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Гатапова Наталья Цибиковна. – Тамбов, 2005. – 554 с.
2. Пахомова, Ю. В. Кинетика сушки капель жидких дисперсий на диффузионно-непроницаемых подложках : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Пахомова Юлия Владимировна. – Тамбов, 2011. – 283 с.
3. Пахомов, А. Н. Развитие научных основ сушки дисперсных материалов, осложненной структурообразованием : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 / Пахомов Андрей Николаевич. – Тамбов, 2020. – 431 с.
4. Пахомов, А. Н. Моделирование и расчет кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2016. – 160 с.
5. Пахомов, А. Н. Сушка капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова. – М. : Перо, 2013. – 122с.
6. О температурных площадках при низко- и высокотемпературной кондуктивно-барабанной сушке влажных материалов / Н. Ц. Гатапова, В. И. Коновалов, А. Н. Колиух, А. Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 4-1. – С. 968 – 977.
7. Пахомова, Ю. В. Особенности механизма и кинетики сушки капель дисперсий (на примере сушки послеспиртовой барды) / Ю. В. Пахомова, В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 70 – 82.
8. Коновалов, В. И. Геометрия, циркуляция и тепломассоперенос при испарении капли на подложке / В. И. Коновалов, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 371 – 387.
9. Пахомов, А. Н. Возможности самоорганизации дисперсных систем при сушке на подложке / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова, Е. А. Ильин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 633 – 637.
10. Пахомов, А. Н. Алгоритм расчета кинетики испарения капли с диффузионно-непроницаемой подложки / А. Н. Пахомов, Е. А. Ильин // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2 (46). – С. 292 – 296.
11. Пахомов, А. Н. Типы кинетических кривых, получаемых при сушке капель жидких дисперсных продуктов / А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Химическая технология. – 2014. – Т. 15, № 10. – С. 620 – 623.
12. Гатапова, Н. Ц. Особенности механизма и кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках / Н. Ц. Гатапова, А. Н. Пахомов, Ю. В. Пахомова // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе : материалы Первых Междунар. Лыковских науч. чтений, посвящ. 105-летию академика А. В. Лыкова, 22–23 сентября 2015 г., Москва. – Курск, 2015. – С. 42 – 47.

Using the Algorithm for Separating Layers in Calculating the Kinetics of Drying Disperse Products on Substrates

A. N. Pakhomov, N. Ts. Gatapova, Yu. V. Pakhomova

*Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety,
panpost@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: algorithm; diffusion; liquid dispersed products; evaporation; kinetics; mass transfer; substrate; layer; drying; heat exchange; thermal conductivity.

Abstract: The analysis of the kinetic curves of drying, which are formed during drying on substrates of liquid dispersed products, is presented. The main features of thermograms associated with the process of structure formation during heating and evaporation of the drying layer of the product are revealed. Based on the analysis of the state of the product in the process of drying liquid dispersed systems on substrates, the formation of specific sublayers in the drying liquid was revealed. It is shown that new sublayers are formed or degenerate depending on the nature of the temperature and humidity fields. An algorithm for the selection and evolution of such sublayers in a drying product is proposed. The results of applying the proposed method for calculating the kinetics of drying, taking into account the developed algorithm for the formation/degeneration of layers for calculating the kinetics of drying liquid distillery stillage on a substrate are presented.

References

1. Gatapova N.Ts. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2005, 554 p. (In Russ.)
2. Pakhomova Yu.V. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2011, 283 p. (In Russ.)
3. Pakhomov A.N. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 2020, 431 p. (In Russ.)
4. Pakhomov A.N., Gatapova N.Ts., Pakhomova Yu.V. *Modelirovaniye i raschet kinetiki sushki zhidkikh dispersnykh produktov na podlozhkakh* [Modeling and calculation of the kinetics of drying liquid dispersed products on substrates], Tambov: Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2016, 160 p. (In Russ.)
5. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. *Sushka kapel' zhidkikh dispersnykh produktov* [Drying drops of liquid disperse products], Moscow: Pero, 2013, 122 p. (In Russ.)
6. Gatapova N.Ts., Konovalov V.I., Koliukh A.N., Pakhomov A.N. [About temperature areas in low- and high-temperature conductive drum drying of wet materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, no. 4-1, pp. 968-977. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Pakhomova Yu.V., Konovalov V.I., Pakhomov A.N. [Peculiarities of the mechanism and kinetics of drying droplets of dispersions (on the example of post-alcohol vinasse drying)], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 1, pp. 70-82. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Konovalov V.I., Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. [Geometry, circulation and heat and mass transfer during droplet evaporation on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 371-387. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V., Il'in Ye.A. [Possibilities of self-organization of dispersed systems during drying on a substrate], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 633-637. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Pakhomov A.N., Il'in Ye.A. [Algorithm for calculating the kinetics of droplet evaporation from a diffusion-impermeable substrate], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2013, no. 2 (46), pp. 292-296. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. [Types of kinetic curves obtained by drying drops of liquid dispersed products], *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2014, vol. 15, no. 10, pp. 620-623. (In Russ.)
12. Gatapova N.Ts., Pakhomov A.N., Pakhomova Yu.V. *Aktual'nyye problemy sushki i termovlazhnostnoy obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse* [Actual problems of drying and

thermal and moisture processing of materials. in various industries and agro-industrial complex], Proceedings of the First International Lykov Scientific Readings dedicated to the 105th anniversary of Academician A. V. Lykov, 22-23 September, 2015, Moscow, Kursk, 2015, pp. 42-47. (In Russ.)

Verwendung des Schichtauswahlalgorithmus bei der Berechnung der Kinetik des Trocknens dispergierter Produkte auf Substraten

Zusammenfassung: Es ist eine Analyse der kinetischen Trocknungskurven vorgestellt, die sich beim Trocknen auf Substraten von flüssig dispergierten Produkten bilden. Die Hauptmerkmale von Thermogrammen, die mit dem Prozess der Strukturbildung während des Erhitzens und Verdampfens der Trocknungsschicht des Produkts verbunden sind, sind aufgezeigt. Auf der Grundlage der Analyse des Produktzustands während der Trocknung von flüssig dispergierten Systemen auf Substraten ist die Bildung spezifischer Unterschichten in der Trocknungsflüssigkeit aufgedeckt. Es ist gezeigt, dass je nach Art des Temperaturfeldes und des Feuchtigkeitsfeldes neue Unterschichten gebildet oder degeneriert werden. Ein Algorithmus für die Auswahl und Entwicklung solcher Unterschichten in einem Trocknungsprodukt ist vorgeschlagen. Es sind die Ergebnisse der Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens zur Berechnung der Trocknungskinetik unter Berücksichtigung des entwickelten Algorithmus für die Bildung/Degeneration von Schichten zur Berechnung der Kinetik der Trocknung von flüssiger Brennereischlempen auf einem Substrat vorgestellt.

Utilisation de l'algorithme de la sélection des couches dans le calcul de la cinétique du séchage des produits dispersés sur substrats

Résumé: Est présentée une analyse des courbes cinétiques du séchage formées lors du séchage sur substrats des produits dispersés liquides. Sont déduites les principales caractéristiques des thermogrammes associés au processus de la formation de la structure dans le processus de chauffage et d'évaporation de la couche du séchage du produit. A la base de l'analyse de l'état du produit dans le processus du séchage des systèmes de dispersion liquide sur les substrats, est révélée la formation des sous-couches spécifiques dans le liquide d'extraction. Est démontré que de nouvelles sous-couches se forment ou dégèrent en fonction de la nature du champ de température et du champ d'humidité. Est proposé l'algorithme de la sélection et de l'évolution de telles sous-couches dans le produit du séchage. Sont présentés les résultats de l'application de la méthode proposée du calcul de la cinétique du séchage en tenant compte de l'algorithme élaboré de la formation/dégénérescence des couches pour le calcul de la cinétique du séchage de la barde post-alcool liquide sur substrat.

Авторы: *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пахомова Юлия Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ПГТУ», Тамбов, Россия.

КИНЕТИКА И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТВЕРДОФАЗНОЙ БИОКОНВЕРСИИ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В. Н. Долгунин, Д. А. Власов, В. А. Пронин

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
dolgunin-vn@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: биоконверсия; статический и статико-динамический режим; твердофазное ферментирование; целлюлозосодержащее сырье.

Аннотация: Проведено исследование кинетики твердофазной биоконверсии целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме ферментирования. Исследовано влияние интенсивности перемешивания на кинетические закономерности процесса ферментирования с использованием микроскопического гриба *Trichoderma viride*. Определены параметры мягкого динамического воздействия на ферментативную среду, обеспечивающего наиболее высокую эффективность статико-динамического режима твердофазной биоконверсии.

Производства макро- и микроскопических грибов, а также их продуцентов для нужд различных отраслей промышленности, медицины, сельского хозяйства и агропромышленного комплекса испытывают острую потребность в твердофазных субстратах с регламентными показателями качества. Например, дефицит качественного субстрата для культивирования макроскопических грибов продовольственного назначения приводит к необходимости использования импортного сырья, что сопровождается трехкратным снижением рентабельности производства [1]. Основным препятствием для полного импортозамещения зарубежного субстрата является отсутствие технологической базы, необходимой для осуществления процессов ферментации дисперсной твердой фазы.

Это связано с тем, что различные отрасли промышленности, агропромышленного комплекса и сельского хозяйства связаны с переработкой растительного сырья, сопровождаемой образованием больших объемов целлюлозосодержащих отходов (отходов деревообработки и растениеводства, лузги масличных и крупяных культур, кукурузных кочерыжек и др.). Несмотря на то что такого рода отходы могут служить источником сырья для производства высококачественного биотехнологического субстрата, богатого углеводами и аминокислотами, значительная их часть утилизируется способами (сжиганием, формированием отвалов и т.д.), целесообразность которых не подтверждается ни экономическими ни экологическими критериями.

Такое положение сохраняется несмотря на то, что в большинстве случаев растительные отходы характеризуются богатым сырьевым потенциалом с разнообразным компонентным составом, включающим углеводы, белки, жиры, неорганические соли при обычно относительно большом содержании полисахаридов

в виде смеси целлюлозы (15 – 60 %), гемицеллюлозы (10 – 30 %) с примесью органического полимера – лигнина (5 – 30 %) [2]. Для конверсии подобного рода отходов в качественное сырье для биотехнологий первостепенное значение имеет перевод целлюлозосодержащих компонентов в легко усвояемую форму, организация которого традиционными способами (кислотного гидролиза и глубинного жидкофазного культивирования) сопряжена со значительными технологическими проблемами. Соответствующие производства характеризуются низкой рентабельностью вследствие недостаточно высокого выхода целевого продукта, значительной энергоемкости и больших объемов трудно утилизируемых отходов [1, 2].

Результаты исследований свидетельствуют, что значительную часть перечисленных недостатков возможно преодолеть при использовании твердофазной ферментации целлюлозосодержащего сырья, которая по сравнению с глубинной ферментацией характеризуется низким водопотреблением, высокими значениями удельной производительности и концентрации биопродукта, малыми энергозатратами и значительным снижением остроты проблемы утилизации отходов [3, 4]. Важным преимуществом твердофазной ферментации целлюлозосодержащего сырья является также возможность ее реализации с применением экономичных относительно простых и надежных конструкций биореакторов [3, 4].

В работах [5, 6] обоснована целесообразность организации твердофазного ферментирования целлюлозосодержащего сырья на основе отходов деревообрабатывающего производства в динамическом режиме с использованием целлюлолитических ферментов, являющихся продуктом метаболизма культуры микроскопического гриба *Trichoderma viride*. В результате исследований подтверждены преимущества ферментирования в динамическом режиме при мягком механическом воздействии на мицелий микроскопического гриба по сравнению со статическим ферментированием по комплексу основных показателей эффективности.

Динамический режим ферментирования реализован в аппарате с гладким вращающимся барабаном, особенностью которого является возможность выполнения функции универсальной единицы оборудования, адаптированной для организации процессов смешивания субстрата, его стерилизации, однородного распределения посевного материала, ферментирования и сушки белоксодержащего продукта [7, 8]. Целесообразность применения универсального оборудования в обсуждаемой технологии подтверждается абсолютным доминированием продолжительности операции ферментализации в общем технологическом цикле. Установлено, что объемное аэрирование и перемешивание ферментативной среды в мягком режиме в процессе биокаталитического гидролиза способствует его интенсификации при увеличении массы плодовых тел, однородности их распределения и снижению спорообразования по сравнению со статическим ферментированием.

Вместе с тем на фоне полной определенности сравнительных характеристик статического и динамического режимов полностью отсутствует понимание степени влияния интенсивности перемешивания на эффективность биоконверсии. Ответ на данный вопрос представляется чрезвычайно важным, поскольку, очевидно, существует некоторое предельное значение интенсивности перемешивания, с увеличением которой будет усиливаться негативный эффект механического воздействия на мицелий микроскопического гриба, приводящий к разрушению плодовых сред и доминированию спорообразования. Результаты исследования, представленные в работах [5, 6], отражают кинетические закономерности процесса биоконверсии в динамическом режиме ферментирования, для которого параметры механического воздействия на культуру определены исключительно интуитивным образом.

В рамках настоящей статьи представлены результаты экспериментального исследования, посвященного определению условий перемешивания ферментативной среды в биореакторе с вращающимся барабаном, при которых достигается предельная концентрация ростовых факторов, наиболее благоприятная для протекания ферментативного гидролиза целлюлозосодержащего сырья. Простейший анализ процесса перемешивания ферментативной среды во вращающемся барабане, организованного в эксперименте по биоконверсии [5, 6] в режиме мягкого механического воздействия, указывает на то, что относительное перемещение элементов среды происходило только на этапах периодического гравитационного обрушения засыпки материала. В условиях чрезвычайно малой скорости вращения барабана периоды между обрушениями оказываются продолжительными и измеряются многими десятками минут. С учетом же того, что при каждом обрушении перемешиванию подвергалась только ограниченная часть засыпки материала в барабане, то средняя продолжительность циклов перемешивания ферментативной среды составляла более половины суток. Изложенные особенности процесса перемешивания при биоконверсии среды, позволяют вполне обоснованно утверждать, что в рамках проведенного эксперимента [5, 6] ферментирование протекало в статико-динамическом режиме. Отсюда следует, что для характеристики технологических условий, благоприятных для организации процесса твердофазного ферментализа, необходимо внести определенность в продолжительность периодов между операциями перемешивания ферментативной среды.

Исследование кинетики процесса твердофазного ферментализа проведено с использованием субстрата, представляющего смесь опилок лиственных пород деревьев, пшеничных отрубей и солодового экстракта [5]. Ферментализ осуществляется под воздействием целлюлолитических ферментов, продуцируемых штаммом микроскопического гриба *Trichoderma viride*, который вводится в стерильный субстрат в виде водной 28,5%-й суспензии спор в количестве 10 % от его массы.

В целях формирования базы для сравнительных оценок вариантов организации процесса ферментализа в статико-динамическом режиме параллельно проведено исследование процесса в статическом режиме его организации. Во всех вариантах организации процесса ферментализ организуется при азрировании ферментативной среды при температуре 28...30 °С, влажности 60 – 75 % и рН 4,5...6,5 стерильным воздухом с относительной влажностью 96 – 98 %. Статикодинамический режим ферментализа реализован с использованием плоской модели барабанного аппарата диаметром 0,6 м с устройством для ввода аэрирующего воздуха по центру циркуляции в засыпке ферментативной среды [5].

В соответствии с результатами предыдущего исследования общая продолжительность процесса ферментализа для всех вариантов его организации принята равной 96 часам [5, 6]. В ходе эксперимента контролировались масса ферментативной среды с целью анализа интенсивности анаболизма культуры микроскопического гриба и визуальная оценка состояния среды и культуры для различных вариантов статико-динамического ферментирования. Кроме того осуществлялся отбор проб для определения содержания белка, легкоперевариваемых сахаров, целлюлозы, лигнина и ферментативной активности мицелиального гриба *Trichoderma viride*. Аналогичные исследования проводились параллельно и в процессе ферментирования в статическом режиме.

Статико-динамический режим ферментирования реализован при скоростях вращения барабана от 7×10^{-4} мин⁻¹ до $8,5 \times 10^{-3}$ мин⁻¹, что позволило варьировать продолжительностью периода между операциями перемешивания ферментативной среды от 24 до 2 часов. В дальнейшем приводятся результаты исследования кинетических закономерностей процесса ферментализа целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме при продолжительностях названного периода, равных 24, 12, 6, 3, и 2 часам.

Визуальная информация, касающаяся состояния ферментативной среды после трех суток биокатализа твердофазного субстрата, представлена на рис. 1 для всех вариантов организации процесса. Анализ приведенной информации позволяет сделать следующие выводы:

1) при ферментировании в статическом режиме на периферийных участках объема ферментативной среды наблюдаются чрезвычайно слабые признаки биоконверсии, а плодовые тела, формируемые в остальной части ферментативной среды, характеризуются небольшим объемом и на поверхности плодовых тел наблюдается ярко выраженное спорообразование (рис. 1, *a*);

2) при ферментировании в статико-динамическом режиме процесс ферментализации сопровождается образованием однородно распределенных в среде плодовых тел большого объема и протекает без заметного спорообразования на их поверхности (рис. 1, *б – e*);

3) наибольший объем плодовых тел наблюдается при ферментировании в статико-динамическом режиме, когда продолжительность периода между операциями перемешивания ферментативной среды составляет три часа (рис. 1, *д*).

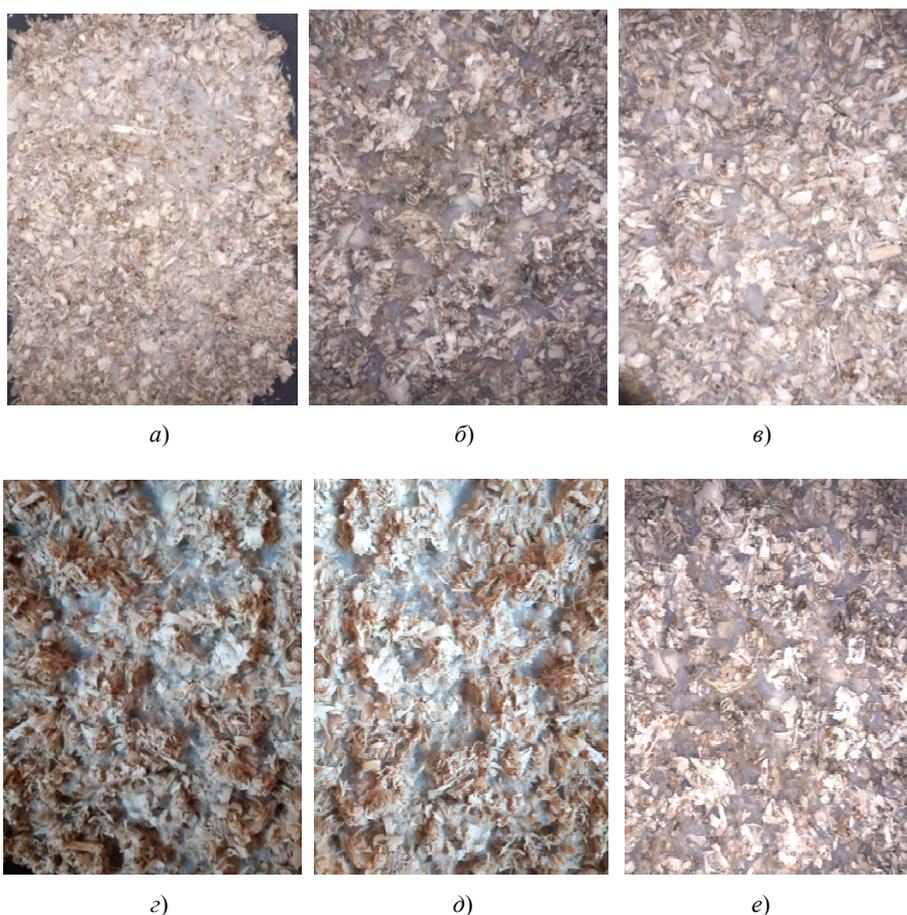


Рис. 1. Характерные фрагменты ферментативной среды после трех суток культивирования микроскопического гриба *Trichoderma viride* на твердом целлюлозосодержащем субстрате в статическом (*a*) и статико-динамическом (*б – e*) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч: *б* – 24; *в* – 12; *г* – 6; *д* – 3; *e* – 2

С целью качественной сравнительной оценки интенсивности анаболизма культуры микроскопического гриба *Trichoderma viride* для различных вариантов его культивирования приведены соответствующие зависимости относительной скорости прироста массы M ферментативной среды от времени τ (рис. 2). Результаты свидетельствуют о значительно более высокой интенсивности анаболизма культуры в режиме статико-динамического ферментирования и ее увеличении с уменьшением периода между операциями перемешивания. Однако при величине периода менее чем 3 часа эффект повышения относительной скорости прироста массы ферментативной среды с увеличением интенсивности перемешивания исчезает, что свидетельствует о снижении концентрации ростовых факторов вследствие деструктивного воздействия на мицелий гриба. Данный вывод согласуется с результатами визуального контроля (см. рис. 1).

Более определенное суждение в отношении анаболизма культуры можно сделать, основываясь на результатах исследования кинетики роста биомассы, представленных на рис. 3 в виде кривых изменения концентрации протеина

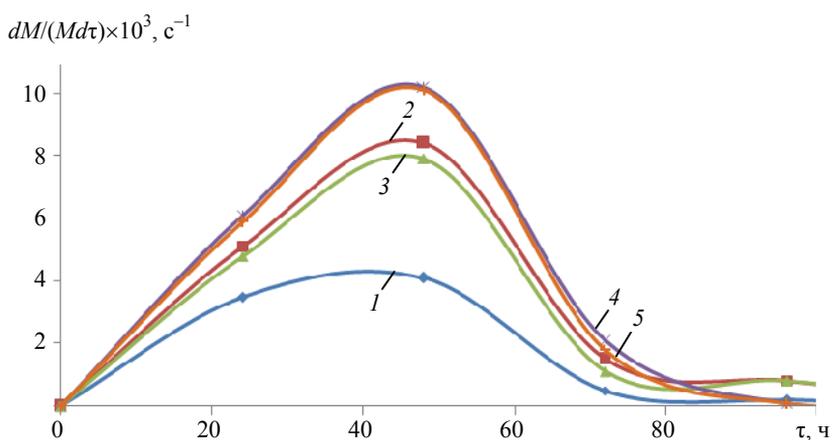


Рис. 2. Относительная скорость прироста массы ферментативной среды в процессах ферментирования в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч:
2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

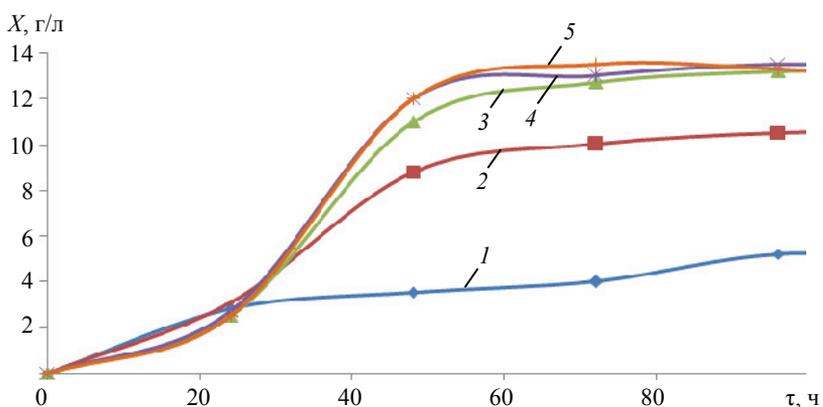


Рис. 3. Изменение концентрации белка в процессе ферментализации в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч:
2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

для вариантов ферментирования в статическом и статико-динамическом режимах. Концентрация протеина определялась колориметрическим методом с применением биуретового реактива [9].

Приведенные зависимости свидетельствуют о принципиальном различии динамики анаболизма на начальном этапе (первые двое суток) ферментализа в статическом и статико-динамическом режимах его организации. В этом периоде в статическом режиме ферментализа наблюдается относительно умеренное увеличение концентрации белка с интенсивностью, близкой линейному закону. В то же время в статико-динамическом режиме ферментализа наблюдается «лавинообразное» возрастание концентрации протеина с интенсивностью, соответствующей экспоненциальному закону. В результате, при ферментализе в статико-динамическом режиме с периодом перемешивания 12 часов концентрация белка через двое суток культивирования более чем в 2 раза превышает его концентрацию для статического режима, а при ферментализе с периодом перемешивания 6 и менее часов такое превышение достигает 3 – 3,5 раз (см. рис. 3).

Сделанные ранее выводы в отношении снижения концентрации ростовых факторов с уменьшением периода между операциями перемешивания среды менее трех часов (см. рис. 1 и 2) особенно ярко подтверждаются при интерпретации результатов исследования по содержанию белка в виде удельной скорости приращения его концентрации. Результаты, представленные на рис. 4, свидетельствуют о наиболее высоких значениях удельной скорости наращивания белковой массы и максимальной концентрации ростовых факторов в течение всего цикла ферментализа при трехчасовых периодах между операциями перемешивания среды.

Интенсификация ферментации в статико-динамическом режиме достигается за счет активного обновления и более развитой поверхности межфазного контакта и интенсивного теплообмена. При этом важнейшим положительным эффектом мягкого механического воздействия, приводящим к развитию поверхности межфазного контакта, вполне может быть увеличение центров активного роста мицелия.

Результаты исследования кинетики биоконверсии целлюлозы для вариантов статического и статико-динамического твердофазного ферментализа целлюлозо-содержащего субстрата свидетельствуют о том, что на всех этапах процесса скорость биоконверсии целлюлозы в статико-динамических режимах выше скорости процесса, организованного в статическом режиме (рис. 5). Вследствие более

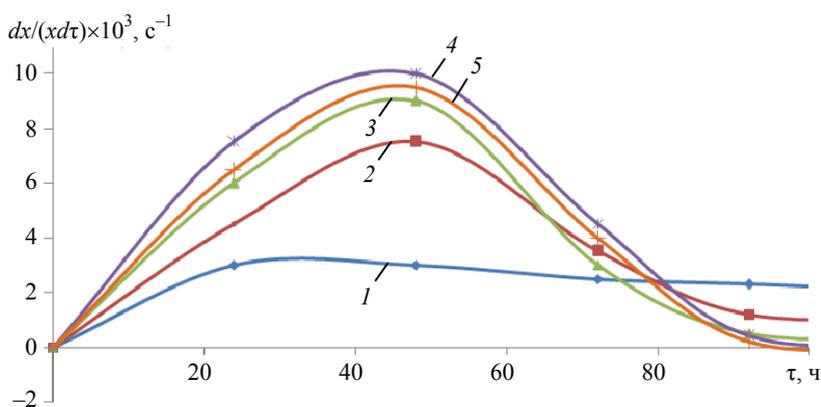


Рис. 4. Относительная скорость увеличения концентрации белка в процессе ферментализа в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч:

2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

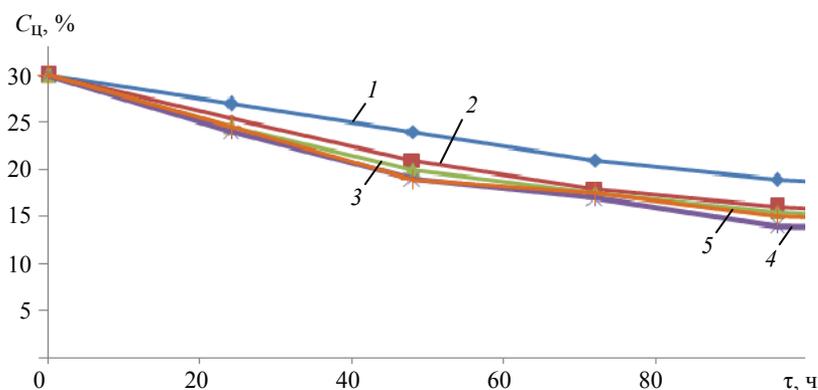


Рис. 5. Кинетика биоконверсии целлюлозы в процессе ферментализации в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч:
2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

высокого темпа биокатализа клетчатки в статико-динамическом режиме ферментализации через двое суток достигается эффект конверсии, превышающий таковой для случая четырех суток ферментирования в статическом режиме. Интенсификация ферментализации клетчатки в статико-динамическом режиме обеспечивается за счет формирования условий для жизнедеятельности активной культуры при интенсивном обновлении высоко развитой поверхности межфазного контакта и интенсификации теплообменных процессов в объеме ферментативной среды. Исследование показывает, что наряду с ферментализацией целлюлозы биоконверсия подвергается и ее особая форма – лигнин. Кинетика биоконверсии лигнина в процессах твердофазного ферментализации целлюлозосодержащего субстрата представлена на рис. 6 для вариантов организации процесса в статическом и статико-динамическом режимах. Концентрация лигнина определена методом, разработанным Всесоюзным научно-производственным объединением целлюлозно-бумажной промышленности, с применением 72%-й серной кислоты [10]. Кинетические кривые свидетельствуют о том, что количество остаточного лигнина в твердофазном целлюлозосодержащем субстрате более интенсивно снижается при ферментализации в статико-динамическом режиме на всех этапах процесса (рис. 6). Результаты исследования динамики изменения остаточных концентраций целлюлозы и лигнина в процессе ферментализации целлюлозосодержащего субстрата (см. рис. 5 и 6) являются прямым подтверждением целесообразности осуществления процесса биоконверсии растительных полисахаридов с использованием культуры микроскопического гриба *Trichoderma viride* в статико-динамическом режиме. Согласно полученным результатам процесс ферментализации следует проводить в условиях мягкого механического воздействия на ферментативную среду при ее перемешивании с частотой, не превышающей $0,33 \text{ ч}^{-1}$. Для обеспечения такого рода условий при ферментализации целлюлозосодержащего сырья в статико-динамическом режиме целесообразно использовать аппарат с гладким вращающимся барабаном, позволяющий организовать циклическое перемешивание ферментативной среды при периодическом гравитационном обрушении откосов материала.

Таким образом, в результате исследования кинетических закономерностей твердофазного ферментализации целлюлозосодержащего сырья с использованием микроскопического гриба *Trichoderma viride* в режимах статического и статико-динамического культивирования определены благоприятные условия для жизнедеятельности активной культуры. Условия обеспечивают максимальную концентрацию ростовых факторов в ферментативной среде за счет ее периодического перемешивания

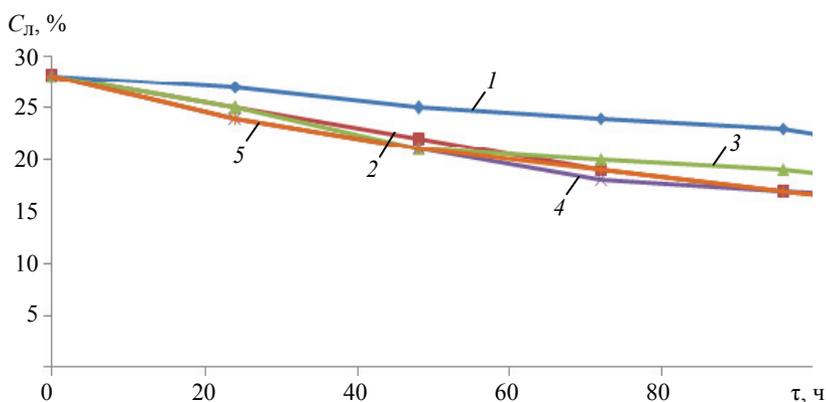


Рис. 6. Кинетика биоконверсии лигнина в процессе ферментации в статическом (1) и статико-динамическом (2 – 5) режимах при различной продолжительности периода между операциями перемешивания ферментативной среды, ч: 2 – 12; 3 – 6; 4 – 3; 5 – 2

при мягком механическом воздействии с частотой $0,33 \text{ ч}^{-1}$. Ферментация целлюлозосодержащего субстрата в статико-динамическом режиме протекает при минимальном спорообразовании с формированием больших плодовых тел при их однородном распределении в объеме ферментативной среды. Повышенная активность культуры в условиях статико-динамического режима ее культивирования обеспечивает интенсивное наращивание в ферментируемой среде белковой массы, концентрация которой через двое суток ферментации до 3,5 раз выше концентрации, достигаемой при ферментации в статическом режиме. Высокая интенсивность биоконверсии целлюлозы и лигнина в статико-динамическом режиме ферментации позволяет в течение двух суток протекания процесса превзойти показатели конверсии, достигаемые в течение четырех суток ферментации в статическом режиме.

Список литературы

1. Гайва, Е. Топ-10 грибных проектов. Заявлены производства на 28 млрд рублей / Е. Гайва // *Агроинвестор*. – 2016. – № 9. – URL : <https://www.agroinvestor.ru/rating/article/24141/> (дата обращения: 05.04.2022).
2. Емцев, В. Т. Микробиология : учебник / В. Т. Емцев, Е. Н. Мишустин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Дрофа, 2005. – 445 с.
3. Кулишов, Б. А. Применение технологии твердофазной ферментации в производстве биопродуктов / Б. А. Кулишов, Ле Ань Туан. – *Вестн. Казанского технол. ун-та*. – 2014. – Т. 17, № 23. – С. 258 – 261.
4. Гнеушева, И. А. Биологическая активность грибов рода *Trichoderma* и их промышленное применение / И. А. Гнеушева, Н. Е. Павловская, И. В. Яковлева // *Вестн. Орловского гос. аграрного ун-та*. – 2010. – № 3 (24). – С. 36 – 39.
5. Долгунин, В. Н. К разработке технологии и аппаратного оформления производства субстрата из целлюлозосодержащего сырья / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 595 – 602. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602
6. Долгунин, В. Н. Кинетические закономерности биоконверсии целлюлозосодержащего сырья с использованием культуры гриба *Trichoderma viride* / В. Н. Долгунин, А. В. Слепых, В. А. Пронин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 393 – 401. doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401

7. Иванов, О. О. Управление сегрегированными потоками сыпучих материалов для их обработки методами разделения и соединения / О. О. Иванов, В. А. Пронин, Е. А. Рябова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 397 – 410. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410

8. Иванов, О. О. Технология подготовки зернового сырья для биоконверсии с повышенной экстрактивностью / О. О. Иванов, Е. А. Парфенова, В. Н. Долгунин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 656 – 664. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.656-664

9. ОФС.1.2.3.0012.15 Определение белка. Метод 5 (колориметрический метод с биуретовым реактивом). – Текст : электронный // Фармакопоя.рф. – URL : <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-2-3-0012-15-opredelenie-belka/> (дата обращения: 05.04.2022).

10. Определение лигнина : реферат. – Текст : электронный // Smekni.com. – М., 2006. – 3 с. – URL : <https://mirznanii.com/a/325212-2/opredelenie-lignina-2/> (дата обращения: 05.04.2022).

Kinetics and Hydrodynamic Conditions of Solid-Phase Bioconversion of Cellulose-Containing Raw Materials in Static-Dynamic Mode

V. N. Dolgunin, D. A. Vlasov, V. A. Pronin

*Department of Technologies and Equipment of Food and Chemical Industries,
dolgunin-vn@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: bioconversion; static and static-dynamic mode; solid phase fermentation; cellulose raw materials.

Abstract: A study of the kinetics of solid-phase bioconversion of cellulose-containing raw materials in the static-dynamic mode of fermentation was made. The effect of mixing intensity on the kinetic patterns of the fermentation process using the microscopic fungus *Trichoderma viride* is studied. The parameters of a mild dynamic effect on the enzymatic medium, which ensures the highest efficiency of the static-dynamic mode of solid-phase bioconversion, are determined.

References

1. <https://www.agroinvestor.ru/rating/article/24141/> (accessed 5 April 2022).
2. Yemtsev V.T., Mishustin Ye.N. *Mikrobiologiya: uchebnik* [Microbiology: textbook], Moscow: Drofa, 2005, 445 p. (In Russ.)
3. Kulishov B.A., Le An' Tuan [Application of solid-phase fermentation technology in the production of bioproducts], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014, vol. 17, no. 23, pp. 258-261. (In Russ.)
4. Gneusheva I.A., Pavlovskaya N.Ye., Yakovleva I.V. [Biological activity of fungi of the genus *Trichoderma* and their industrial application], *Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Oryol State Agrarian University], 2010, no. 3 (24), pp. 36-39. (In Russ.)
5. Dolgunin V.N., Slepikh A.V., Pronin V.A. [On the development of technology and hardware design for the production of a substrate from cellulose-containing raw materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 595-602, doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.595-602 (In Russ., abstract in Eng.)

6. Dolgunin V.N., Slepikh A.V., Pronin V.A. [Kinetic patterns of bioconversion of cellulose-containing raw materials using the culture of the fungus *Trichoderma viride*], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 3, pp. 393-401, doi: 10.17277/vestnik.2020.03.pp.393-401 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova Ye.A. [Management of segregated flows of bulk materials for their processing by separation and connection methods], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 397-410, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.397-410 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Ivanov O.O., Parfenova Ye.A., Dolgunin V.N. [Technology for the preparation of grain raw materials for bioconversion with increased extractivity], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 656-665, doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.656-665 (In Russ., abstract in Eng.)

9. <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-2-3-0012-15-opredelenie-belka/> (accessed 5 April 2022).

10. <https://mirznanii.com/a/325212-2/opredelenie-lignina-2/> (accessed 5 April 2022).

Kinetik und hydrodynamische Bedingungen der Festphasen-Biokonversion von zellstoffhaltigen Rohstoffen im statisch-dynamischen Modus

Zusammenfassung: Es ist eine Untersuchung der Kinetik der Festphasen-Biokonversion von zellstoffhaltigen Rohstoffen im statisch-dynamischen Fermentationsmodus durchgeführt. Der Einfluss der Rührintensität auf die kinetischen Regelmäßigkeiten des Fermentationsprozesses unter Verwendung des mikroskopisch kleinen Pilzes *Trichoderma viride* ist untersucht. Es sind die Parameter einer milden dynamischen Wirkung auf das enzymatische Medium bestimmt, die die höchste Effizienz des statisch-dynamischen Modus der Festphasen-Biokonversion gewährleistet.

Cinétique et conditions hydrodynamiques de la bioconversion en phase solide de la matière première contenant de la cellulose en mode statique-dynamique

Résumé: Est réalisée une étude sur la cinétique de la bioconversion en phase solide de la matière première contenant de la cellulose dans le mode statique-dynamique de la fermentation. Est étudié l'effet de l'intensité du mélange sur la cinétique du processus de la fermentation avec l'utilisation du champignon microscopique *Trichoderma viride*. Sont définis les paramètres de l'effet dynamique doux sur le milieu enzymatique ce qui assure la plus grande efficacité du régime statique-dynamique de la bioconversion en phase solide.

Авторы: *Долгунин Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Власов Денис Анатольевич* – студент; *Пронин Василий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СМЕСИТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА ДЛЯ СЫПУЧЕГО ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

Д. В. Федорова¹, Д. В. Стенько¹, Д. Д. Бахаева², А. Б. Капранова¹

*Кафедры: «Теоретическая и прикладная механика» (1), kapranova_anna@mail.ru;
«Информационные системы и технологии» (2), ФГБОУ ВО «Ярославский
государственный технический университет», Ярославль, Россия*

Ключевые слова: вторичное сырье; параметризация; параметры; процесс; смешение; центробежный смеситель; 3D-модель.

Аннотация: В рамках САПР выполнено проектирование центробежного смесителя для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем в зависимости от установленного набора информационных переменных. Учет набора параметров процесса смешения сыпучих компонентов аргументирует целесообразность подготовки платформы для использования киберфизических систем промышленного производства. Проанализированы основные этапы работы смесительного оборудования и преимущества аппаратов центробежного типа для осуществления процесса смешения дисперсных компонентов, в том числе вторичного сырья. Предложен условный алгоритм реализации 3D-модели и ее параметризации.

Введение

Решение проблем экологического характера, в том числе связанных с утилизацией промышленных отходов и их вторичным использованием в химической промышленности, строительной индустрии, относится к актуальным вопросам глобального уровня.

Основным аргументом при этом является, с одной стороны, постоянно расширяющийся объем техногенных продуктов, отработавших свой цикл на производстве. С другой стороны, ужесточения требований по экологической безопасности к проведению технологических операций в различных отраслях промышленности в сочетании с возможностью разработки новых материалов на базе вторичных техногенных сред обозначают перспективу совершенствования процессов их переработки. Результатом такого энергоэффективного подхода становится проектирование нового оборудования специального назначения, в том числе смесителей твердых дисперсных материалов различных типов. Заметим, что зачастую для достижения указанных целей применяется не одна технологическая операция смешения, а целый комплекс предварительных этапов переработки, в частности, измельчение вязущих компонентов и наполнителей готового строительного продукта.

В частности, получение строительных смесей с заданными свойствами предполагает использование совокупности модифицирующих добавок функционального назначения в зависимости от конкретных условий применения данного сыпучего продукта. Достижение регламентной степени однородности данных дисперсных смесей является главным фактором их качества [1 – 3]. При этом для

получения смесей требуемого состава и прочностных характеристик параллельно с выбором категории добавок необходимо решить задачу определения способа дозирования и разбавления транспортируемого компонента ключевым в регламентном соотношении [4]. В качестве примеров указанных добавок строительных смесей приведем следующие материалы: метилцеллюлоза, технические полиакриламиды, известковая пыль и т.п.

Цель работы – проектирование центробежного смесителя для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем при использовании методов САПР.

Выбор информационных переменных

Учет множества параметров процесса смешения сыпучих компонентов аргументирует целесообразность подготовки платформы для использования киберфизических систем промышленного производства. Очевидно, что физико-механические свойства смешиваемых компонентов и параметры процесса смешения должны быть учтены на каждом этапе проектирования нового смесительного оборудования [4 – 6]. Сущность процесса смешения твердых дисперсных материалов заключается в перемешивании данных компонентов до заданной степени однородности [1 – 3]. Разрыв связей при указанном перемешивании между частицами дисперсных компонентов в сопровождении явления макродиффузии [7, 8] происходит вследствие соответствующего сдвигового напора после передачи макросистеме необходимой для этого энергии. Основными этапами работы смесительного оборудования являются следующие:

– подача питателем-дозатором смешиваемых материалов ($i = \overline{1, 2}$) в рабочую камеру смесителя [4 – 6];

– изменение положения частиц, составляющих компоненты, в том числе турбулентного характера, с разрывом связей между данными частицами и явлением макродиффузии [7, 8] за счет возрастания площади поверхности сдвига при подаче макросистеме энергии;

– удаление из рабочей камеры готовой смеси с регламентным значением степени однородности [4 – 6].

Указанные этапы процесса сопровождаются варьированием информационных переменных

$$Z_m(t) = \{X(t), Y(t), Q_n, k_1 = \text{const}, G_{\vartheta}, k_2 = \text{const}\}, m = \overline{1, n_0} \quad (1)$$

данной технологической операции в целях обеспечения ее управления для достижения конечной цели – заданного качества готовой дисперсной смеси.

В выражении (1) обозначены наборы параметров:

– входные

$$X(t) = \{c_{Vi}, W_{Vi}\} \quad (2)$$

при смешении дисперсных компонентов $i = \overline{1, 2}$;

– выходные

$$Y(t) = \{X(t), \Delta V_C, V_C^r\}; \quad (3)$$

– конструктивные

$$\{Q_n, k_1 = \text{const}\} = \{R, H, r_0, r_1, r_2, H_1, H_2, \delta, l, \psi, N\}, k_1 = 11; \quad (4)$$

– режимные

$$\{G_{\vartheta}, k_2 = \text{const}\} = \{\omega\}, k_2 = 1. \quad (5)$$

Выражения (2) – (5) содержат следующее позиционирование: c_{Vi} – объемные доли смешиваемых дисперсных материалов; W_{Vi} – их расход по объему; ΔV_C – погрешность абсолютная при расчете коэффициента неоднородности смеси V_C ; V_C^r – регламент по коэффициенту неоднородности. В частности, в случае аппарата центробежного типа имеем: R, H – радиус и толщина внешней цилиндрической поверхности корпуса; r_0 – радиус скругления; r_1, r_2 – радиусы внутренних цилиндрических поверхностей; H_1, H_2 – их толщина; δ, l – толщина и длина лопатки; ψ – характеристический угол установки лопатки; N – число лопаток; ω – угловая скорость вращения рабочего элемента.

К преимуществам центробежных устройств для смешения сыпучих материалов [4 – 6] относятся:

- возможность эффективного смешения увлажненных дисперсных компонентов или материалов с повышенными адгезионными характеристиками за счет ударных взаимодействий с рабочими органами аппарата, предотвращающими налипание на рабочие поверхности;
- снижение потребляемой мощности благодаря уменьшению сил внутреннего трения смешиваемых материалов между их слоями вследствие фактического перемешивания частиц компонентов в разреженных потоках или при движении в тонких слоях;
- достаточно высокая производительность;
- относительно кратковременный цикл процесса получения готовой смеси.

Условный алгоритм реализации 3D-модели

При реализации 3D-моделирования следует учитывать общие принципы программирования (описание имени переменной, присвоение значения из заданного диапазона изменения, соответствие иерархии введения переменных и т.п.) при работе с условным алгоритмом соответствующей 3D-модели и ее параметризации (рис. 1). Для повышения производительности центробежного смесителя и снижения мощности его привода проводится многократный анализ диапазонов изменения значений конструктивных параметров для выявления наиболее значимых факторов согласно предлагаемому алгоритму.

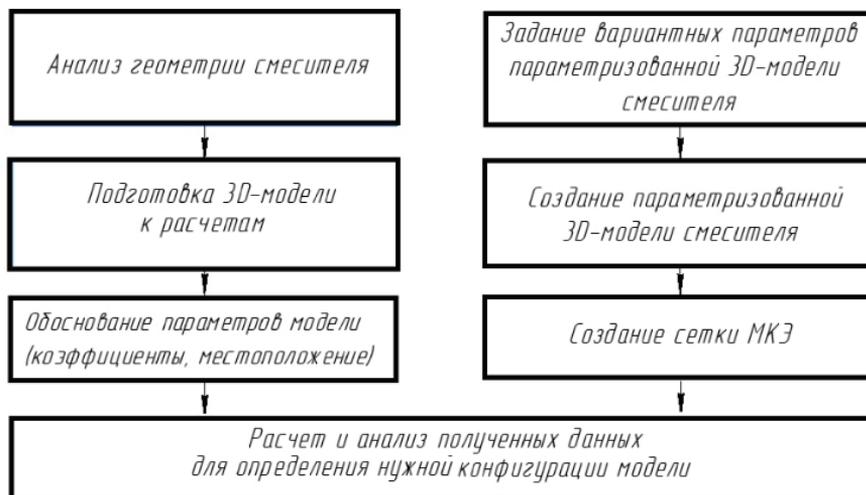


Рис. 1. Условный алгоритм реализации 3D-модели и ее параметризации методом конечных элементов (МКЭ)

Используемое 3D-моделирование, включая параметризацию профиля (рис. 2) и атрибуты трехмерной операции (выдавливание, вращение), при указанном наборе информационных переменных $Z_m(t)$ позволяет провести анализ:

- выбора конструктивных параметров устройства [9] в целом из набора $\{Q_{n, k_1} = \text{const}\}$ из формулы (4);
- выбора конструктивных параметров для отдельных узлов конструкции аппарата;
- механизма поведения рабочей среды в условиях реализации детерминированных или индетерминированных процессов [7, 8, 10].

Проектируемая имитационная модель позволяет автоматизировано перестраивать элементы аппарата в заданном интервале (табл. 1). На основе выявленных зависимостей проведен параметрический подбор размеров основных элементов центробежного смесителя [9, 11, 12].

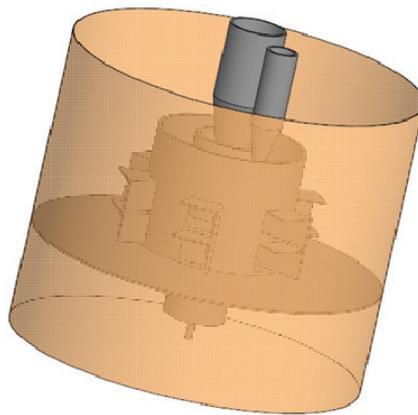


Рис. 2. Имитационная 3D-модель центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем

Таблица 1

Диапазоны изменения и значения конструктивных параметров центробежного смесителя

Параметр	Диапазон изменения/значение
Радиус внешней цилиндрической поверхности корпуса, 10^{-2} м	2,0...2,6
Угол для закрепления лопастки, град	25...30
Радиус внутренней цилиндрической поверхности камеры компонента, 10^{-2} м:	
первого	8,0...9,5
второго	4,0...4,5
Толщина цилиндрических поверхностей, 10^{-3} м	4,0...5,0
Радиус скругления, 10^{-3} м	2,0
Толщина лопастки, 10^{-3} м	3,0...4,0
Длина лопастки, 10^{-1} м	1,0...1,5
Число лопасток, шт.	6

Конструктивно указанные выше преимущества центробежных смесителей реализуются при установке конусных отражателей на одном или нескольких дисках [4 – 6]. В настоящей работе применение САПР проводится при разработке конструкции центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем (см. рис. 2). Заметим, что представленная установка камер с распылительными элементами позволяет организовать получение смеси в пересекающихся разреженных потоках зернистых компонентов.

Заключение

Таким образом, в работе получена имитационная 3D-модель центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем с учетом набора информационных переменных данной технологической операции согласно разработанному условному алгоритму реализации 3D-модели и ее параметризации. Результаты работы использованы при проектировании соответствующего смесительного оборудования в рамках системно-структурного анализа изучаемого процесса смешения.

Список литературы

1. Капранова, А. Б. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами / А. Б. Капранова, И. И. Верлока // Теоретические основы хим. технологии. – 2018. – Т. 52, № 6. – С. 707 – 721. doi: 10.1134/S0040357118050044
2. Исследование качества смеси на первой стадии работы аппарата гравитационного типа / А. Б. Капранова, И. И. Верлока, П. А. Яковлев, Д. Д. Бахаева // Российский хим. журнал. – 2018. – Т. 62, № 4. – С. 48 – 50.
3. Капранова, А. Б. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, И. И. Верлока // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 3 – 9.
4. Зайцев, А. И. Методы расчета и опытные испытания новых центробежных устройств по переработке твердых дисперсных сред : монография / А. И. Зайцев, А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев. – Ярославль : Изд. дом ЯГТУ, 2015. – 124 с.
5. Капранова, А. Б. Исследование процессов переработки дисперсных материалов : монография / А. Б. Капранова, А. Е. Лебедев, М. Ю. Таршис. – Ярославль : Изд. дом ЯГТУ, 2017. – 172 с.
6. Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет : монография / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова [и др.]. – Ярославль : Изд. дом ЯГТУ, 2017. – 176 с.
7. Капранова, А. Б. Метод определения коэффициента макродиффузии в процессе смешения твердых дисперсных сред в центробежном аппарате / А. Б. Капранова // Математическое моделирование. – 2009. – Т. 21, № 3. – С. 83 – 94.
8. Капранова, А. Б. Определение диффузионного параметра при смешении сыпучих сред в центробежном аппарате с криволинейными лопатками / А. Б. Капранова // Изв. высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2008. – Т. 51, № 4. – С. 66 – 68.
9. Пат. 2757814 Российская Федерация, МПК В01F 7/8, В01/04. Агрегат для смешения сыпучих материалов / А. Е. Лебедев, А. Б. Капранова, Д. В. Федорова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2020143438 ; заявл. 25.12.2020 ; опубл. 21.10.2021, Бюл. № 30. – 8 с.

10. Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, А. И. Верлока, А. И. Зайцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 296 – 304. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.296-304

11. Федорова, Д. В. Параметрическое проектирование центробежного смесителя зернистых сред с вторичным сырьем / Д. В. Федорова, Д. В. Стенько, Д. Д. Бахаева // XV Ежегодная науч. сессия аспирантов и молодых ученых : материалы Всероссийской науч. конф., 23 ноября 2021 г., Вологда. – Вологда, 2021. – Т. 1. – С. 121 – 125.

12. Применение САПР при разработке центробежного аппарата для смешения сыпучих материалов с вторичным сырьем / Д. В. Федорова, Д. В. Стенько, Д. Д. Бахаева, А. Б. Капранова // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 11. – С. 59 – 62. doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_11_59

Parametric Modeling in the Design of a Centrifugal Mixer for Bulk Secondary Raw Materials

D. V. Fedorova¹, D. V. Stenko¹, D. D. Bakhaeva², A. B. Kapranova¹

*Department of Theoretical and Applied Mechanics (1), kapranova_anna@mail.ru;
Department of Information Systems and Technologies (2),
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia*

Keywords: secondary raw materials; parameterization; options; process; mixing; centrifugal mixer; 3D model.

Abstract: Using CAD, a centrifugal mixer was designed for mixing bulk materials with secondary raw materials, depending on the established set of information variables. Accounting for a set of parameters for the process of mixing bulk components argues for the expediency of preparing a platform for the use of industrial production cyber-physical systems. The main stages of the operation of mixing equipment and the advantages of centrifugal type apparatuses for the process of mixing dispersed components, including secondary raw materials, are analyzed. A conditional algorithm for the implementation of a 3D model and its parameterization is proposed.

References

1. Kapranova A.B., Verloka I.I. [Stochastic description of the process of formation of flows of bulk components in apparatuses with brush elements], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2018, vol. 52, no. 6, pp. 707-721, doi: 10.1134/S0040357118050044 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kapranova A.B., Verloka I.I., Yakovlev P.A., Bakhayeva D.D. [Study of the quality of the mixture at the first stage of operation of a gravity-type apparatus], *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Journal of Chemistry], 2018, vol. 62, no. 4, pp. 48-50. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. [Modeling of the mixture quality criterion in the volume of a drum-tape device], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 2018, no. 5, pp. 3-9. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Lebedev A.Ye. *Metody rascheta i opytnyye ispytaniya novykh tsentrobezhnykh ustroystv po pererabotke tverdykh dispersnykh sred: monografiya* [Methods of calculation and experimental testing of new centrifugal devices for the processing of solid dispersed media: monograph], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom YAGTU, 2015, 124 p. (In Russ.)

5. Kapranova A.B., Lebedev A.Ye., Tarshis M.Yu. *Issledovaniye protsessov pererabotki dispersnykh materialov: monografiya* [Study of the processing of dispersed materials: monograph], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom YAGTU, 2017, 172 p. (In Russ.)

6. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Vatagin A.A., Suid S. *Apparaty dlya pererabotki dispersnykh sred. Teoriya i raschet: monografiya* [Apparatus for processing dispersed media. Theory and calculation: monograph], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom YAGTU, 2017, 176 p. (In Russ.)

7. Kapranova A.B. [Method for determining the macrodiffusion coefficient in the process of mixing solid dispersed media in a centrifugal apparatus], *Matematicheskoye modelirovaniye* [Mathematical Modeling], 2009, vol. 21, no. 3, pp. 83-94. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Kapranova A.B. [Determination of the diffusion parameter when mixing granular media in a centrifugal apparatus with curved blades], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2008, vol. 51, no. 4, pp. 66-68. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Lebedev A.Ye., Kapranova A.B., Fedorova D.V. *Agregat dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Unit for mixing bulk materials], Russian Federation, 2021, Pat. 2757814. (In Russ.)

10. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka A.I., Zaytsev A.I. [Methods for describing the motion of solid dispersed media in different planes for mixing drum sections], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 296-304, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.296-304 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Fedorova D.V., Sten'ko D.V., Bakhayeva D.D. *XV Yezhegodnaya nauchnaya sessiya aspirantov i molodykh uchenykh* [XV Annual scientific session of graduate students and young scientists], Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, 23 November, 2021, Vologda, 2021, vol. 1, pp. 121-125. (In Russ.)

12. Fedorova D.V., Sten'ko D.V., Bakhayeva D.D., Kapranova A.B. [Application of CAD in the development of a centrifugal apparatus for mixing bulk materials with secondary raw materials], *Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike* [Mathematical methods in technologies and engineering], 2021, no. 11, pp. 59-62, doi: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_11_59 (In Russ., abstract in Eng.)

Parametrische Modellierung bei der Projektierung eines Zentrifugalmischers für sekundäres Schüttgut

Zusammenfassung: Im Rahmen von CAD ist ein Zentrifugalmischer zum Mischen von Schüttgütern mit Sekundärrohstoffen in Abhängigkeit von einem festgelegten Satz von Informationsvariablen entworfen. Die Berücksichtigung einer Reihe von Parametern für den Prozess des Mischens von Massenkomponenten spricht für die Zweckmäßigkeit, eine Plattform für den Einsatz von cyber-physikalischen Systemen für die industrielle Produktion vorzubereiten. Analysiert sind die Hauptphasen des Betriebs von Mischanlagen und die Vorteile von Zentrifugalapparaten für den Prozess des Mischens dispergierter Komponenten, einschließlich sekundärer Rohstoffe. Ein bedingter Algorithmus zur Implementierung des 3D-Modells und seiner Parametrisierung ist vorgeschlagen.

Modélisation paramétrique dans la conception d'un mélangeur centrifuge pour le recyclage en vrac

Résumé: Dans le cadre de la CAO, est conçu un mélangeur centrifuge pour mélanger des matériaux en vrac avec des matières premières secondaires en fonction d'un ensemble établi de variables d'information. La prise en compte d'un ensemble des paramètres de processus de mélange de composants en vrac justifie la préparation d'une plate-forme pour l'utilisation des systèmes de la production industrielle cyberphysique. Sont analysées les principales étapes du fonctionnement de l'équipement de mélange et les avantages des appareils de type centrifuge pour la mise en œuvre du processus de mélange des composants dispersés, y compris les matières premières secondaires, Est proposé un algorithme pour la mise en œuvre du modèle 3D ainsi que son paramétrisation.

Авторы: *Федорова Дарья Владимировна* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Стенько Дмитрий Владимирович* – аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика»; *Бахаева Дарья Дмитриевна* – старший преподаватель кафедры «Информационные системы и технологии», *Капанова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Россия.

КЛАССИФИКАЦИИ НОНМИКСИНГОВЫХ СМЕСЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ, ПРОДУКТОВ И УСТРОЙСТВ

А. В. Евсеев

*Кафедра «Технологические системы пищевых, полиграфических и упаковочных производств», ews1972@mail.ru;
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Россия*

Ключевые слова: гетерогенные смеси; классификация; компоненты смесей; нонмиксеры; приготовление смесей; смесительное оборудование.

Аннотация: В теории и практике получения смесей из компонентов различных физико-механических свойств и фракций преобладают процессы стохастического формирования однородности и широкий комплекс оборудования для реализации данных технологий. При соотношении компонентов в смеси, не превышающем 1:10, данные способы позволяют получать смеси приемлемого качества. Однако современные потребности общества, когда смесевые продукты необходимо получать с более высокими соотношениями компонентов и минимальными дозами их потребления, традиционное оборудование не всегда позволяет получать смеси заданного качества. Представлены новые классификации компонентов (сред) и оборудования для приготовления гетерогенных смесей при учете возможности детерминированного формирования их однородности на новом классе технологических машин – нонмиксерах.

Классификация гетерогенных смесевых компонентов (сред)

В качестве одной из классификаций смесевых продуктов предлагается использовать структуру, построенную на взаимозависимости фракций и состояний смешиваемых компонентов и соответственно используемых технологий смешения и нонмиксинга [1, 2].

Представляется целесообразным параллельно ввести оригинальную классификацию компонентов (рис. 1) на основе разработанной ранее в работе [1], при учете современных требований, предъявляемых производителями и потребителями смесей, и в соответствии с положениями предлагаемой теории нонмиксинга [2]. Поэтому, ввиду объективной невозможности разделить смешиваемые материалы по какому-либо одному признаку, необходимо, при использовании на практике различного смесительного оборудования [3 – 6] и ранее проведенных исследований [7, 8], применить новую обобщенную функциональную классификацию смешиваемых или усредняемых компонентов (сред), механическим или другим способом в практической реализации теории нонмиксинга [9 – 12]. Это обусловлено, прежде всего, слишком большим количеством параметров компонентов, которые невозможно нормировано учесть при проектировании оборудования для производства смесей.

В работе предложено не замещение предлагаемой классификацией первой [1], а их совместное использование и рассмотрение первой как базовой, а второй – как производной для более эффективного применения обеих при выборе смесительной машины (нонмиксера) для проектирования и производства.

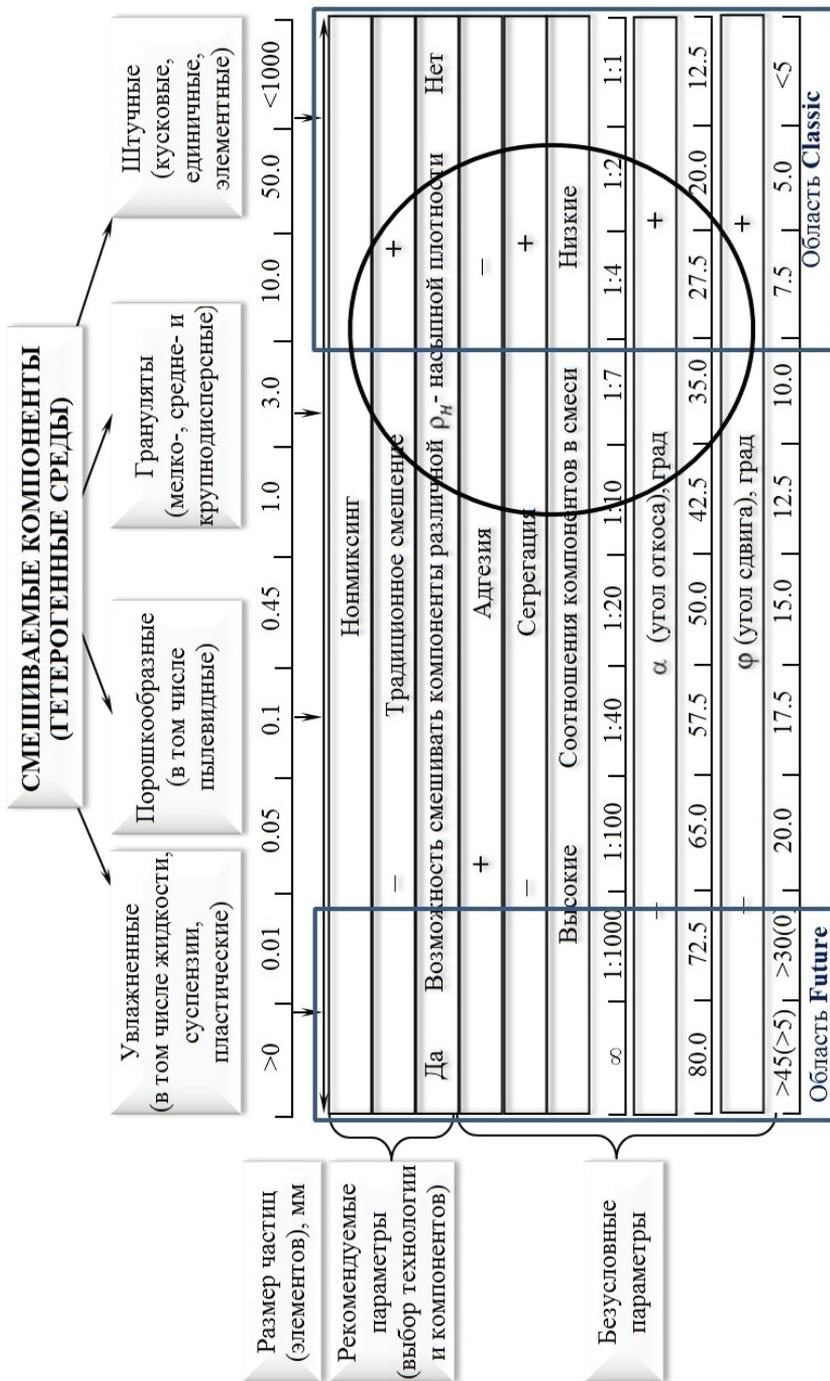


Рис. 1. Предлагаемая функциональная параметрическая классификация компонентов для выбора смесительного оборудования (нонмиксеров) и получения показателей качества смеси на уровне не ниже $V_c \leq 1 - 10 \%$:
 ○ – оптимальная область выбора параметров смеси для проектирования смесителя (нонмиксера)

Предложено расширить общую номенклатуру смешиваемых сыпучих компонентов до более широкого понятия – «гетерогенные среды», в котором выделить четыре основные категории:

- 1) штучные (кусковые, единичные, элементные);
- 2) грануляты (мелко-, средне- и крупнодисперстные);
- 3) порошкообразные (в том числе пылевидные);
- 4) увлажненные (в том числе жидкости, суспензии и пластические).

Данная ранжировка позиционируется автором как производная от классификации, представленной в [1], для учета особенно первой и четвертой категорий, которые ранее не анализировались или учитывались частично по некоторым признакам. Это обусловлено объективным расширением номенклатуры производимых смесевых продуктов, особенно применительно к требованиям современного рынка и производства.

В классификации в качестве учитываемых параметров взяты как базовые (абсолютные): размер частиц (фракций, элементов); ρ_n – насыпная плотность материала (условно, функционально применительно к возможности смешивания (нонмиксинга) компонентов различной плотности); φ – угол внутреннего трения сыпучего материала (угол сдвига для производного τ_0 – начального сопротивления сдвигу); α – угол откоса (интегрально учитывающий параметры сводообразования), так и дополнительные (производные): обратные друг другу параметры адгезии и сегрегации, а также взаимосвязанные с ними – один из основных параметров – соотношение компонентов в смеси, и собственно области совместного взаимодействия традиционных технических решений миксинга [1, 3 – 6, 13 – 15] и нонмиксинга [2, 9 – 12]. Численные характеристики параметров могут быть скорректированы под конкретную отрасль производства. В этом еще одно преимущество вводимой классификации – ее гибкость, возможность адаптироваться к различным технологическим регламентам, сохраняя при этом свою структуру и подход. Можно варьировать различными характеристиками компонентов (сред), не изменяя их зависимости и корреляционные связи.

Все параметры привязаны по оси абсцисс по функциональным взаимозависимым признакам, что раньше не учитывалось, а также в плоскости обеих осей для выделения области обоснованного проектирования (выбора) смесительного устройства (нонмиксера). При этом специально выделяются области Classic и Future, визуально характеризующие диалектический переход от базовых (существующих) технологий к нонмиксингу, позволяющему синтезировать смеси, которые ранее получать не удавалось. Отказ от существующих технологий не подразумевается, так как в своей области они более экономически выгодны.

Также, в поле классификации, специально выделена область выбора рационального соотношения всех используемых параметров с возможностью оптимального синтеза смесительного (нонмиксингового) устройства (технологии) (см. рис. 1).

Следует отметить, что данную функциональность классификации не обязательно рассматривать как однозначную. Существует большое количество технических и технологических особенностей приготовления смесей, которые могут затруднить выбор на проектирование смесительного оборудования (нонмиксера) при учете всех параметров компонентов [2, 3, 13 – 15]. Однако структура классификации остается постоянной с возможностью исключения или наоборот – включения описываемых или вновь вводимых параметров.

Можно использовать классификацию как базовую структуру для детального описания каждого компонента (среды), который есть в наличии на конкретном предприятии в данный момент времени. Это не только позволит составлять своего рода «паспорт» партии данного компонента, но и обозначит наиболее оптимальные условия для его транспортирования и хранения.

Далее можно проводить наложение уточненных данных (паспортов) для каждого конкретного компонента (среды), составляющих определенную смесевую рецептуру, друг на друга, с целью синтеза необходимой рецептуры смеси из имеющихся компонентов. И на основе этого совмещения можно получать наиболее уточненные, детализированные комбинации для выбора решения при проектировании нового устройства для приготовления смесей. Здесь возможна программная реализация задачи.

Целью создания данной классификации является прежде всего учет максимального (оптимального) количества параметров гетерогенных сред для получения наиболее эффективного конечного результата – производства (синтеза) высококачественных смесевых продуктов.

Необходимо выделить основное преимущество данной классификации компонентов (гетерогенных сред) для смешения (нонмиксинга). Оно заключается в том, что при учете максимального (оптимального) количества свойств и факторов сред, они (свойства) технологически жестко привязаны друг к другу, и в инженерном использовании при выборе конструкции устройства для приготовления смесей. Это максимально упрощает задачу ИТР при составлении предложения на проектирование и собственно самого проектирования аппарата для приготовления смесей. Для этого достаточно знать несколько входных или выходных параметров процесса, конструкции, продукта или самих компонентов (сред), чтобы определить остальные недостающие параметры, упростив (оптимизировав), таким образом, всю цепочку разработки аппарата от проектирования до его производства.

Классификация устройств для синтеза смесей

Большинство ученых отмечают высокую степень сложности описания физико-механических процессов, происходящих при смешении, перемешивании. Особенно это касается одновременно протекающего процесса «диффузии – сегрегации» компонентов. Поэтому, в качестве основного показателя формирования качества смесей, независимо от конструкции смесительного устройства, используют статистические методы, оптимизируемые по параметру времени [1, 3 – 8]. Предполагалось, что качество смеси зависит в основном от интенсивности и времени смешения. Однако опыт исследований показал, что это не всегда так [2, 3, 9 – 12]. Также современные запросы потребителей смесевых продуктов зачастую значительно опережают возможности существующих смесительных технологий, используемых производителями.

В этой связи в новой классификации устройств для синтеза смесей – нонмиксеры – машины, реализующие детерминированное формирование однородности смеси, позиционируются как более современные и перспективные, способные решать актуальные технологические задачи и позволяющие связывать конечные показатели качества смесей с технологическими характеристиками и возможностями оборудования [2].

В основу классификации положено разделение всех смесительных устройств и конечных смесевых продуктов на три большие группы (ветви) (рис. 2):

- традиционные [1, 3 – 6];
- традиционные, реализующие интенсифицированные процессы «диффузии – сегрегации» вероятностного формирования однородности (качества) смесей с использованием вспомогательных или модернизированных узлов и устройств [13 – 15];
- нонмиксеры – современные установки, синтезирующие смеси заданного качества преимущественно без использования традиционных технологий под конкретного производителя–потребителя при детерминированном формировании однородности конечной смеси [2, 9 – 12]. Рассмотрим каждую в отдельности.

1. Ветвь $m \approx n$.

Применение данного класса миксеров целесообразно в горнорудной промышленности, строительстве, металлургии, производстве удобрений и т.п. Оборудование обеспечивает уровень отклонения содержания ключевого компонента в смеси не менее 10 – 14 %, что в целом вполне соответствует отраслевым нормативным документам. Конструкции данных смесителей как правило несложны, зачастую не имеют перемешивающих элементов, просты в обслуживании и ремонте, недороги в изготовлении и обладают достаточно высокой производительностью [1, 3, 4]. Качество получаемых в них смесей зависит от времени перемешивания или смешения не корреляционно, а по случайной кривой, определение характеристик которой весьма длительный и трудоемкий процесс. Механизм формирования однородности смеси исключительно стохастический, непостоянный и зависит от большого числа факторов, влияющих на трудноопределимую взаимосвязь между диффузией и сегрегацией ее компонентов. И как результат – относительно невысокое качество получаемой продукции.

2. Ветвь $m > n$.

Данные миксеры уместно применять в пищевой, химической, строительной, сельскохозяйственной и других отраслях промышленности. Оборудование обеспечивает уровень отклонения содержания ключевого компонента не менее 3 – 10 %, что соответствует основным требованиям стандартов на продукцию данных отраслей производства.

Конструкции смесителей более сложные, чем в п. 1, однако также традиционны. Реализуют как правило периодический принцип действия, технологически оптимизированы на работу по полученному опытным путем необходимому времени смешения, что в результате дает возможность с высокой, но все же не достоверной вероятностью получать средний уровень качества получаемых смесей. Они обладают более высокой стоимостью, трудоемки в обслуживании и имеют средний уровень производительности. Техническая реализация данных миксеров, как правило, осуществляется в традиционном одно- или многообъемном, реже – в линейном (конвейерном) либо в роторном исполнении [13 – 15]. Периодический принцип действия позволяет осуществлять операции «фасовки – упаковки» готовой продукции, что очень важно для решения маркетинговых задач.

Кроме вышесказанного данные конструкции смесительных машин, как правило, используют различные «интенсифицирующие» устройства и узлы. Например: дополнительные ворошители, вибраторы, увлажнители или осушители, сложные приводы перемешивающих органов, обеспечивающие максимальный промес внутри аппаратов, адаптивные системы управления под различные режимы работы и компоненты смесей и многое др. Но все это, только ускоряет процессы «диффузии – сегрегации», сокращая время работы аппаратов, сохраняя при этом вероятностное формирование однородности смеси, и, как следствие, неуправляемое ее качество. Однако, при стационарных отестированных режимах работы и для определенной номенклатуры смесей, их качество можно определить как вполне удовлетворительное.

3. Ветвь $m \gg n$.

Такие нонмиксеры целесообразно применять для приготовления гетерогенных смесей в аэрокосмических технологиях, при изготовлении высококачественных химических и лекарственных препаратов, премиксов, электротехнических приборов, высокоточного и алмазного инструмента, продукции ОПК и т.п. Оборудование обеспечивает уровень отклонения содержания ключевого компонента не более 0,5 – 4 %, что наиболее востребовано потребителями.

Основное преимущество нонмиксеров – это обеспечение заданной гарантированной выборки (дозы) эффективного использования смеси, когда в определенном ее объеме выдержана необходимая рецептура с заданной достоверной вероятностью.

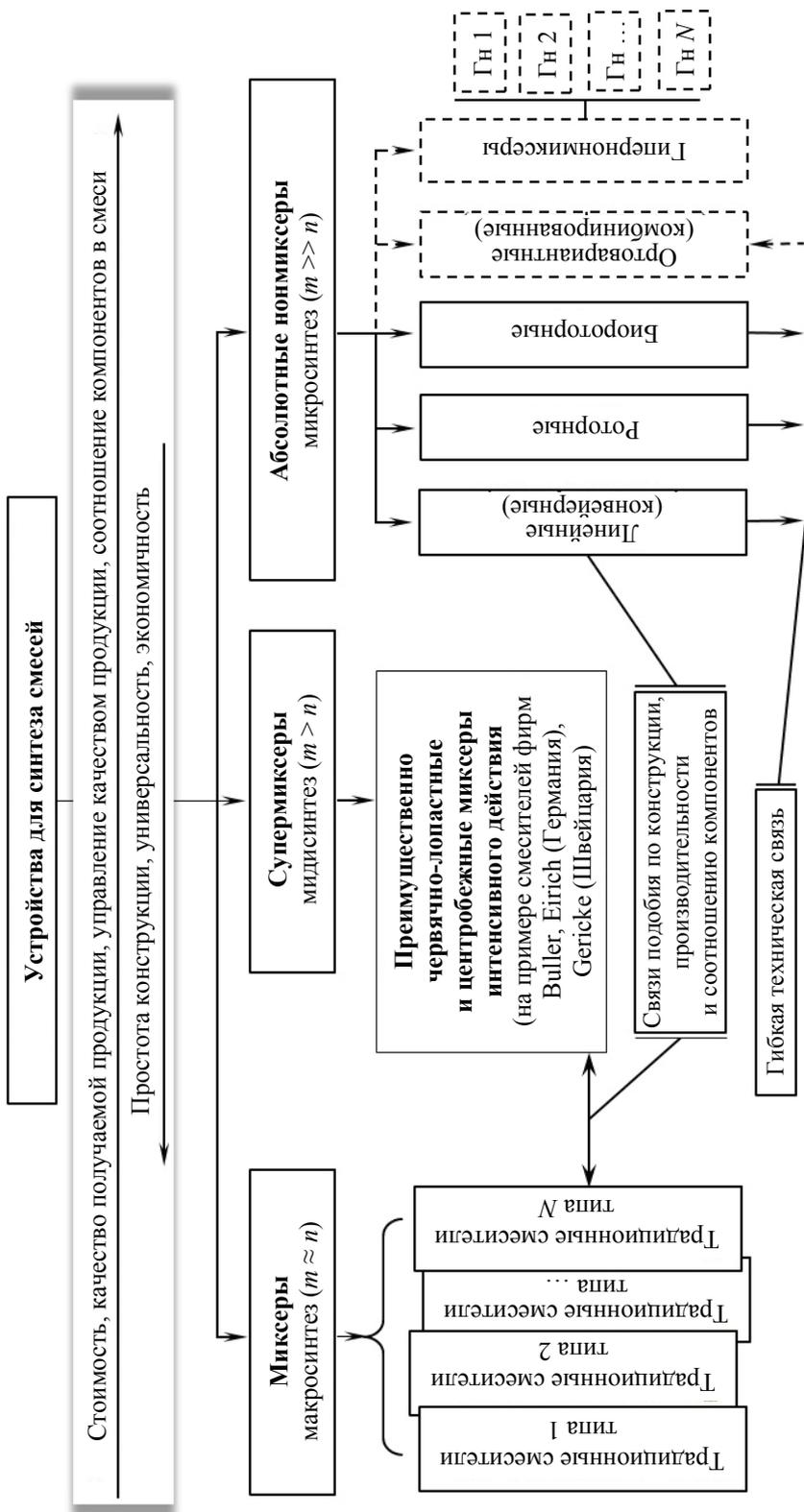


Рис. 2. Классификация устройств для синтеза смесей:

n – ключевой компонент; m – наполнитель
(пустые области – технические решения не разработаны или не защищены)

Конструкции нонмиксеров, как правило, оригинальные, ориентированы на выпуск специализированной продукции, обладают относительно низкой производительностью и высокой стоимостью при соответствующем высоком гарантированном уровне качества выпускаемой продукции [9 – 12]. В силу специфики выпускаемых смесей ключевых компонентов может быть несколько, поскольку общий эффект от использования смеси может зависеть не от 1–2, а от 5 – 10 наиболее эффективных компонентов. Это особенно актуально и необходимо учитывать. Можно минимизировать количество ключевых компонентов или укрупнять их до одного–двух (соединять, предварительно смешивать между собой), а в дальнейшем использовать как отдельный компонент при окончательном нонмиксинге.

Отдельно следует сказать про еще не разработанные конструкции нонмиксеров (области выделены пунктирными линиями). Ортовариантные системы комбинируются из различных вариантов конструкций дозирующих и транспортирующих модулей и ориентированы на выпуск высокотехнологичной и специализированной продукции: например абразивного инструмента, продукции ВПК, некоторой фармацевтической, пищевой продукции и др. Это обусловлено сложностью производства данных смесевых изделий и высокими, предъявляемыми к ним требованиями. Такие конструкции значительно сложнее, менее универсальны и значительно дороже обычных нонмиксеров. Они аналогичны роботизированным комплексам и должны создаваться для решения сложных и специализированных задач.

Гипернонмиксеры – наиболее перспективная ветвь классификации, должна быть ориентирована на решение двух основных задач: значительного увеличения производительности нонмиксинга и значительного увеличения соотношений синтезируемых компонентов в смесях. Здесь возможен отход от предлагаемого понимания нонмиксинга с выделением своей отдельной классификации, но с более широкой морфологией технических решений.

В целом классификация должна позволить в некотором корреляционном понимании соединить (комбинировать, синтезировать) функциональные классификации: «оборудование» – «технология» – «смесь», с целью разработки и создания наиболее оптимального, по функциональным характеристикам, нового технологического процесса приготовления существующих или создаваемых на перспективу смесевых продуктов.

В качестве примера можно привести именно третью ветвь. Из-за значительной разницы в соотношениях составляющих и возможности использования нескольких ключевых компонентов смеси, конструкцию нонмиксера приходится либо значительно усложнять, либо разрабатывать совершенно новую. Обеспечить соотношение компонентов 1:20 и выше существующие конструкции миксеров не в состоянии, поэтому при переходе на принципы нонмиксинга существующие технологические подходы традиционного миксинга неприменимы. Нонмиксинг не разрушает общие формулировки, схемы, цели и задачи традиционного миксинга, а развивает их. Теперь предлагается (предполагается) смешивание компонентов различных субстанции и состояния, при разных условиях производства и использования смеси. Это может быть и смешивание жидких сред или с их помощью направленная диффузия; управляемое наложение слоев или объемов; комбинированное структурирование; пневмо-, гидро-, электромагнитный переносы и многое др. Тогда как ранее, для реализации традиционного миксинга, подразумевалось лишь наличие пространства для смешения и перемешивающего механизма, как правило, сугубо механического.

Таким образом, в данной классификации функционально объединены существующие традиционные миксеры и перспективные аппараты нового класса машин – нонмиксеры, реализующие детерминированное формирование однородности получаемых на них смесей.

Классификация не содержит жестких связей, что обусловлено широким спектром выпускаемой продукции, а также невозможностью однозначного выбора типа смесительного устройства (нонмиксера) под конкретный смесевой продукт. Гибкость классификации позволяет уходить от необоснованного усложнения создаваемой технологии приготовления смеси в целом, что позволяет сделать ее наиболее оптимальной, а следовательно и рентабельной.

Список литературы

1. РД РТМ 26-01-129-80 Машины для переработки сыпучих материалов. Методы выбора оптимального типа питателей, смесителей и измельчителей : руководящий документ // Северодонецкий НИИХиммаш. – Введ. 1980-01-01. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/471834499> (дата обращения: 10.02.2020).
2. Евсеев, А. В. Нонмиксинг / А. В. Евсеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 9. – С. 27 – 36.
3. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
4. ГОСТ 16349–85 Смесители циклические для строительных материалов. Технические условия. – Взамен ГОСТ 16349–70, ГОСТ 6508–81, ГОСТ ЭД1 16349–88 ; введ. 1987-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1999. – 10 с.
5. ГОСТ Р 54425–2011 Машины и оборудование для пищевой промышленности. Смесители лопастные. Требования по безопасности и гигиене. – Введ. 2012-07-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 35 с.
6. ГОСТ EN 454–2013 Машины и оборудование для пищевой промышленности. Смесители планетарные. Требования по безопасности и гигиене. – Введ. 2016-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 67 с.
7. Першин, В. Ф. Методы расчета и новые конструкции машин барабанного типа для переработки сыпучих материалов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.09 / Першин Владимир Федорович. – Тамбов, 1994. – 428 с.
8. Баранцева, Е. А. Моделирование и оптимизация процессов смешивания сыпучих материалов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08, 05.13.01 / Баранцева Елена Александровна. – Иваново, 2010. – 262 с.
9. Пат. 2129911 Российская Федерация, МПК В01F 3/18. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А. Н. Лукаш, И. А. Клузов, А. С. Овчинников, А. В. Евсеев ; заявитель и патентообладатель Тульский государственный ун-т. – № 98107352/25 ; заявл. 21.04.1998 ; опубл. 10.05.1999, Бюл. № 13.
10. Пат. 2271243 Российская Федерация, МПК В01F 3/18. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А. Н. Лукаш, А. В. Евсеев, Т. А. Овчинникова, К. В. Власов, О. В. Карпухина ; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. – № 2004131116/15 ; заявл. 25.10.2004 ; опубл. 10.03.2006, Бюл. № 7. – 7 с.
11. Пат. 2708780 Российская Федерация, МПК В65G 53/46, В65G 65/48. Роторный питатель для сыпучего материала / А. В. Евсеев. – № 2019104089 ; заявл. 14.02.2019 ; опубл. 11.12.2019, Бюл. № 35. – 8 с.
12. Пат. 2707998 Российская Федерация, МПК В01F 3/18, В01F 9/10, В01F 15/02, В01F 15/04. Способ получения смеси из сыпучих компонентов и устройство для его осуществления / А. В. Евсеев. – № 2019104861 ; заявл. 21.02.2019 ; опубл. 03.12.2019, Бюл. № 34. – 8 с.
13. Смесительное оборудование : каталог компании «АЙРИХ» // Eirich. – URL : <https://www.eirich.ru/ru/tehnologija/smesitelnoe-oborudovanie/> (дата обращения: 10.02.2020).
14. Официальный сайт компании «Bühler», раздел «Инновации». – URL : <https://former.buhlergroup.com/europe/ru/515.htm> (дата обращения: 10.02.2020).
15. Промышленное оборудование. Продукты и решения для порошковых материалов // SIECHI. – URL : <http://siehindustry.com/ru/products/powder.html?yclid=6419871455732332848> (дата обращения: 10.02.2020).

Classifications of Nonmixing Components, Products and Devices

A. V. Evseev

*Department of Technological Systems of Food, Printing and Packaging Industries,
ews1972@mail.ru; Tula State University, Tula, Russia*

Keywords: heterogeneous mixtures; classification; mixture components; non-mixers; preparation of mixtures; mixing equipment.

Abstract: The theory and practice of obtaining mixtures from components with different physical and mechanical properties and fractions include mostly the formation processes of stochastic homogeneity and a wide range of equipment to implement these technologies. When the ratio of components in the mixture does not exceed 1:10, these methods make it possible to obtain mixtures of acceptable quality. However, the modern needs of society, when mixed products must be obtained with higher ratios of components and minimum doses of their consumption, traditional equipment does not always allow obtaining mixtures of a given quality. New classifications of components (media) and equipment for preparing heterogeneous mixtures are presented taking into account the possibility of deterministic formation of their homogeneity on a new class of technological machines, i.e. non-mixers.

References

1. <https://docs.cntd.ru/document/471834499> (accessed 10 February 2020).
2. Yevseyev A.V. [Nonmixing], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Tula State University. Technical science], 2019, no. 9, pp. 27-36. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
4. *GOST 16349-85 Smesiteli tsiklichnyye dlya stroitel'nykh materialov. Tekhnicheskiye usloviya* [GOST 16349-85 Cyclic mixers for building materials. Specifications], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1999, 10 p. (In Russ.)
5. *GOST R 54425-2011 Mashiny i oborudovaniye dlya pishchevoy promyshlennosti. Smesiteli lopastnyye. Trebovaniya po bezopasnosti i gigiyene* [GOST R 54425-2011 Machines and equipment for the food industry. Blade mixers. Requirements for safety and hygiene], Moscow: Standartinform, 2013, 35 p. (In Russ.)
6. *GOST EN 454-2013 Mashiny i oborudovaniye dlya pishchevoy promyshlennosti. Smesiteli planetarnyye. Trebovaniya po bezopasnosti i gigiyene* [GOST EN 454-2013 Machinery and equipment for the food industry. Planetary mixers. Requirements for safety and hygiene], Moscow: Standartinform, 2014, 67 p. (In Russ.)
7. Pershin V.F. *PhD Dissertation (Technical)*, Tambov, 1994, 428 p. (In Russ.)
8. Barantseva Ye.A. *PhD Dissertation (Technical)*, Ivanovo, 2010, 262 p. (In Russ.)
9. Lukash A.N., Klusov I.A., Ovchinnikov A.S., Yevseyev A.V. *Sposob smesheniya sypuchikh komponentov i ustroystvo dlya yego realizatsii* [A method of mixing loose components and a device for its implementation], Russian Federation, 1999, Pat. 2129911. (In Russ.)
10. Lukash A.N., Yevseyev A.V., Ovchinnikova T.A., Vlasov K.V., Karpukhina O.V. *Sposob smesheniya sypuchikh komponentov i ustroystvo dlya yego realizatsii* [A method of mixing loose components and a device for its implementation], Russian Federation, 2006, Pat. 2271243. (In Russ.)
11. Yevseyev A.V. *Rotornyy pitatel' dlya sypuchego materiala* [Rotary feeder for bulk material], Russian Federation, 2019, Pat. 2708780. (In Russ.)

12. Yevseyev A.V. *Sposob polucheniya smesi iz sypuchikh komponentov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [The method of obtaining a mixture of loose components and a device for its implementation], Russian Federation, 2019, Pat. 2707998. (In Russ.)

13. <https://www.eirich.ru/ru/tehnologija/smesitelnoe-oborudovanie/> (accessed 10 February 2020).

14. <https://former.buhlergroup.com/europe/ru/515.htm> (accessed 10 February 2020).

15. <http://sieheindustry.com/ru/products/powder.html?yclid=6419871455732332848> (accessed 10 February 2020).

Klassifizierungen von nicht mischbaren Mischkomponenten, Produkten und Geräten

Zusammenfassung: In der Theorie und Praxis der Herstellung von Mischungen aus Komponenten verschiedener physikalisch-mechanischer Eigenschaften und Fraktionen dominieren Prozesse der Stochastikbildung der Homogenität und eine breite Palette von Geräten für die Umsetzung dieser Technologien. Wenn das Verhältnis der Komponenten in der Mischung nicht größer als 1: 10 ist, ermöglichen diese Verfahren eine Mischung von akzeptabler Qualität zu bekommen. Aber die modernen Bedürfnisse der Gesellschaft, wenn gemischte Produkte mit höheren Verhältnissen von Komponenten und Mindestdosen ihres Verbrauchs erhalten werden müssen, die traditionelle Ausrüstung ermöglichen jedoch nicht immer, Mischungen einer bestimmten Qualität zu erhalten. Es sind neue Klassifikationen von Komponenten (Medien) und Geräten zur Herstellung heterogener Mischungen vorgestellt, wobei die Möglichkeit der deterministischen Bildung ihrer Homogenität auf einer neuen Klasse von technologischen Maschinen - Nichtmischern - berücksichtigt ist.

Classifications des composants de mélange nonmixers, des produits et des dispositifs

Résumé: Dans la théorie et la pratique de l'obtention des mélanges à partir des composants de diverses propriétés physiques et mécaniques et des fractions, prédominant des processus de formation d'homogénéité stochastique et un large éventail d'équipements pour la mise en œuvre de ces technologies. Avec un rapport de composants dans le mélange ne dépassant pas 1:10, ces méthodes permettent d'obtenir des mélanges de la qualité acceptable. Cependant, les besoins actuels de la société, lorsque les produits mélangés doivent être obtenus avec des ratios des composants plus élevés et des doses minimales de consommation, les équipements traditionnels ne permettent pas toujours d'obtenir des mélanges de la qualité prédéterminée. Sont présentées de nouvelles classifications des composants (milieux) et des équipements pour la préparation des mélanges hétérogènes tout en tenant compte de la possibilité d'une formation déterminée de leur singularité sur une nouvelle classe des machines technologiques - nonmixers.

Автор: Евсеев Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические системы пищевых, полиграфических и упаковочных производств», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», Тула, Россия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

В. В. Матюкин¹, В. Я. Борщев²

*АО «ЗАВКОМ» (1), Тамбов, Россия;
кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (2),
borschov@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: интерполяционная модель; кварцевый песок; кинетика процесса измельчения; математическое планирование эксперимента; экспериментальные исследования.

Аннотация: Проведено исследование процесса измельчения кварцевого песка в измельчителе ударно-стирающего действия. Установлено, что наиболее интенсивно песок измельчается при более высокой частоте вращения приводного вала установки, большей массе мелющих тел и меньшей массе измельчаемого материала. В работе реализован активный эксперимент с помощью процедуры математического планирования эксперимента. В результате обработки опытных данных в Microsoft Excel получена статистическая математическая модель процесса измельчения кварцевого песка в измельчителе ударно-стирающего действия.

Введение

В настоящее время кварцевый песок является одним из наиболее востребованных строительных материалов. Он используется в качестве необходимого компонента при производстве любых видов стекла, начиная от обычного оконного и заканчивая медицинскими и промышленными стеклянными изделиями. Кроме того, кварцевый песок соответствующей фракции используется в различных фильтрах для очистки воды – высокие сорбционные свойства делают его одним из лучших материалов для фильтров и других подобных устройств [1].

Кварцевый песок в качестве основного компонента входит практически во все строительные сухие смеси, цементные растворы, вяжущие материалы. При этом качество изделий напрямую зависит от его гранулометрического состава [2]. Однако качеству песка при производстве различных изделий из него уделяют недостаточно внимания. Тем не менее данные вопросы зачастую являются одними из важных. Природный кварцевый песок, как правило, характеризуется низкой однородностью. Достижение высокой однородности песка возможно только в результате его измельчения.

Цель работы – исследование процесса измельчения кварцевого песка в лабораторных условиях, построение математической модели с помощью математического планирования эксперимента.

Экспериментальная часть

Для получения тонкодисперсных материалов наиболее эффективными являются измельчители ударно-стирающего действия [3]. В настоящей работе исследование процесса измельчения кварцевого песка проведено на лабораторной установке, состоящей из сварного корпуса, расположенного на основании состоящего из двух частей, разделенных стенкой. В одной части расположен привод, а во второй – исполнительный механизм. Экспериментальная установка отличается от базовой использованием мелющих тел для процесса измельчения. Вследствие этого основным рабочим органом модернизированной установки является рабочая камера с мелющими телами – металлическими шарами (рис. 1). Конструкция установки позволяет варьировать скорость вращения рабочей камеры, степень ее заполнения материалом и время процесса измельчения. В процессе движения цилиндрической рабочей камеры измельчителя мелющие тела совершают в ней достаточно сложное (хаотическое) движение. Измельчение материала в корпусе происходит как под действием удара, так и истирания вследствие сложного пространственного движения рабочей камеры измельчителя.

Исходным измельчаемым материалом в процессе исследования являлся просушенный кварцевый песок. Начальный диаметр частиц кварцевого песка до измельчения определен с помощью микроскопа серии ЕС МЕТАМ РВ. Средний диаметр частиц песка перед измельчением равен $d_x = 0,849$ мм.

В качестве мелющих тел использовали металлические шары диаметром $d_{ш} = 8$ мм. Коэффициент заполнения рабочей камеры мелющими телами в процессе измельчения оставался постоянным, равным 5 %.

Относительно малый коэффициент заполнения рабочей камеры мелющими шарами объясняется необходимостью обеспечения высокой подвижности шаров в процессе измельчения и, как следствие, высокой эффективности измельчения в результате преобладающего воздействия на измельчаемый материал ударных нагрузок. При больших коэффициентах заполнения рабочей камеры мелющими телами эффективность измельчения несколько снижается, так как преобладающими в процессе измельчения становятся эффекты истирания.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем.



Рис. 1. Рабочая камера экспериментальной установки

В рабочую камеру измельчителя загружаются мелющие тела и определенная порция исходного материала. С помощью панели управления задаются режимные параметры измельчителя (частота вращения приводного вала и время измельчения), затем включается его привод.

В целях исследования кинетики процесса измельчения отбирали пробы измельченного материала через каждые пять минут. После выключения привода измельчителя из рабочей камеры выгружали измельченный материал вместе с мелющими телами на сито, служащее для разделения мелющих шаров и материала. Далее из массы измельченного материала из разных его объемов отбирали пробы [4] и проводили анализ размеров полученных частиц кварцевого песка с помощью микроскопического метода определения размеров частиц. С помощью микроскопа измеряли длину и ширину частиц. Каждый замер состоял из трех проб по 10 частиц в каждой. По полученным результатам рассчитывали средний проектированный диаметр частиц, мм, по формуле [5]

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}},$$

где S – площадь проекции сферической частицы, мм².

Общее время измельчения в каждом из опытов составляло 25 минут.

Экспериментальные исследования процесса измельчения кварцевого песка проводили при скорости вращения приводного вала, равной 36 об/мин.

На первом этапе исследовался процесс измельчения в зависимости от коэффициента заполнения рабочей камеры измельчаемым материалом β , %, равным 2,3 и 3,5.

Общая загрузка рабочей камеры, состоящая из измельчаемого материала и мелющих тел, определяется требуемыми условиями процесса измельчения, создаваемыми в рабочей камере измельчителя. Исходя из необходимости реализации процесса измельчения под действием ударно-истирающих воздействий, общая загрузка должна быть, на наш взгляд, не более 15 % объема рабочей камеры.

Результаты экспериментальных исследований процесса измельчения в зависимости от коэффициента заполнения материалом представлены на рис. 2.

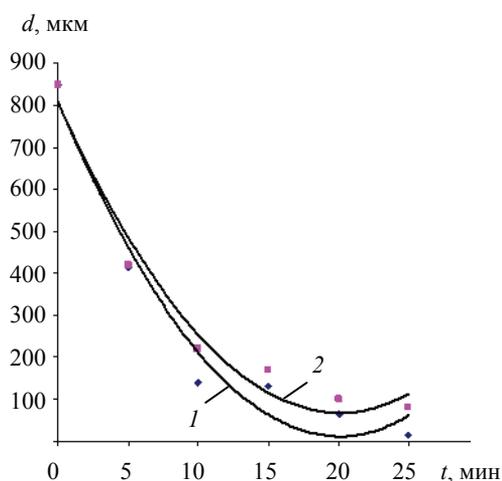


Рис. 2. Кинетика процесса измельчения кварцевого песка в зависимости от коэффициента заполнения рабочей камеры измельчаемым материалом, %:
1 – 2,30; 2 – 3,50

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что процесс измельчения частиц кварцевого песка наиболее интенсивно протекает в начальный период измельчения. Затем следует период малоинтенсивного помола, что вызвано влиянием на процесс измельчения образующихся при помоле мелких частиц. Мелкие частицы существенно снижают ударное воздействие металлических шаров на измельчаемый материал. Измельчение песка при меньшем коэффициенте заполнения протекает несколько интенсивнее, чем при большем коэффициенте (см. рис. 2). Анализ кривых показывает, что даже незначительное увеличение коэффициента заполнения рабочей камеры измельчаемым материалом существенно снижает эффективность помола.

Также проведено исследование влияния скорости вращения приводного вала рабочей камеры установки на процесс измельчения (рис. 3, а). Как видно, измельчение при большей частоте вращения приводного вала протекает интенсивнее, чем при меньшей, при одинаковых массах измельчаемого материала и мелющих тел.

Далее исследована кинетика процесса измельчения кварцевого песка в зависимости от коэффициента заполнения рабочей камеры мелющими телами (рис. 3, б). Установлено значительное влияние коэффициента заполнения рабочей камеры шарами на процесс измельчения. С увеличением коэффициента заполнения наблюдается повышение как интенсивности, так и эффективности помола частиц кварцевого песка.

После сравнительного анализа графических зависимостей можно отметить, что наиболее интенсивно песок измельчается при более высокой частоте вращения приводного вала установки, большей массе мелющих тел и меньшей массе измельчаемого материала.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности получения микроразмерных частиц кварцевого песка с помощью измельчителя ударно-истирающего действия.

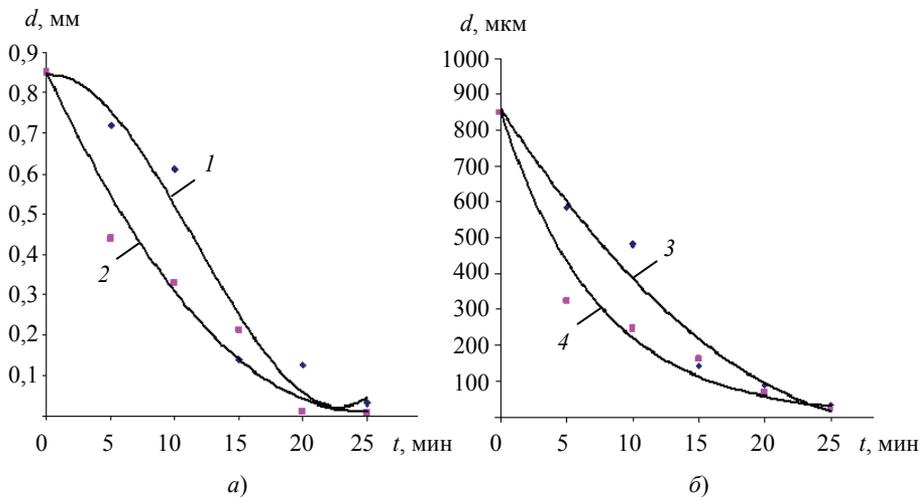


Рис. 3. Кинетика процесса измельчения кварцевого песка в зависимости от частоты вращения приводного вала (а), об/мин, и коэффициента заполнения рабочей камеры мелющими телами (б), %:
 1 – 36; 2 – 63; 3 – 5; 4 – 7

Построение интерполяционной модели

Процесс измельчения является достаточно сложным для аналитического описания. Поэтому на следующем этапе работы проведено исследование в целях получения интерполяционной модели процесса измельчения. Для этого реализован активный эксперимент с помощью процедуры математического планирования эксперимента [6].

Целью математического моделирования является получение информации, например, о влиянии факторов входа (масс кварцевого песка и мелющих тел, а также частоты вращения приводного вала рабочей камеры установки) на размер получаемых после измельчения частиц кварцевого песка. Такая взаимосвязь может быть представлена в виде уравнения, которое позволяет анализировать влияние факторов на выходной параметр и может быть использовано как основа описания качества исследуемого процесса.

Математическое описание модели в окрестности точки базового уровня можно получить варьированием каждого из факторов (массы кварцевого песка, массы мелющих тел и частоты вращения приводного вала экспериментальной установки) на двух уровнях, отличающихся от базового на величину интервала варьирования [6]. Интервал варьирования по каждому управляемому фактору выбирается так, чтобы приращение величины отклика к базовому значению можно было заметить при небольшом числе параллельных опытов.

Анализ вышеприведенных результатов позволил выделить основные факторы, влияющие на процесс измельчения: массы измельчаемого песка и мелющих тел, а также частоту вращения приводного вала рабочей камеры. Таким образом, реализован полный факторный эксперимент ($ПФЭ 2^3$).

На основе анализа проведенных ранее исследований и материалов экспертной оценки определены уровни и интервалы варьирования факторов (табл. 1). Составлен рандомизированный план проведения экспериментов по исследованию эффективности процесса измельчения (табл. 2).

Обработку результатов реализации плана ПФЭ 2^3 проводили с помощью программы Microsoft Excel. Однородность дисперсий проверяли с помощью критерия Кохрена. На основе полученных данных сделан вывод об однородности дисперсий. Гипотезы значимости коэффициентов уравнения регрессии проверяли с использованием критерия Стьюдента. В результате установлена значимость всех коэффициентов полученного уравнения.

Таблица 1

Основные факторы и уровни их варьирования

Уровень	Фактор		
	Масса, кг		Частота вращения приводного вала, c^{-1}
	песка	мелющих тел	
Верхний	0,150	1,2	1,05
Основной (нулевой)	0,125	0,8	0,90
Нижний	0,100	0,4	0,75
Кодированное обозначение	x_1	x_2	x_3
Верхний	+1	+1	+1
Основной (нулевой)	0	0	0
Нижний	-1	-1	-1

Матрица спланированных опытов в рандомизированном порядке

Номер опыта	x_1	x_2	x_3
4	0,15	0,400	0,75
3	0,15	0,400	1,05
8	0,10	0,400	1,05
5	0,10	1,200	1,05
7	0,10	0,400	1,05
2	0,15	1,200	0,75
1	0,15	1,200	1,05
6	0,10	1,200	0,75

Адекватность математической модели проверена с помощью критерия Фишера при принятом уровне значимости $\alpha = 0,95$. При этом подтверждена адекватность уравнения регрессии экспериментальным данным.

В результате обработки экспериментальных данных в Microsoft Excel построена статистическая математическая модель процесса измельчения кварцевого песка в кодированном виде

$$y = 32,875 + 1,3x_1 - 16x_2 - 4,45x_3 - 3,175x_1x_2 + 1,375x_1x_3 - 2,775x_2x_3 + 0,85x_1x_2x_3.$$

Полученное уравнение регрессии устанавливает зависимость между критерием оптимизации y (средний диаметр частиц измельченного материала d) и следующими факторами: массой измельчаемого материала (песка), массой мелющих тел и частотой вращения приводного вала рабочей камеры.

Обсуждение результатов и выводы

Проведенные экспериментальные исследования позволяют построить с помощью математического планирования статистическую математическую модель и получить информацию, например, о влиянии факторов входа (масс кварцевого песка и мелющих тел и частоты вращения рабочей чаши) на средний размер, получаемых после измельчения, частиц кварцевого песка. Такая взаимосвязь представлена в виде уравнения, которое позволяет анализировать влияние факторов на целевую функцию и может быть использована как основа описания качества исследуемого процесса в промышленных масштабах.

О степени влияния на параметр оптимизации каждого из факторов свидетельствует величина коэффициентов при них. Анализ полученного уравнения показывает, что наиболее значимо на средний диаметр частиц измельченного материала влияет масса мелющих тел в рабочей камере, а также частота вращения приводного вала измельчителя. При этом увеличение данных факторов приводит к уменьшению среднего диаметра частиц измельченного материала.

В работе на примере измельчения кварцевого песка продемонстрирована способность модели изменяться в зависимости от воздействия различных факторов. На основании экспериментальных исследований можно предложить модель модернизации существующих установок ударно-стирающего действия с целью интенсификации процесса измельчения твердых материалов.

Список литературы

1. Хинт, Й. А. Основы производства силикальцитных изделий / Й. А. Хинт. – М. : Госстройиздат, 1962. – 642 с.
2. Шванов, В. Н. Песчаные породы и методы их изучения / В. Н. Шванов. – Л. : Недра, 1969. – 248 с.
3. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – М. : Химия, 1977. – 368 с.
4. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
5. Гаврилова, Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов : учеб. пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров, О. В. Яровая. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с.
6. Макаричев, Ю. А. Методы планирования эксперимента и обработки данных : учеб. пособие / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников. – Самара : Самарский гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

A Study of the Grinding Process of Quartz Sand

V. V. Matyukin¹, V. Ya. Borshchev²

JSC “ZAVKOM” (1), Tambov, Russia;

Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (2),
borschov@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: interpolation model; quartz sand; kinetics of the grinding process; mathematical planning of experiment; experimental research.

Abstract: A study of the process of grinding quartz sand in a grinder with an impact-abrasive action was made. It has been found that sand is crushed most intensively at a higher frequency of rotation of the drive shaft of the installation, a larger mass of grinding bodies and a smaller mass of the crushed material. An active experiment is implemented in the work using the procedure of mathematical planning of the experiment. As a result of processing experimental data in Microsoft Excel, a statistical mathematical model of the process of grinding quartz sand in a grinder with an impact-abrasive action was obtained.

References

1. Khint Y.A. *Osnovy proizvodstva silikal'tsitnykh izdeliy* [Fundamentals of the production of silicate products], Moscow: Gosstroyizdat, 1962, 642 p. (In Russ.)
2. Shvanov V.N. *Peschanyye porody i metody ikh izucheniya* [Sandy rocks and methods of their study], Leningrad: Nedra, 1969, 248 p. (In Russ.)
3. Sidenko P.M. *Izmel'cheniye v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in the chemical industry], Moscow: Khimiya, 1977, 368 p. (In Russ.)
4. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 216 p. (In Russ.)
5. Gavrilova N.N., Nazarov V.V., Yarovaya O.V. *Mikroskopicheskiye metody opredeleniya razmerov chastits dispersnykh materialov: uchebnoye posobiye* [Microscopic methods for determining the size of particles of dispersed materials: textbook], Moscow: RKHTU im. D. I. Mendeleeva, 2012, 52 p. (In Russ.)

6. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. *Metody planirovaniye eksperimenta i obrabotki dannykh: uchebnoye posobiye* [Methods of experiment planning and data processing: a tutorial], Samara: Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2016, 131 p. (In Russ.)

Untersuchung des Mahlprozesses von Quarzsand

Zusammenfassung: Es ist eine Studie über den Prozess des Mahlens von Quarzsand in einem Häcksler mit Schlagabriebwirkung durchgeführt. Es hat sich herausgestellt, dass bei einer höheren Drehzahl der Antriebswelle der Anlage, einer größeren Masse von Mahlkörpern und einer geringeren Masse des Brechgutes der Sand am intensivsten zerkleinert wird. Mit dem Verfahren der mathematischen Versuchsplanung ist in der Arbeit ein aktives Experiment implementiert. Als Ergebnis der Verarbeitung von experimentellen Daten in Microsoft Excel ist ein statistisches mathematisches Modell des Prozesses des Mahlens von Quarzsand in einem Häcksler mit einer Schlagschleifwirkung erhalten.

Étude du processus de broyage du sable de quartz

Résumé: Est réalisée une étude du processus du broyage du sable de quartz dans un broyeur à impact. Est établi que le sable est broyé le plus intensément à une vitesse plus élevée de l'arbre d'entraînement de l'installation, avec la plus grande masse de corps de broyage et la moindre masse du matériau broyé. L'article illustre une expérience active à l'aide de la procédure de la planification mathématique de l'expérience. À la suite du traitement de données expérimentales dans Microsoft Excel, est obtenu un modèle mathématique statistique du processus du broyage du sable de quartz dans un broyeur à impact-abrasion.

Авторы: *Матюкин Владимир Викторович* – инженер, АО «ЗАВКОМ», Тамбов; *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ПЛАСТИКАЦИИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ВАЛЬЦЕВАНИИ

М. В. Соколов

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,
msok68@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: величина сдвига; координаты сечения входа и выхода; пластичность; полезная мощность; условная прочность при разрыве.

Аннотация: Представлены экспериментальная установка на базе лабораторных и промышленных валковых машин, методика и результаты исследования физико-механических показателей резиновых смесей в зависимости от степени пластикации при непрерывном и периодическом режимах их вальцевания. Дан сравнительный анализ изменения значений основных показателей качества и учтено влияние режимных и конструктивных параметров процесса вальцевания с помощью интегрального критерия качества – величины сдвига, рациональные значения которого позволяют прогнозировать и обеспечивать необходимые или заданные показатели качества резиновых смесей.

Для проведения исследований разработанного технологического процесса пластикации резиновых смесей спроектирована и изготовлена экспериментальная установка ЭУ2 на базе вальцов СМ 200 80/80 с полыми валками диаметром 80 мм и рабочей длиной 200 мм [1]. Валки расположены в горизонтальной плоскости и вращаются навстречу друг другу. Регулировка частоты вращения валков осуществляется плавно с помощью тиристорного преобразователя. Валки вальцов смонтированы в подшипниках скольжения и установлены в корпусах на станинах. Передачу вращающего момента осуществляют передаточные и фрикционные шестерни от вала электродвигателя постоянного тока типа 4ПБМ160МГМ04 через редуктор. Число оборотов валков, об/мин: задний 0...40,8; передний 0...30; фрикции между валками: 1:1; 1:1,2; 1:1,36.

Приводные и передаточные шестерни заключены в кожухи, нижняя часть которых представляет собой масляные ванны для смазки пар. Каждая из двух станин сверху снята поперечиной и установлена на фундаментной плите. Корпуса подшипников заднего валка закреплены в станинах неподвижно; переднего – установлены так, что имеют возможность перемещаться в станинах с целью регулировки зазора между валками. Механизм регулировки зазора позволяет перемещать подшипники переднего валка по направляющим станины и фиксировать их в заданном положении. Регулировка зазора проводится при помощи пары «винт – гайка», расположенных по обе стороны переднего (рабочего) валка.

На каждой из станин вальцов, со стороны рабочего валка, имеются указатели величины зазора для устранения перекаса валков. Механизм регулировки зазора снабжен предохранительным устройством. При переработке резиновой смеси выставленная величина зазора проверялась прокатыванием между валками с левой и правой сторон свинцовых полос и измерением их толщины ручным

калиброммером с точностью до $\pm 0,05$ мм. Для поддержания заданного температурного режима пластикации резиновых смесей валки вальцов снабжены устройствами для подвода теплоносителя. Подогрев теплоносителя осуществляется в термостате типа ТС-16.

Замер температуры поверхности валков проводился с применением лучковой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 до и после опыта. Измерение температуры вальцуемого материала осуществлялось посредством игольчатой насадки термометра термоэлектрического контактного ТПК-1 в процессе всего опыта.

С целью предотвращения попадания обрабатываемого материала в подшипники валков установлены стрелы ограничительные. Обеспечение безопасности обслуживающего персонала достигается установкой на вальцах аварийного устройства. В экспериментальной установке применено электродинамическое торможение. Для смазки поверхностей трущихся пар вальцы снабжены системой смазки. Для обеспечения непрерывной переработки отходов вальцы снабжены загрузочным бункером и отборочным устройством.

Определение безразмерных координат сечения входа X_H и выхода X_K . Измерение координаты сечения входа x_H проводили следующим образом. После выхода на заданный установившийся режим вальцевания вальцы останавливали и проводили измерение величин c и e , как показано в книге [1].

Величина координаты сечения входа x_H определяется следующим образом:

$$x_H = R + c - e,$$

где R – радиус валка, м.

Величина безразмерной координаты сечения входа X_H определяется по формуле

$$X_H = \frac{x_H}{\sqrt{2Rh_{02}}},$$

где h_{02} – минимальный межвалковый зазор, см.

Между безразмерными координатами входа X_H и выхода X_K существует связь, представленная в работе [74]:

$$\int_{X_H}^{X_K} \frac{(X_K^2 - X^2)^{1/n} dX}{(1 + X^2)^{1+2/n}} - \int_{X_K}^{-X_K} \frac{(X - X_K^2)^{1/n} dX}{(1 + X^2)^{1+2/n}} = 0.$$

Решая это интегральное уравнение численными методами, находим при каждом значении индекса течения n безразмерную координату сечения входа X_H , которой соответствует единственное значение безразмерной координаты сечения выхода X_K . Зависимость X_K от X_H при различных значениях n представлена на рис. 1 [1].

Для определения оптимального объема материала на валках необходимо знать, при какой величине безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки X_H величина удельной мощности P , характеризующая интенсивность механического воздействия на обрабатываемый материал, будет максимальной. Удельная мощность P рассчитывается по формулам [1]

$$P = \frac{N_n}{V} = \mu \left(\frac{U_1}{h_{02}} \right)^{n+1} \left(\frac{2n+1}{n} \right)^n F_0 \left(X_K, n, \frac{R}{h_{02}} \right), \quad (1)$$

где N_n – полезная мощность, расходуемая на деформацию обрабатываемого материала в зазоре валков вальцов, работающих по непрерывному режиму, кВт; V – величина объема материала, находящегося на валках вальцов, м³; μ – вязкость материала, Па·с; U_1 – частота вращения переднего валка, об/мин; h_{02} – половина величины минимального зазора между валками, м; R – радиус валка, м;

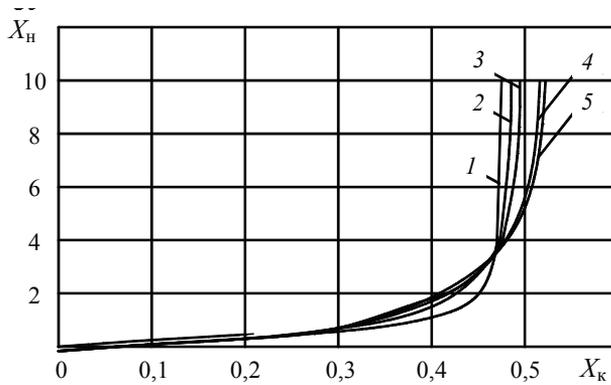


Рис. 1. Зависимости координаты X_k от X_n при различных значениях n :
 1 – 1; 2 – 0,5; 3 – 0,38; 4 – 0,2; 5 – 0,125

$$F_0\left(X_k, n, \frac{R}{h_{02}}\right) = \frac{\int_{X_{k0}}^{X_{kk}} \int_{X_k}^{X_n} \frac{(\pm X^2 \mp X_k^2)^n}{(1+X^2)^{2n}} \Psi(X_k) dX dX_k}{\int_{X_{k0}}^{X_{kk}} \left\{ \frac{8,88}{\sqrt{\frac{R}{h_{02}}}} (1+X_k^2) \left[\frac{R}{h_{02}} + (1+X_k^2) \right] - (1+X_k^2) \times \right.} \rightarrow$$

$$\left. \times (X_k + X_n) + X_n + X_k + \frac{1}{3} (X_n^3 + X_k^3) \right\} \Psi(X_k) dX_k}, \quad (2)$$

где

$$\Psi(X_k) = \frac{6X_k^4 + 10X_k^2}{(1+X_k^2)^2} (X_k + X_k^3 + 0,6X_k^5 + 0,143X_k^7 - X_n - X_n^3 - 0,6X_n^5 -$$

$$- 0,143X_n^7) + 6X_k \arctg X_n (X_n + X_n^3 + 0,6X_n^5 + 0,143X_n^7) - 6X_k \arctg X_k \times$$

$$\times (X_n + X_n^3 + 0,6X_n^5 + 0,143X_n^7) - X_k^3 (3,4 + 3,34X_k^2 + 0,86X_k^4) +$$

$$+ X_k X_n^2 (3,4 + 3,34X_n^2 + 0,86X_n^4) + 1,4X_k \ln(1+X_k^2) - 1,4X_n \ln(1+X_n^2). \quad (3)$$

С помощью программы для ЭВМ [2], алгоритм которой представлен на рис. 2, а идентификаторы в табл. 1, построены графические зависимости удельной мощности P от величины безразмерной координаты сечения входа в зоне загрузки X_n (для трех различных значений R/h_{02}) [1].

Анализ результатов расчета показывает наличие максимума в области $X_n = 2,1$. Следовательно, существует такой оптимальный объем материала на валках, при котором работа, затрачиваемая на его деформацию, будет максимальной. Поэтому ведение непрерывного процесса вальцевания резиновых смесей с таким объемом загрузки будет наиболее рационально с точки зрения интенсивности механического воздействия на обрабатываемый материал.

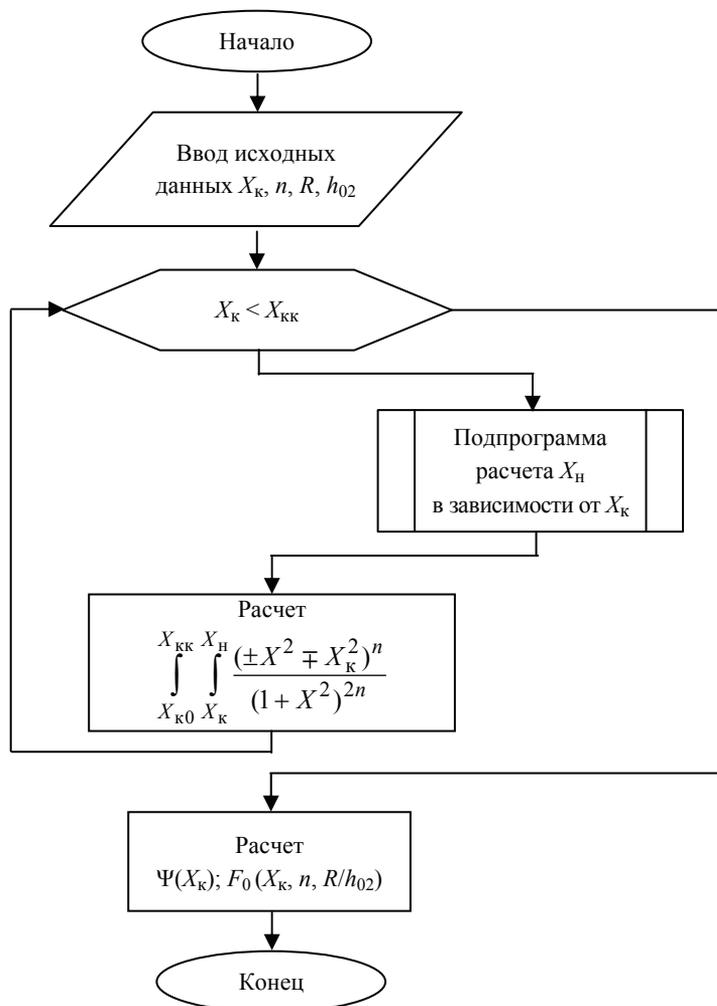


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета удельной мощности, затрачиваемой на процесс вальцевания

Таблица 1

Идентификаторы к программе расчета удельной мощности P

Величина	Обозначение	Обозначение в программе (идентификаторы)
Безразмерная координата выхода	$X_{к}$	Xk
Текущее значение безразмерной координаты выхода	$X_{кк}$	Xkk
Безразмерная координата входа	$X_{н}$	Xn
Текущее значение безразмерной координаты	X	X
Радиус валка, см	R	R
Индекс течения материала	n	n
Минимальный межвалковый зазор, см	h_{02}	h0

Экспериментальные исследования проводили следующим образом. Включали питание ЭУ2; устанавливали заданный минимальный зазор между валками h_0 ; монтировали отборочное устройство; устанавливали фрикцию между валками f ; разогревали до заданной температуры поверхности валков; устанавливали частоту вращения переднего валка $u = 5$ об/мин; непрерывно загружали с левой стороны вальцов резиновую смесь; вальцевали ее, проверяли точность зазора между валками и измеряли температуру резиновой смеси; после выхода на заданный установившийся режим регистрировали показания амперметра, массу полученной ленты заданного сечения за определенный промежуток времени с целью определения производительности; полученные ленты резиновой смеси наматывали на бобину для последующего определения прочности и относительного удлинения при разрыве. Затем валковую установку останавливали. После этого устанавливали частоту вращения переднего валка $u = 10$ об/мин и проводили действия как и при $u = 5$ об/мин. Такой же порядок действий при $u = 15; 20; 25; 30$ об/мин. За результат испытаний принимали среднее арифметическое всех параллельных определений для каждого эксперимента.

Прочность и относительное удлинение при разрыве вулканизованных образцов, полученных по непрерывному процессу вальцевания, определяли по следующей методике.

Пластикат резиновой смеси закладывался в пресс-форму, которую устанавливали в вулканизационный пресс и прессовали при температуре 140 °С, давлении 100 кгс/см² в течение 30 мин. Из полученных прессованием пластин вырубались образцы.

Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 11262–2017. Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, трещин, раковин и других дефектов. Образцов для каждого опыта было не менее пяти.

Испытания проводились на разрывной машине СМГИ-Ц-250. Скорость движения захватов в испытательной машине 28 мм/мин. Перед испытанием измеряли толщину и ширину образцов в их рабочей части с точностью до $0,01$ мм не менее чем в трех местах. Образцы, у которых результаты измерений толщины и ширины рабочей части различались больше, чем на $0,2$ мм, заменялись другими.

Перед испытанием на образец наносили метки, ограничивающие его базу и положение кромок захватов. Нанесение меток не должно приводить к изменению свойств образца и его разрушению по меткам. Образец закрепляли в захваты разрывной машины по меткам, определяющим положение кромок захватов на образце, так, чтобы исключить его скольжение в процессе испытания, при этом разрушение его не должно происходить в месте закрепления. Продольная ось образца должна совпадать с осью захватов и направлением хода подвижного захвата.

В момент достижения предела разрушения измеряли нагрузку и удлинение. В расчет принимали результаты, полученные на образцах, разрушившихся в пределах рабочей части. Условную прочность при разрыве f_p вычисляли по формуле

$$f_p = P_p / (bh),$$

где P_p – нагрузка, при которой образец разрушался, кгс; b, h – ширина и толщина рабочей части образца, см.

Относительное удлинение при разрыве ε вычисляли по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 100 \%,$$

где Δl – приращение образца при разрыве, мм; l_0 – начальная длина образца, см.

За результат испытаний принимали среднее арифметическое значение из трех измеренных значений параметра для каждого эксперимента.

Зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_{02} = 1,5$ мм, различных значений фрикции ($f = 1:1,1; 1:1,2; 1:1,36$) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси НО-68НТА показаны на рис. 3, из которого видно, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности соответствуют фрикции $f = 1:1,2$ и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 4 представлены зависимости предела условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$, различных значениях минимального межвалкового зазора ($h_{02} = 1,0; 1,5; 2$ мм) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси НО-68НТА. Экспериментальные исследования показали, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$, минимальному межвалковому зазору $h_{02} = 1,5$ мм и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 5 показаны зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v [3] при периодическом и непрерывном режиме работы валцов на примере резиновой смеси шифра НО-68НТА. Расчет интегрального критерия качества – величины сдвига γ_v , рассмотрен в статье [3]. Из анализа кривых можно сделать вывод, что лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания примерно в 2 раза меньше, чем при периодическом. Следовательно, производительность увеличивается примерно в 2 раза.

Для проверки влияния суммарной величины сдвига на физико-механические показатели пластика резиновой смеси шифра НО-68НТА проведены экспериментальные исследования на валцах с диаметром валков 320 мм и рабочей длиной валка 550 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных построены графические зависимости физико-механических показателей пластика f_p , Пл от величины сдвига γ_v , показанные на рис. 6, в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке ЭУ2.

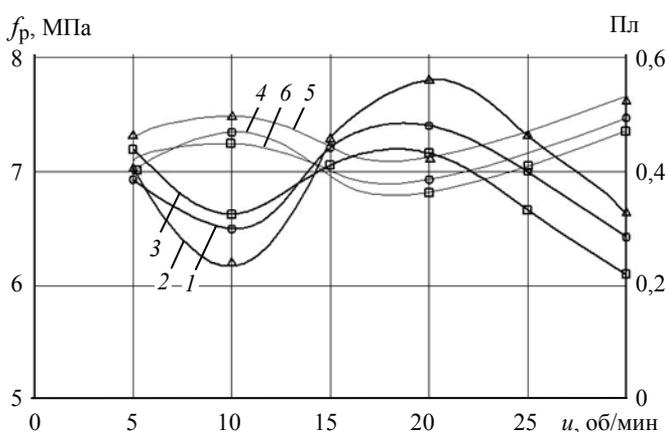


Рис. 3. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1–3) и пластичности Пл (4–6) от частоты вращения u при $h_{02} = 1,5$ мм, различных значениях фрикции f и непрерывном режиме работы валцов: 1, 4 – 1:1,1; 2, 5 – 1:1,2; 3, 6 – 1:1,36

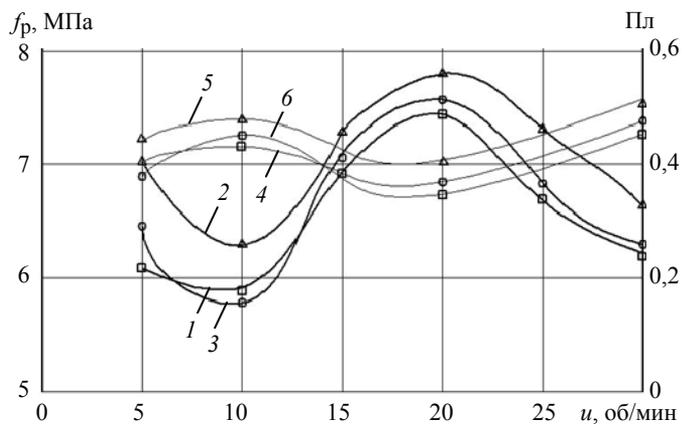


Рис. 4. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1 – 3) и пластичности Пл (4 – 6) от частоты вращения u при фрикции $f = 1; 1,2; 2$; непрерывном режиме работы валцов и различных значениях межвалкового зазора h_{02} , мм: 1, 4 – 1; 2, 5 – 1,5; 3, 6 – 2

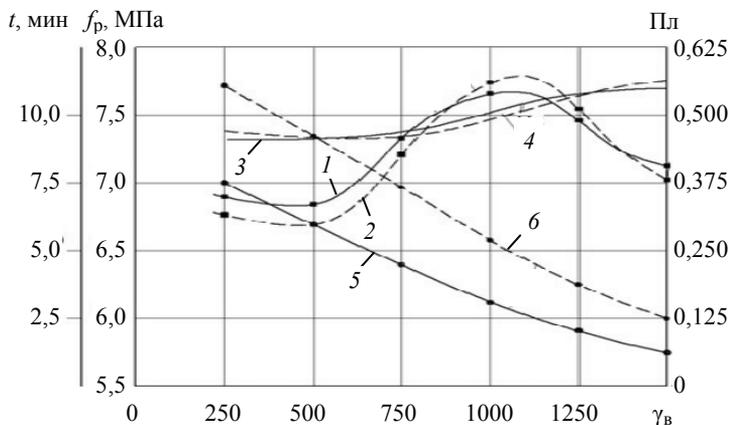


Рис. 5. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1, 2), пластичности Пл (3, 4) и времени вальцевания t (5, 6) от величины сдвига γ_B при периодическом (2, 4, 6) и непрерывном (1, 3, 5) режимах работы валцов (резиновая смесь шифра НО-68НТА)

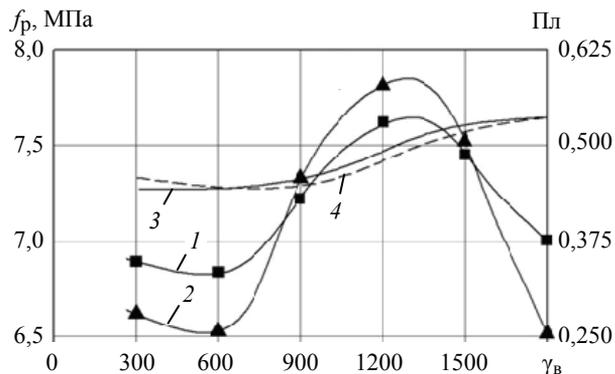


Рис. 6. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1, 2), пластичности Пл (3, 4) от величины суммарного сдвига γ_B , полученные на валцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) (1, 3) и промышленных валцах ЛБ 320/320 550 (2, 4)

Из анализа кривых (см. рис. 5) можно сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели пластика резиновой смеси наблюдаются при такой же величине сдвига γ_v , как и в экспериментальных исследованиях на промышленных вальцах СМ 320/320 550 (см. рис. 6). Расхождения между физико-механическими показателями составили не более 9 %.

На рисунке 7 показаны зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при $h_0 = 1,5$ мм, различных значений фрикции ($f = 1:1,1; 1:1,2; 1:1,36$) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси ИРП-6721. Анализ экспериментальных данных показывает, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$ и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 8 представлены зависимости условной прочности при разрыве f_p и пластичности Пл от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$, различных значениях межвалкового зазора ($h_0 = 1,0; 1,5; 2$ мм) и непрерывном режиме вальцевания резиновой смеси ИРП-6721. Из анализа экспериментальных зависимостей видно, что максимальное значение условной прочности при разрыве f_p и нормированное значение пластичности Пл соответствуют фрикции $f = 1:1,2$, минимальному межвалковому зазору $h_{02} = 1,5$ мм и частоте вращения $u = 20$ об/мин.

На рисунке 9 показаны зависимости условной прочности при разрыве f_p , пластичности Пл и времени вальцевания t от величины сдвига γ_v при периодическом и непрерывном режимах работы вальцов на примере резиновой смеси шифра ИРП-6721.

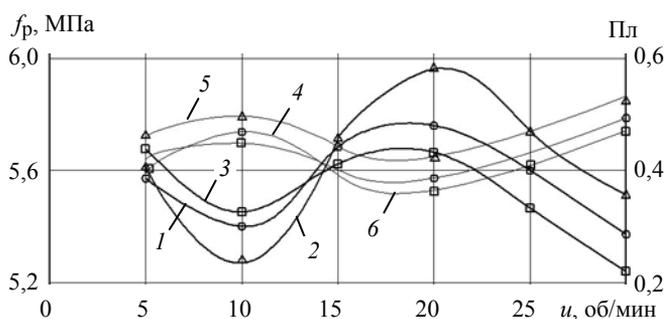


Рис. 7. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1 – 3) и пластичности Пл (4 – 6) от частоты вращения u при $h_0 = 1,5$ мм; непрерывном режиме работы вальцов и различных значениях фрикции f : 1, 4 – 1:1; 2, 5 – 1:1,2; 3, 6 – 1:1,36

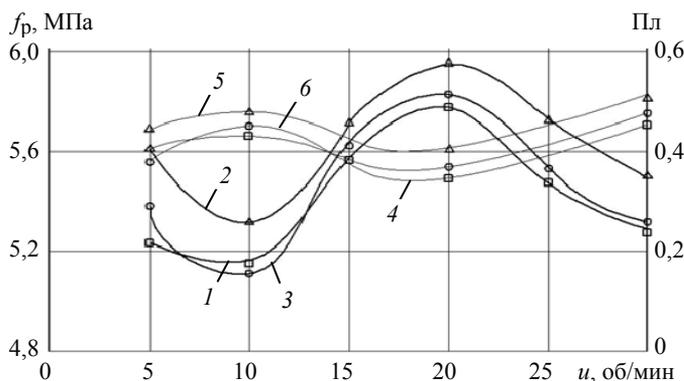


Рис. 8. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1 – 3) и пластичности Пл (4 – 6) от частоты вращения u при фрикции $f = 1:1,2$; непрерывном режиме работы вальцов и различных значениях минимального межвалкового зазора h_{02} : 1, 4 – 1; 2, 5 – 1,5; 3, 6 – 2

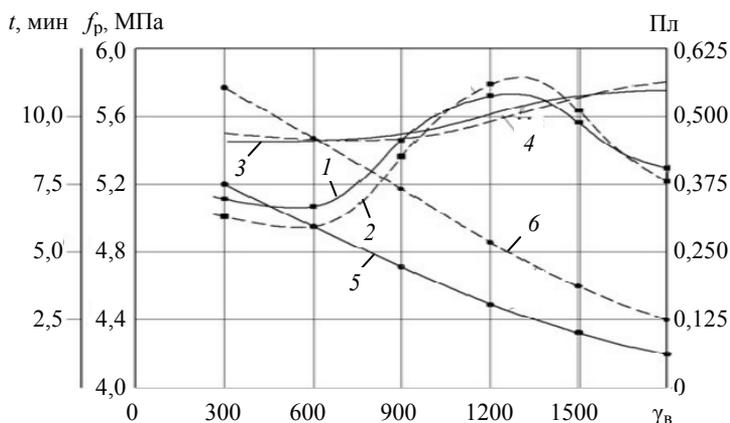


Рис. 9. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1, 2), пластичности Пл (3, 4) и времени вальцевания t (5, 6) от величины сдвига γ_v при периодическом (2, 4, 6) и непрерывном (1, 3, 5) режимах работы вальцов (резиновая смесь шифра ИРП-6721): $f = 1:1,2; h_{02} = 1,5$ мм

Из анализа зависимостей можно сделать вывод, что лучшие показатели по прочности наблюдаются при одинаковой величине сдвига, однако при непрерывном процессе время вальцевания примерно в 2 раза меньше, чем при периодическом (см. рис. 9). Следовательно, производительность увеличивается примерно в 2 раза.

Для проверки влияния суммарной величины сдвига на физико-механические показатели пластика резиновой смеси шифра ИРП-6721 проведены эксперименты на вальцах с диаметром валков 320 мм и рабочей длиной 550 мм. После расчета суммарной величины сдвига и обработки экспериментальных данных построены графические зависимости физико-механических свойств пластика f_p от величины сдвига γ_v в сравнении с такими же зависимостями, полученными на экспериментальной установке ЭУ2 (рис. 10). Из анализа зависимостей можно сделать вывод, что наилучшие физико-механические показатели пластика резиновой смеси наблюдаются при такой же величине сдвига γ_v , как и при экспериментальных исследованиях на промышленных вальцах ЛБ 320/320 550. Расхождения между физико-механическими показателями составили не более 7 %.

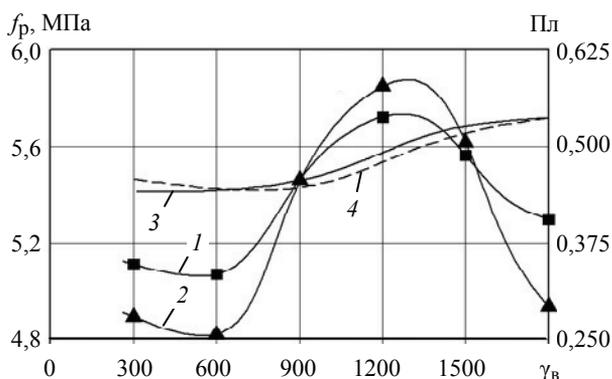


Рис. 10. Зависимости условной прочности при разрыве f_p (1, 2) и пластичности Пл (3, 4) от величины суммарного сдвига γ_v , полученные на вальцах СМ 80/80 200 (ЭУ2) (1, 3) и промышленных вальцах ЛБ 320/320 550 (2, 4)

Список литературы

1. Методология расчета оборудования для производства длиномерных резинотехнических заготовок заданного качества / М. В. Соколов, А. С. Клинков, П. С. Беляев [и др.]. – М. : Машиностроение, 2009. – 352 с.

2. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов / А. С. Клинков, М. В. Соколов, В. И. Кочетов [и др.]. – М. : «Изд-во Машиностроение-1», 2005. – 320 с.

3. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А. С. Клинков, М. В. Соколов, Д. Л. Полушкин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870 – 881.

The Influence of the Plasticization Degree on the Physical and Mechanical Properties of the Rubber Compound during Continuous Rolling

M. V. Sokolov

*Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering,
msok68@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: shift value; coordinates of the entry and exit sections; plastic; useful power; conditional tensile strength.

Abstract: An experimental setup based on laboratory and industrial roller machines, a methodology and results of studying the physical and mechanical parameters of rubber compounds depending on the degree of plasticization in continuous and periodic modes of their rolling are presented.

A comparative analysis of the change in the values of the main quality indicators is given and the influence of the regime and design parameters of the rolling process is taken into account using the integral quality criterion - the magnitude of the shift, the rational values of which make it possible to predict and provide the necessary or specified indicators of the quality of rubber compounds.

References

1. Sokolov M.V., Klinkov A.S., Belyayev P.S., Skuratov V.K., Odnol'ko V.G. *Metodologiya rascheta oborudovaniya dlya proizvodstva dlinnomernykh rezinotekhnicheskikh zagotovok zadannogo kachestva* [Methodology for calculating equipment for the production of long-length rubber blanks of a given quality], Moscow: Mashinostroyeniye, 2009, 352 p. (In Russ.)

2. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Kochetov V.I., Belyayev P.S., Odnol'ko V.G. *Avtomatizirovannoye proyektirovaniye valkovykh mashin dlya pererabotki polimernykh materialov* [Computer-aided design of roller machines for the processing of polymeric materials], Moscow: «Izdatel'stvo Mashinostroyeniye-1», 2005, 320 p. (In Russ.)

3. Klinkov A.S., Sokolov M.V., Polushkin D.L., Shashkov I.V., Belyayev P.S., Tulyakov D.V. [Application of integral quality criteria in the processing of polymeric materials by the roller-screw method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 870-881. (In Russ., abstract in Eng.)

Der Einfluss des Plastifizierungsgrades auf die physikalisch-mechanischen Indikatoren der Gummimischung beim kontinuierlichen Rollen

Zusammenfassung: Es sind ein Versuchsaufbau auf Basis der Labor- und Industrierollenmaschinen, eine Methodik und Ergebnisse der Untersuchung der physikalischen und mechanischen Parameter von Gummimischungen in Abhängigkeit vom Plastifizierungsgrad in kontinuierlichen und periodischen Modi ihres Walzens vorgestellt. Es ist eine vergleichende Analyse der Änderungen der Werte der wichtigsten Qualitätsindikatoren gegeben und der Einfluss des Regimes und der Konstruktionsparameter des Walzprozesses ist mit Hilfe eines integralen Qualitätskriteriums berücksichtigt - der Größe der Verschiebung, deren rationale Werte es ermöglichen, die erforderlichen oder vorgegebenen Qualitätsindikatoren vorherzusagen und Indikatoren für die Qualität von Gummimischungen sicherzustellen.

Influence du degré de la plastification sur les indicateurs physiques et mécaniques du mélange de caoutchouc lors du laminage continu

Résumé: Sont présentées une installation expérimentale à la base de machines à rouleaux de laboratoire et industrielles, la méthodologie et les résultats de l'étude des indicateurs physico-mécaniques des mélanges de caoutchouc en fonction du degré de la plastification dans les modes du laminage continu et périodique. Est donnée une analyse comparative de l'évolution des valeurs des principaux indicateurs de qualité; est prise en compte l'influence des paramètres de mode et de conception du processus du roulement à l'aide du critère de la qualité intégral - la valeur de cisaillement dont les valeurs nutritionnelles permettent de prédire et de fournir des indicateurs de qualité nécessaires ou prédéterminés pour les mélanges de caoutchouc.

Автор: *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ПРИМЕРЕ РОТОРНОЙ СВОБОДНО-ЛОПАСТНОЙ МАШИНЫ

И. В. Иванова¹, Ю. В. Родионов^{1,2}, Н. В. Воронин²,
А. И. Скоморохова³, А. Н. Пахомов⁴, А. Е. Ломовских⁵

*Кафедра инженерных дисциплин (1),
Тамбовский филиал ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ», Тамбов, Россия;
кафедры: «Механика и инженерная графика» (2), «Компьютерно-
интегрированные системы в машиностроении» (3);
«Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (4),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;
кафедра автомобильной подготовки (5), ФГКВООУ ВО «ВУНЦ ВВС
«Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,
Воронеж, Россия*

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; орбитальный двигатель; проектный расчет; роторно-поршневой двигатель.

Аннотация: Рассмотрены преимущества роторно-поршневых двигателей внутреннего сгорания в сравнении с поршневыми. Отмечены основные недостатки двигателя Ванкеля и орбитального двигателя Сейрича. Дано описание конструкции роторного свободно-лопастного двигателя внутреннего сгорания, разработанного на основе двигателей Ванкеля и Сейрича. Показана модель конструкции лопасти с управлением посредством самосинхронизации при помощи динамического гасителя, размещенного внутри лопасти на гибком элементе. Представлено решение системы самосинхронизации лопасти с динамическим гасителем. Рассмотрена возможность использования изделий из полимерных материалов в орбитальном двигателе, в том числе с использованием технологии магнито-термического поверхностного упрочнения.

Введение

В настоящее время в качестве силовых установок большинства машин применяются поршневые двигатели внутреннего сгорания. В основе их работы заложен принцип преобразования возвратно-поступательного движения, осуществляемого поршнем (или поршнями), во вращательное движение, которое совершает коленчатый вал, посредством кривошипно-шатунного механизма. Однако по сравнению с роторно-поршневыми двигателями (РПД) они имеют низкий КПД. Роторно-поршневые двигатели не получили повсеместного распространения, хотя обладают некоторыми преимуществами, представляющими практический интерес:

- достаточно компактны;
- имеют сравнительно небольшой вес;
- большая мощность и хорошая уравновешенность [1].

В первой конструкции РПД, предложенной Ванкелем [2], ротор-поршень совершает планетарное движение, но при своем достаточно простом исполнении расходует завышенное количество топлива ввиду растянутой формы камеры.

Ротор снабжен уплотнительными полосами, которые испытывают трение со стороны боковых внутренних тороидальных стенок, что приводит к серьезным вибрациям уплотнительных полос и высокому износу из-за постоянного изменения контура поверхности данных стенок. Тороидальные поверхности ведут к неравномерному разогреву с одновременным изменением положения камеры сгорания относительно корпуса с возникновением температурных напряжений, что приводит к их искривлению. Указанные недостатки стали причиной, по которой двигатель Ванкеля не получил широкого распространения. В серийном производстве он используется только крупнейшей японской корпорацией Toyota Motor Corporation на автомобилях марки «Мазда».

Конструкцию орбитального двигателя с круговым параллельным движением ротора-поршня предложил австралийский инженер Сейрич [3]. Его отличие от двигателя Ванкеля заключается в использовании формы ротора, вращающегося вокруг внутренней части двигателя. Недостаток РПД Сейрича состоит в сложности обеспечения уплотнения лопастей в роторе. Это обусловлено движением лопастей, создающих рабочие объемы между ротором и статором. В то же время концами этих лопастей относительно ротора совершается движение, аналогичное ползуну в синусном механизме. Данный принцип сходен с режимами работы ЖВН [4, 5]. В итоге, двигатель Сейрича мог выдержать частоту вращения не более 4000 об/мин.

Устранить данный недостаток можно путем обеспечения возвратно-вращательного движения лопастей относительно ротора или по аналогии с кулисным механизмом относительно статора [6]. Это приводит к усложнению уплотнения лопастей в статоре, но, в то же время, сильно упрощается в роторе, с облегчением передачи движения от ротора к лопастям.

Цель работы – исследование параметров работы и конструктивных характеристик двигателя внутреннего сгорания, представленного роторной свободнолопастной машиной.

Методика и методы

Разработкой различных методик расчета параметров работы двигателей внутреннего сгорания занимались многие современные ученые. Например, в статье [7] проведен анализ подходов к исследованию потерь на трение. Авторы работы [8] описывают вибродиагностику авиационного поршневого двигателя для оценки технического состояния. Но при этом достаточно мало исследований, направленных на разработку и совершенствования методик расчета РПД.

Основные принципы работы роторно-поршневых двигателей и их значимые характеристики изложены в литературе [9 – 11]. Проектированием новых конструкций таких двигателей и повышением эффективности их работы занимаются как зарубежные [12, 13], так и отечественные исследователи [14, 15].

Профессором ФГБОУ ВО «ТГТУ» Ю. В. Воробьевым на основе конструкций РПД Ванкеля и Сейрича разработан орбитальный двигатель с лопастями, монтируемыми в шарнирах, и ротором-поршнем, совершающим круговое параллельное движение [16]. Данный двигатель также получил название роторной свободнолопастной машины.

Результаты и их обсуждение

При проектировании роторной свободно-лопастной машины важно выявление зависимости объемов утечек воздуха от величины образующегося зазора в процессе нагнетания при пуске, а также исследование конструктивных параметров движущейся лопасти. Для этого в первую очередь необходимо определить, как изменится давление в замкнутом объеме при политропическом сжатии газобразного тела. В случае, когда наличие утечек не рассматривается, это можно сделать по уравнению Ван-дер-Ваальса

$$\left(P + \frac{a}{\vartheta^2}\right)(\vartheta - b) = RT, \quad (1)$$

где P – величина давления газа, Н/м²; ϑ – величина удельного объема газа, м³/кг; $R = 8314/M$ – газовая константа, Дж/(кг·град), M – молекулярный вес, кг/моль; T – температура, К; a, b – константы газа (из справочника).

Фактическое давление сжатия с учетом утечек определяется, зная скорость истечения газа через зазор:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} + \omega_1^2, \quad (2)$$

где v_1 – первоначальная скорость (ее величиной в начале расчета пренебрегаем, $\omega_1 \rightarrow 0$), м/с; k – показатель адиабаты; P_1, P_2 – соответственно начальное и конечное давления при адиабатном сжатии, атм.

Для определения величины потерь объема газа воспользуемся следующим выражением:

$$V = \omega f, \quad (3)$$

где $f = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь зазора в поперечном сечении, м².

Потери объема газа при различных оборотах кривошипа определяются как

$$W = Vt, \quad (4)$$

где t – время постоянного давления, с.

Относительные потери давления вычисляются по формуле

$$E = \frac{P_{\text{нач}} - P_{\text{пот}}}{P_{\text{нач}}} 100 \%, \quad (5)$$

где $P_{\text{нач}}, P_{\text{пот}}$ – давление в камере соответственно без учета и с учетом утечек, атм.

Графические зависимости, полученные в соответствии с приведенными формулами, показаны на рис. 1, 2.

Рассмотрим управление движением лопасти роторной свободно-лопастной машины посредством самосинхронизации (рис. 3).

Жесткость пружины гасителя и его масса определяются путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + \varepsilon_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) = f_0 \sin \omega t; \\ m_2 \ddot{x}_2 + \varepsilon_2 \dot{x}_2 + c_2 (x_2 - x_1) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

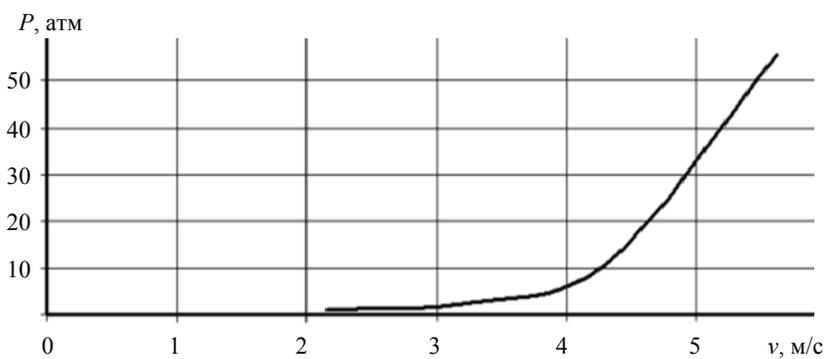


Рис. 1. График зависимости скорости истечения газа через зазор от давления

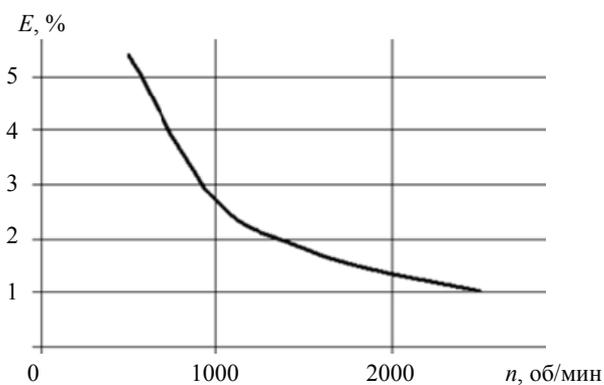


Рис. 2. График зависимости потерь давления в зависимости от числа оборотов кривошипа

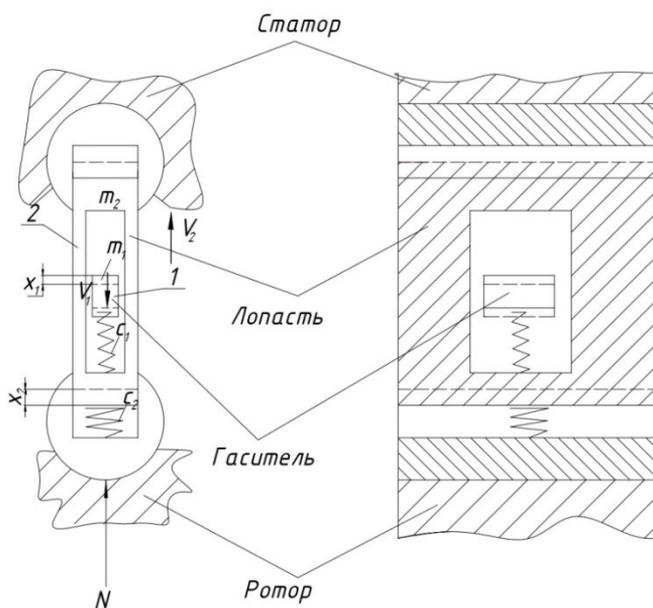


Рис. 3. Пластина ротора (лопасти) с системой самосинхронизации и динамическим гасителем, закрепленным при помощи гибкого элемента внутри нее

где c_1, c_2 – жесткости пружин пластины ротора и гибкого элемента динамического гасителя, Н/м; m_1, m_2 – массы соответственно пластины ротора и динамического гасителя, кг; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – коэффициенты трения соответственно пластины ротора и динамического гасителя; x_1, x_2 – абсолютные коэффициенты, отсчитываемые от статического положения системы, находящейся в равновесии, м; $f_0 \sin \omega t$ – периодическая сила, под действием которой находится пластина ротора, Н.

Решение данной системы будет иметь следующий вид (вынужденные колебания):

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t; \\ x_2 = A_2 \sin \omega t + B_2 \cos \omega t. \end{cases} \quad (7)$$

Период колебаний лопасти опережает период колебаний гасителя на 180° (рис. 4).

До удара тело массой m_1 (в данном случае оно представляет собой лопасть) движется навстречу телу массой m_2 (соответственно, гаситель) со скоростью V_1 . При этом тело 2 под действием силы инерции движется по направлению к телу 1 со скоростью V_2 (см. рис. 3).

Начало отсчета перемещений ведется от исходного положения гасителя и лопасти. Когда тела приводятся в движение, происходит изменение длины пружины на величину, равную l , м, то есть

$$a = l + x_2 - x_1. \quad (8)$$

Величина сжатия пружины

$$\alpha = a - l = x_2 - x_1. \quad (9)$$

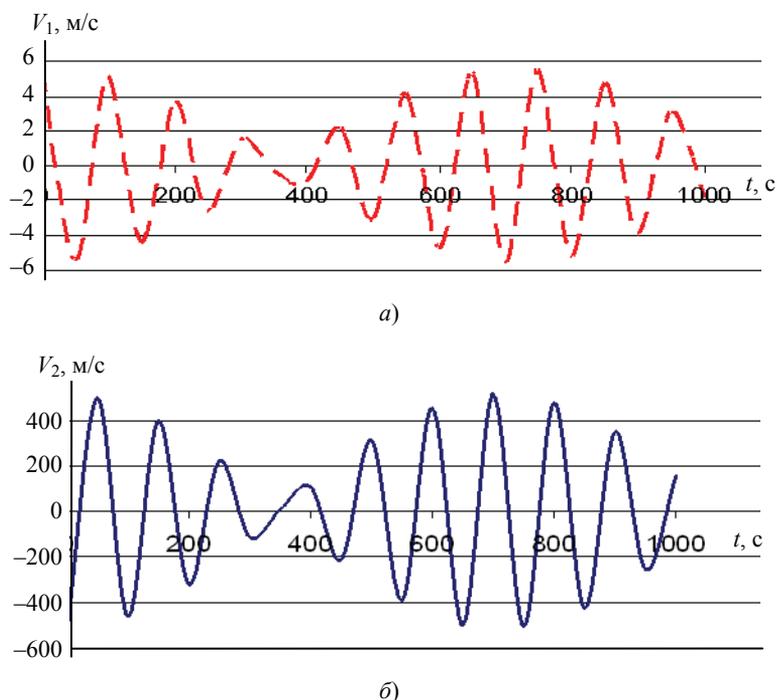


Рис. 4. Графики зависимости изменения скоростей лопасти (а) и гасителя (б), закрепленного при помощи гибкого элемента внутри лопасти, от времени при максимальном числе оборотов

Для данного случая сила сопротивления пропорциональна сжатию, а также находится в зависимости от величины смещения

$$N = f(\alpha) = c\alpha, \quad (10)$$

где c – жесткость пружины, Н/м.

Под действием силы сжатия пружины находятся как лопасть, так и гаситель. Эта сила сообщает им ускорение, вследствие чего скорость тел изменится. После удара скорости лопасти и гасителя будут равны соответственно

$$V_1 = x_1' = \frac{dx_1}{dt}; \quad (11)$$

$$V_2 = x_2' = \frac{dx_2}{dt}. \quad (12)$$

Тогда ускорения лопасти и гасителя можно обозначить как:

$$w_1 = \frac{dV_1}{dt} = \frac{d^2x_1}{dt^2}; \quad w_2 = \frac{dV_2}{dt} = \frac{d^2x_2}{dt^2}. \quad (13)$$

За положительное направление сил, скоростей и ускорений принимаем направление первоначальных перемещений гасителя. Составим дифференциальные уравнения движения тел во время удара:

$$m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = N; \quad (14)$$

$$m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = -N. \quad (15)$$

Для упрощения принимаем, что лопасть до удара была неподвижной ($V_1 = 0$), а гаситель не имел начального сжатия ($\alpha_0 = 0$). Тогда, соединив дифференциальные уравнения движения тел с уравнениями (9) и (10), получим систему, имеющую следующий вид:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2} = N \\ m_2 \frac{d^2x_2}{dt^2} = -N \\ N = f(\alpha) \\ x_1 - x_2 = \alpha \end{cases} \quad (16)$$

В результате решения системы получаем:

$$t = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{V_0^2 - 2 \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \int_0^{\alpha} f(\alpha) d\alpha}. \quad (17)$$

Во время удара тела имеют перемещение, равное:

$$X_1 = X_2 = m_1 V_0 t / (m_1 + m_2). \quad (18)$$

Подстановка численных параметров движения лопасти (пластины) привела к следующему результату: отклонения лопасти (пластины) и гасителя от положения равновесия составляют ≈ 1 мм. Полученная величина соответствует «минимально» возможному отклонению тел от положения равновесия (для лопасти (пластины) – 0,1...9 мм; гасителя – 0,1...3 мм). В данной системе динамическая нагрузка снижается за счет действия гибкого элемента.

Конструкция роторной свободно-лопастной машины схематично представлена на рис. 5.

Роторный свободно-лопастной двигатель внутреннего сгорания имеет корпус (на рисунке не указан), который закрыт с обоих торцов торцевыми крышками 1 и 8. Приводной вал 13 проходит через указанный корпус перпендикулярно торцевым крышкам 1 и 8. Поршень 12, помещенный внутрь корпуса эксцентрично поддерживаемый на эксцентричной части 14 приводного вала 13, совершает орбитальное движение без вращения во время работы двигателя. Также в конструкцию данного двигателя входят втулка 2, проставка 3, обойма 4, маслосборный паз 5, подшипниковая опора 6, масляный канал 9, первый 7 и второй 10 дисковые шарниры, множество радиальных и равностоящих лопастей 11, заключенных между торцевыми крышками 1 и 8 и корпусом 12.

Дополнительного усовершенствования конструкции роторной свободно-лопастной машины можно добиться путем изготовления отдельных элементов из термопластичных полимерных материалов, которые уже находят широкое применение во многих отраслях машиностроения. Для повышения их износостойкости

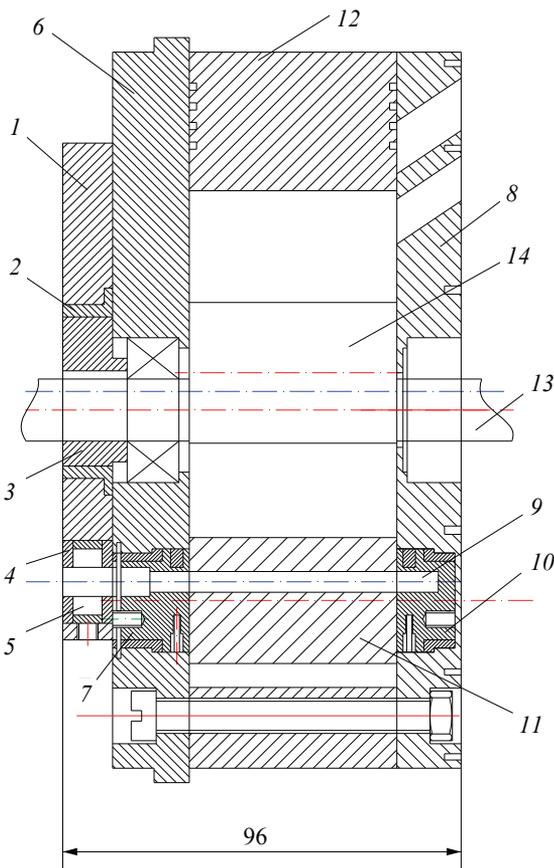


Рис. 5. Схема роторной свободно-лопастной машины

и поверхностной твердости предлагается использовать магнитотермическое поверхностное упрочнение, методика проведения которого подробно представлена в работах [17, 18]. Основная идея технологии заключается в сочетании совместного действия магнитного и термического полей для диффузии частиц металлического порошка внутрь поверхности полимера. Данная технология может быть использована для улучшения эксплуатационных характеристик деталей из любых термопластичных полимеров, а один из ее вариантов позволяет металлизировать детали из терморезистивных полимеров непосредственно в процессе их изготовления. Применение магнитотермического упрочнения также позволит повысить теплостойкость полимерных деталей, что увеличит общую надежность изделия и может снизить металлоемкость производства.

Заключение

Представленная конструкция двигателя внутреннего сгорания, который содержит поршень, совершающий не линейно направленное движение и выполняющий роторное или орбитальное движение, имеет значительные преимущества перед двигателем с линейно направленным поршнем: малый размер, низкий вес и быструю реакцию на изменение мощности. Причиной этого является тот факт, что поршнем в таком двигателе служит ротор, который устанавливается прямо на приводной вал и совершает роторное или орбитальное движение без ускорения и замедления, не зависящее от инерции, в отличие от поршня в обычном ДВС. В двигателе с линейно перемещающимся поршнем камера сгорания находится непосредственно в его центральной части, поэтому движение самого поршня не влияет на динамические характеристики в целом. В случае орбитального движения поршня, который размещается центрально-симметрично относительно оси вала, динамические характеристики по мере вращения ротора могут изменяться.

Преимуществом лопастей, монтируемых в шарнирах, является то, что ускорение их центра тяжести может быть выровнено и, следовательно, передача инерции лопастей к корпусу во время сжатия и ротору во время сгорания позволяет использовать инерцию лопастей как движущую силу и в результате, снизить общий размер двигателя и сложность изготовления конструкции, уменьшить трение, а, следовательно, упростить систему смазки.

Таким образом, предложенная профессором Ю. В. Воробьевым конструкция РПД является перспективной для использования в различных видах техники и требует проведения дальнейших исследований, направленных на внедрение в конструкцию роторной свободно-лопастной машины деталей из термопластичных полимеров, подверженных поверхностному упрочнению.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ «Разработка метода магнитотермического упрочнения полимеров ферромагнитными порошками различной дисперсности для деталей машин широкого спектра применения», конкурс «Аспиранты», 2020 г. № договора 20-33-90298/20.

Список литературы

1. Косенок, Б. Б. Кинематический и динамический анализ основного механизма двигателя Ванкеля на основе его векторной модели / Б. Б. Косенок // Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королева (национального исслед. ун-та). – 2011. – № 1 (25). – С. 69 – 75.
2. Пат. 2988008А США. Rotary Piston Machines / F. Wankel. – Оpubл. 1961.
3. Пат. 3787150А США. Rotary Motor / T. R. Sarich. – Оpubл. 1974.

4. Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression / Y. V. Rodionov, Y. T. Selivanov, D. V. Nikitin [et al.] // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2021. – Vol. 57, No. 5-6. – P. 477 – 483. doi: 10.1007/s10556-021-00962-5
5. Novel Construction of Liquid Ring Vacuum Pumps / Y. V. Rodionov, Y. T. Selivanov, D. V. Nikitin [et al.] // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2019. – Vol. 55, No. 5-6. – P. 473 – 479. doi: 10.1007/s10556-019-00648-z
6. Перспективный многоцелевой двигатель внутреннего сгорания / Е. А. Галныкин, Ю. В. Воробьев, А. А. Свиридов, А. Е. Ломовских // *Современные научно-практические решения XXI века : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 21–22 декабря 2016 г., Воронеж. – Воронеж, 2016. – С. 113 – 119.*
7. Обзор различных методов исследования потерь на трение в двигателях внутреннего сгорания / Г. А. Нестеренко, Е. А. Лысенко, И. С. Нестеренко [и др.] // *Междунар. науч.-исслед. журнал*. – 2022. – № 1-1 (115). – С. 52 – 54. doi: 10.23670/IRJ.2022.115.1.009
8. Семенов, П. В. Особенности вибродиагностики при контроле технического состояния авиационного поршневого двигателя (обзор) / П. В. Семенов, А. Ю. Севостьянов // *Вестн. Уфимского гос. авиационного техн. ун-та*. – 2021. – Т. 25, № 3 (93). – С. 72 – 79. doi: 10.54708/19926502_2021_2539372
9. Автомобильные двигатели / В. М. Архангельский, М. М. Вихерт, А. Н. Воинов [и др.] ; под ред. М. С. Ховаха. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 591 с.
10. Окорочков, В. В. Актуальность и направления развития роторно-поршневой тематики / В. В. Окорочков, В. М. Окорочкова, В. В. Шафранов // *Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королева (национального исслед. ун-та)*. – 2014. – № 5-3 (47). – С. 82 – 91.
11. Научно-технические проблемы создания и производства роторно-поршневых двигателей для БПЛА за рубежом / А. Н. Костюченков, В. П. Минин, С. А. Клементьев, А. В. Федин // *Инноватика и экспертиза: научные труды*. – 2019. – № 3 (28). – С. 143 – 156. doi: 10.35264/1996-2274-2019-3-143-156
12. Preliminary Explorations of the Performance of a Novel Small Scale Opposed Rotary Piston Engine / J. Gao, G. Tian, P. Jenner [et al.] // *Energy*. – 2020. – Vol. 190. – P. 116402. doi: 10.1016/j.energy.2019.116402
13. Intake Characteristics and Pumping Loss in the Intake Stroke of a Novel Small Scale Opposed Rotary Piston Engine / J. Gao, G. Tian, P. Jenner, M. Burgess // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 261. – P. 121180. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121180
14. Разработка односекционного роторно-поршневого двигателя-демонстратора на основе современной комплексной методики расчета / А. Н. Костюченков, А. А. Зеленцов, П. В. Семенов, В. П. Минин // *Вестн. Самарского гос. аэрокосмического ун-та им. академика С. П. Королева (национального исслед. ун-та)*. – 2014. – № 5-2 (47). – С. 173 – 181.
15. Окорочков, В. В. Повышение эффективности двигателей роторно-поршневой схемы реализацией дизельного цикла / В. В. Окорочков, В. М. Окорочкова, А. И. Раводин // *Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 243 – 251. doi: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-243-251
16. Пат. 2285126 РФ, МПК F01C 1/39, F02B 55/02. Орбитальный двигатель внутреннего сгорания / Ю. В. Воробьев, В. Б. Тетерюков. – № 2004130817/06 ; заявл. 22.10.2004 ; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28. – 26 с.
17. Study of Magneto-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials / Y. V. Rodionov, D. V. Nikitin, N. V. Voronin, I. S. Filatov // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2021. – Vol. 57, No 7-8. – P. 595 – 600. doi: 10.1007/s10556-021-00981-2

18. Определение сил воздействия на ферромагнитную частицу в процессе магнитотермического поверхностного армирования изделий из термопластичных полимеров / Н. В. Воронин, Ю. В. Родионов, Д. В. Никитин, И. С. Филатов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 486 – 496. doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.486-496

Elements of Calculating the Internal Combustion Engine Using the Example of a Rotary Free-Blade Machine

I. V. Ivanova¹, Yu. V. Rodionov^{1, 2}, N. V. Voronin²,
A. I. Skomorokhova³, A. N. Pakhomov⁴, A. E. Lomovskikh⁵

*Department of Engineering Disciplines (1),
Tambov Branch of Michurinsk State Agrarian University, Tambov, Russia;
Department of Mechanics and Engineering Graphics (2),
Department of Computer-Integrated Systems in Mechanical Engineering (3);
Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (4),
TSTU, Tambov, Russia;
Department of Automotive Training (5), Air Force Academy
named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russia*

Keywords: internal combustion engine; orbital engine; design calculation; rotary piston engine.

Abstract: The advantages of rotary-piston internal combustion engines in comparison with piston ones are considered. The main shortcomings of the Wankel engine and the Seyrich orbital engine are noted. A description of the design of a rotary free-blade internal combustion engine developed on the basis of Wankel and Seyrich engines is given. A model of the blade design with control is shown by means of self-synchronization using a dynamic damper placed inside the blade on a flexible element. The solution of the blade self-synchronization system with a dynamic damper is presented. The possibility of using products made of polymeric materials in an orbital engine, including using the technology of magneto-thermal surface hardening, is considered.

References

1. Kosenok B.B. [Kinematic and dynamic analysis of the main mechanism of the Wankel engine based on its vector model], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev (National Research University)], 2011, no. 1 (25), pp. 69-75. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Wankel F. Rotary Piston Machines, US, 1961, Pat. 2988008A.
3. Sarich T.R. Rotary Motor, US, 1974, Pat. 3787150A.
4. Rodionov Y.V., Selivanov Y.T., Nikitin D.V., Mahmood M.A., Mikheev N.V. Design of Liquid-Ring Vacuum Pump with Adjustable Degree of Internal Compression, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, vol. 57, no. 5-6, pp. 477-483, doi: 10.1007/s10556-021-00962-5
5. Rodionov Y.V., Selivanov Y.T., Nikitin D.V., Sychev M.V., Kombarova P.V. Novel Construction of Liquid Ring Vacuum Pumps, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, vol. 55, no. 5-6, pp. 473-479, doi: 10.1007/s10556-019-00648-z

6. Galnykin Ye.A., Vorob'yev Yu.V., Sviridov A.A., Lomovskikh A.Ye. *Sovremennyye nauchno-prakticheskiye resheniya XXI veka* [Modern scientific and practical solutions of the XXI century], of the International Scientific and Practical Conference, 21-22 December, 2016, Voronezh, 2016, pp. 113-119. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Nesterenko G.A., Lysenko Ye.A., Nesterenko I.S., Shukh G.V., Morozova A.R. [Review of various methods for studying friction losses in internal combustion engines], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2022, no. 1-1 (115), pp. 52-54, doi: 10.23670/IRJ.2022.115.1.009 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Semenov P.V., Sevost'yanov A.Yu. [Features of vibration diagnostics in monitoring the technical condition of an aircraft piston engine (review)], *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University], 2021, vol. 25, no. 3 (93), pp. 72-79, doi: 10.54708/19926502_2021_2539372 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Arkhangel'skiy V.M., Vikhert M.M., Voinov A.N. [et al.], Khovakh M.S. [Ed.] *Avtomobil'nyye dvigateli* [Automobile engines], Moscow: Mashinostroyeniye, 1977, 591 p. (In Russ.)
10. Okorochkov V.V., Okorochkova V.M., Shafranov V.V. [Relevance and directions of development of rotary-piston topics], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev (National Research University)], 2014, no. 5-3 (47), pp. 82-91. (In Russ., abstract in Eng.)
11. Kostyuchenkov A.N., Minin V.P., Klement'yev S.A., Fedin A.V. [Scientific and technical problems of design and production of rotary piston engines for UAVs abroad], *Innovatika i ekspertiza: nauchnyye trudy* [Innovation and expertise: scientific papers], 2019, no. 3 (28), pp. 143-156, doi: 10.35264/1996-2274-2019-3-143-156 (In Russ., abstract in Eng.)
12. Gao J., Tian G., Jenner P., Burgess M., Emhardt S. Preliminary Explorations of the Performance of a Novel Small Scale Opposed Rotary Piston Engine, *Energy*, 2020, vol. 190, p. 116402, doi: 10.1016/j.energy.2019.116402
13. Gao J., Tian G., Jenner P., Burgess M. Intake Characteristics and Pumping Loss in the Intake Stroke of a Novel Small Scale Opposed Rotary Piston Engine, *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 261, p. 121180, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121180
14. Kostyuchenkov A.N., Zelentsov A.A., Semenov P.V., Minin V.P. [Development of a single-section rotary-piston engine-demonstrator based on modern complex calculation methods], *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S. P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta)* [Bulletin of the Samara State Aerospace University. Academician S.P. Korolev (National Research University)], 2014, no. 5-2 (47), pp. 173-181. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Okorochkov V.V., Okorochkova V.M., Ravodin A.I. [Improving the efficiency of engines of a rotary piston scheme by implementing a diesel cycle], *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye* [Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technologies and mechanical engineering], 2016, vol. 15, no. 4, pp. 243-251, doi: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-243-251 (In Russ., abstract in Eng.)
16. Vorob'yev Yu.V., Teteryukov V.B. *Orbital'nyy dvigatel' vnutrennego sgoraniya* [Orbital internal combustion engine], Russian Federation, 2006, Pat. 2285126. (In Russ.)

17. Rodionov Y.V., Nikitin D.V., Voronin N.V., Filatov I.S. Study of Magneto-Thermal Surface Reinforcement of Polymeric Materials, *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, vol. 57, no. 7-8, pp. 595-600, doi: 10.1007/s10556-021-00981-2

18. Voronin N.V., Rodionov Yu.V., Nikitin D.V., Filatov I.S. [Determination of forces acting on a ferromagnetic particle in the process of magnetothermal surface reinforcement of articles made of thermoplastic polymers], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 3, pp. 486-496, doi: 10.17277/vestnik.2021.03.pp.486-496 (In Russ., abstract in Eng.)

Elemente der Berechnung des Verbrennungsmotors am Beispiel der rotierenden Freischaufel-Maschine

Zusammenfassung: Es sind die Vorteile von Kreiskolben-Verbrennungsmotoren gegenüber Kolben-Verbrennungsmotoren betrachtet. Die Hauptmängel des Wankelmotors und des Seyrich-Orbitalmotors sind markiert. Beschrieben ist der Aufbau eines auf Basis von Wankel- und Seyrich-Motoren entwickelten Rotations-Freischaufel-Verbrennungsmotors. Es ist ein Modell der Schaufelkonstruktion mit Steuerung mittels Selbstsynchronisation unter Verwendung eines dynamischen Dämpfers gezeigt, der innerhalb der Schaufel auf einem flexiblen Element platziert ist. Die Lösung des Selbstsynchronisationssystems der Schaufel mit einem dynamischen Dämpfer ist vorgestellt. Die Möglichkeit der Verwendung von Produkten aus Polymermaterialien in einem Orbitalmotor, einschließlich der Verwendung der Technologie der magnetisch-thermischen Oberflächenhärtung, ist in Betracht gezogen.

Éléments du calcul du moteur à combustion interne à l'exemple de la machine à palettes libres rotatives

Résumé: Sont examinés les avantages des moteurs à combustion interne à piston rotatif par rapport aux moteurs à piston. Sont notés les principaux inconvénients du moteur Wankel et du moteur orbital Seyrich. Est donnée une description de la conception d'un moteur à combustion interne à rotor libre élaboré à la base des moteurs Wankel et Seyrich. Est montré le modèle de la structure de la pale avec commande par auto-synchronisation au moyen d'un amortisseur dynamique placé à l'intérieur de la pale sur un élément flexible. Est présentée la solution du système d'auto-synchronisation de la lame avec un amortisseur dynamique. Est envisagée la possibilité d'utiliser des produits en matériaux polymères dans le moteur orbital, y compris en utilisant la technologie de durcissement de la surface magnéto-thermique.

Авторы: *Иванова Ирина Викторовна* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерных дисциплин, Тамбовский филиал ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ»; *Родионов Юрий Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры инженерных дисциплин, Тамбовский филиал ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ»; профессор кафедры «Механика и инженерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ»; *Воронин Николай Владимирович* – аспирант кафедры «Механика и инженерная графика»; *Скоморохова Анастасия Игоревна* – магистрант; *Пахомов Андрей Николаевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Ломовских Александр Егорович* – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильной подготовки, ФГКВБОУ ВО «ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия.

К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА ТУКОВОЙ СЕЯЛКИ

Н. Н. Романюк¹, В. Н. Еднач¹, Р. И. Козлов²,
А. М. Хартанович¹, А. И. Попов³

*Кафедра «Механика материалов и детали машин»,
УО «Белорусский государственный аграрно-технический
университет» (1), Минск, Республика Беларусь;
ОАО «Лидаагропромаш» (2), Лида, Республика Беларусь;
кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (3), Тамбов, Россия*

Ключевые слова: высевающий аппарат; гранулы; критическая скорость; минеральные удобрения; пневматическая распределительная система; скорость витания; скорость воздушного потока; туковая сеялка.

Аннотация: Проанализированы закономерности изменения скорости движения гранулированных удобрений в пневматической распределительной системе высевающего аппарата туковой сеялки. Рассмотрены причины нарушения равномерности их распределения по поверхности поля, а также оседания гранул в распределительной головке и тукопроводах. Получены зависимости, отражающие закономерности движения гранулированных удобрений в распределительной системе. Обоснованы геометрические параметры распределительной головки высевающей системы, исходя из физико-механических и аэродинамических свойств гранулированных удобрений.

Пневматическая высевающая система туковых сеялок имеет общее конструктивное сходство с зерновыми и зернотуковыми сеялками, однако, в сравнении с семенами, гранулы удобрений значительно отличаются по размерам и форме поверхности. Применение зерновых сеялок в качестве туковых ведет к нарушению равномерности распределения удобрений по поверхности поля, тем самым существенно снижается эффективность работы агрегата и теряются преимущества перед машинами разбрасывающего типа. Анализ пневматических высевающих систем показывает, что зоны, в которых происходит снижение скорости транспортирующего воздушного потока, и зоны с большой разностью давлений являются местами оседания гранул удобрений и забивания систем. Поскольку транспортирование удобрений от дозатора к тукопроводам и по ним осуществляется воздушным потоком, скорость которого выше скорости витания гранул, то основной задачей расчета оптимальных параметров высевающей системы является определение скорости воздушного потока во всех критических точках системы.

Цель исследований – обоснование геометрических параметров распределительной головки высевающего аппарата туковой сеялки.

Перемещение гранул удобрений в воздушном потоке осуществляется при условии наличия достаточной аэродинамической силы, перемещающей их в воздуховодах независимо от его расположения. Сила действия воздушного потока на гранулу удобрения R определяется по формуле Ньютона [1]

$$R = k\rho S_m(V_B - U)^2, \quad (1)$$

где k – коэффициент аэродинамического сопротивления воздуха; ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; S_m – миделево сечение, м^2 ; V_B – скорость воздушного потока, м/с ; U – абсолютная скорость гранулы удобрения, м/с .

Известно, что в случае, когда скорость воздушного потока достигает критической скорости витания частицы $V_{\text{кр}}$, ее перемещение в воздушном потоке прекращается, и она зависает, при этом выполняется условие: $V_B = V_{\text{кр}}$, $U = 0$ [2].

Данный эффект наблюдается в местах резкого расширения транспортирующего канала и изменения его направления, и как следствие, образуются туковоздушные пробки, повышается давление в системе, происходит пульсирующее изменение скорости воздушного потока. В существующих высевающих аппаратах эти места есть в распределительной головке и тукопроводах (рис. 1).

Проведенные экспериментальные исследования по определению неравномерности распределения удобрений по тукопроводам показал, что причиной выпадения гранул в нижней части распределительной головки является увеличение сечения воздушного канала, а затем уменьшение его скорости [3].

Решение данной проблемы в пневматических транспортирующих системах предлагается осуществлять при помощи увеличения скорости воздушного потока [2, 4, 5]. Так, для вертикальных трубопроводов скорость транспортирования определяется как

$$V_B^B = 2V_{\text{в кр}}, \quad (2)$$

для горизонтальных [4]

$$V_B^Г = 4V_{\text{в кр}}. \quad (3)$$

Однако даже наличие таких скоростных режимов не всегда обеспечивает качественную работу систем. При этом наблюдаются значительный перерасход энергии вентилятора и некачественное перемешивание гранул удобрений в воздушном потоке.

Предлагается следующая конструкция распределительной головки и транспортирующей системы гранулированных минеральных удобрений: вентилятор с воздуховодом 1, эжекционный шлюз 2 с катушечным дозатором 3, вертикальная шахта с распределительной головкой 4, тукопроводы 5 (рис. 2). Особенностью



Рис. 1. Выпадение гранулированных удобрений в нижней части распределительной головки

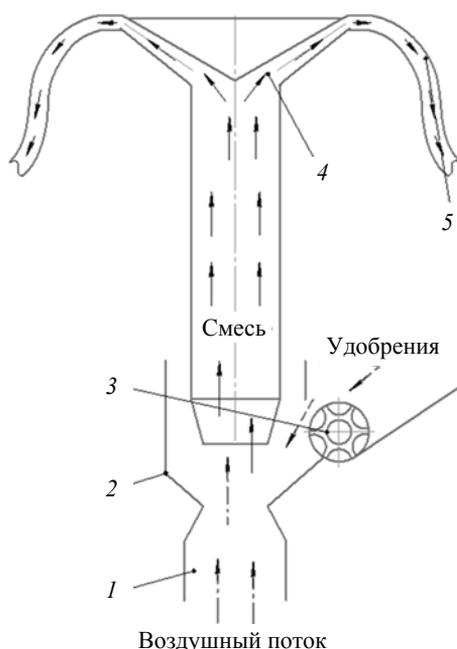


Рис. 2. Схема транспортирующей системы и распределительной головки

предложенной конструкции является распределительная головка, представляющая собой два перевернутых конуса, между ними образован расходящийся кольцевой канал, площадь сечения которого постоянна, независимо от его удаленности от центра.

Скорость перемещения гранул удобрений в вертикальной шахте рассмотрена и представлена в работах [1, 2, 4 – 6]. Проанализируем закономерности движения гранул удобрений в наклонном кольцевом канале. Для упрощения расчетов рассмотрим движение гранулы в сечении центральной оси распределительной головки (см. рис. 2).

Сила сопротивления воздушного потока определяется выражением

$$R_c = k\rho S_m V_{от}^2, \quad (4)$$

где $V_{от}$ – относительная скорость движения гранулы удобрения в воздушном потоке, м/с.

При взаимодействии туковоздушной смеси, движущейся по вертикальной шахте с верхним конусом распределительной головки (рис. 3, а), воздушный поток отклоняется от вертикали на угол α (рис. 3, б) и уходит по каналу распределительной головки, в то время как большая часть гранул удобрений продолжает прямолинейное движение и ударяется о верхний конус, тем самым меняя направление движения на угол β от направления движения воздушного потока.

Учитывая то, что распределительная головка образована двумя конусами, а канал имеет кольцевую сужающуюся форму, то направление движения воздушного потока можно рассматривать по биссектрисе между конусами под углом α к горизонтали

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2) / 2, \quad (5)$$

где α_1, α_2 – углы между горизонталью и соответственно верхним и нижним конусами, град.

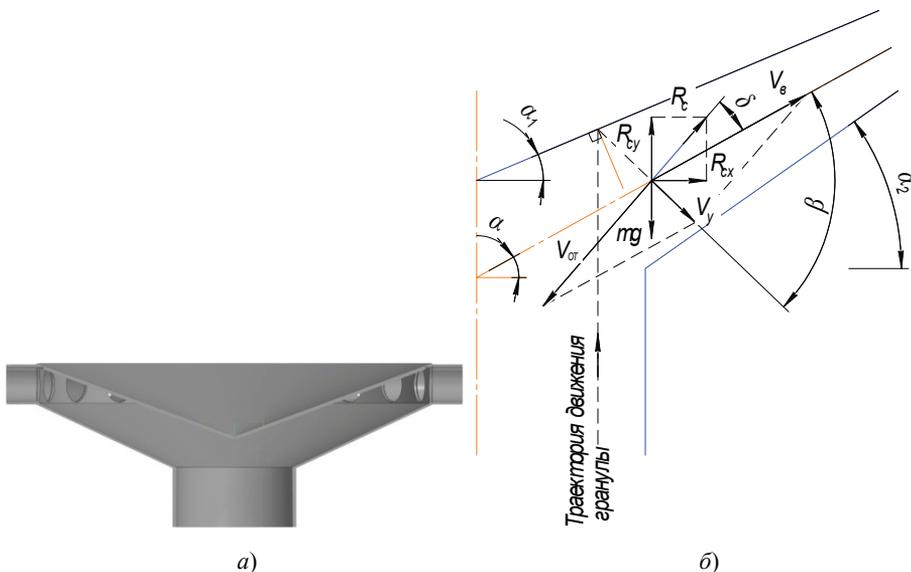


Рис. 3. Распределительная головка (а) и схема сил и скоростей, действующих на гранулу в распределительной головке (б)

Угол вектора скорости после удара гранулы о верхний конус определен из схемы канала

$$\beta = \pi / 2 - 2\alpha_1 + \alpha. \quad (6)$$

Для определения скорости и направления движения туков относительно воздушного потока рассмотрим относительное и абсолютное движения гранулы удобрения (рис. 3, б).

При определении относительной скорости гранулы удобрения исходим из условия неподвижности воздушного потока, учитывая скольжение между слоями воздуха. Относительная скорость гранулы меньше скорости потока, то есть направление движения гранул можно рассматривать как противоположное потоку

$$V_{от} = \Psi((V_в - V_y \cos \beta)^2 + V_y^2 \sin^2 \beta)^{0.5}, \quad (7)$$

где Ψ – коэффициент потери скорости после удара; V_y – скорость гранулы после удара, м/с.

Учитывая то, что гранула при переходе из вертикального канала в горизонтальный взаимодействовала с верхним конусом и изменила свое направление, скорость гранулы после удара определится выражением

$$V_y = U = V_в - V_{кр}. \quad (8)$$

Принимая во внимание то, что сила сопротивления воздушного потока перемещению гранулы в наклонной части распределительной головки противоположна направлению относительной скорости, определен угол действия силы сопротивления воздушного потока δ относительно направления его движения в канале распределительной головки

$$\delta = \arcsin((V_y \sin \beta / ((V_в - V_y \cos \beta)^2 + V_y^2 \sin^2 \beta)^{0.5}). \quad (9)$$

Примем ряд ограничений: критическая скорость витания гранул удобрения (суперфосфат) $V_{кр} = 13,27$ м/с [6], при этом скорость воздушного потока по выражению (2) $V_в = 26$ м/с. Угол установки нижнего конуса α_2 принимается из условия

$$\alpha_2 > \varphi, \quad (10)$$

где φ – угол трения удобрений о материал конуса.

Поскольку угол трения суперфосфата о пластик $\varphi = 33^\circ$ [7], из конструктивных соображений и условия (10) принимаем угол установки нижнего конуса $\alpha_2 = 35^\circ$.

На рисунке 4 представлены зависимости изменения углов δ и α и относительной скорости движения гранулы удобрения $V_{от}$ от угла верхнего конуса головки α_1 . Прослеживается обратная зависимость угла наклона центральной оси кольцевого канала распределительной головки α , являющейся биссектрисой между двумя конусами канала и относительной скоростью движения гранулы удобрения $V_{от}$ (см. рис. 4). Кроме того, снижение относительной скорости $V_{от}$ при увеличении угла наклона верхнего конуса распределительной головки α_1 отражает увеличение абсолютной скорости перемещения гранулы удобрения по кольцевому каналу U . В случае, когда относительная скорость $V_{от}$ больше скорости воздушного потока $V_b = 26$ м/с, транспортирование гранул прекращается (участок от 10° до 12° угла α_1). Отсюда следует, что увеличение угла центральной оси кольцевого канала распределительной головки α и верхнего конуса α_1 более 12° способствуют росту U и производительности распределительной системы, а также препятствуют образованию туковоздушных пробок. Изменение значений угла δ отклонения действия линии силы сопротивления воздушного потока R_c увеличивается и достигает максимума в 33° [8] при угле наклона нижнего конуса головки α_1 равном 30° , что обеспечивает увеличение подъемной силы R_{cy} (см. рис. 4, кривая 1). Дальнейшее увеличение угла $\alpha_1 > 30^\circ$ ведет к пропорциональному росту угла α , характеризующего направление движения воздушного потока от 33° , при этом наблюдается незначительное снижение угла δ . Таким образом, наиболее качественное транспортирование гранул воздушным потоком обеспечивается при значениях угла $\alpha_1 > 30^\circ$.

Гранула удобрения, взаимодействующая с верхним конусом, отражена в сторону нижнего конуса распределительной головки (рис. 5). Разложим силу R_c на вертикальную R_{cy} и горизонтальную R_{cx} составляющие.

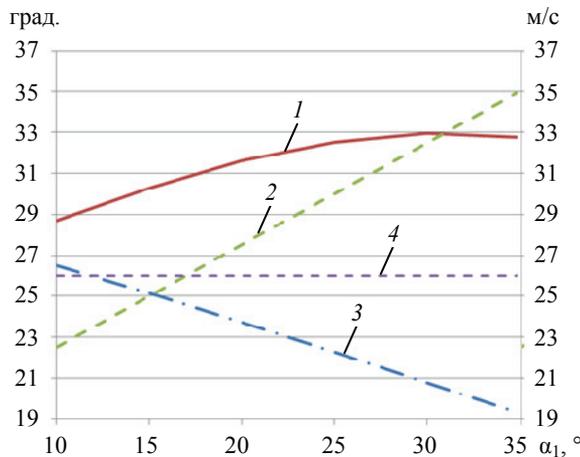


Рис. 4. Графики зависимостей изменения углов δ (1), α (2), относительной скорости движения гранулы удобрения $V_{от}$ (3) и скорости воздушного потока V_b (4) от угла верхнего конуса головки α_1

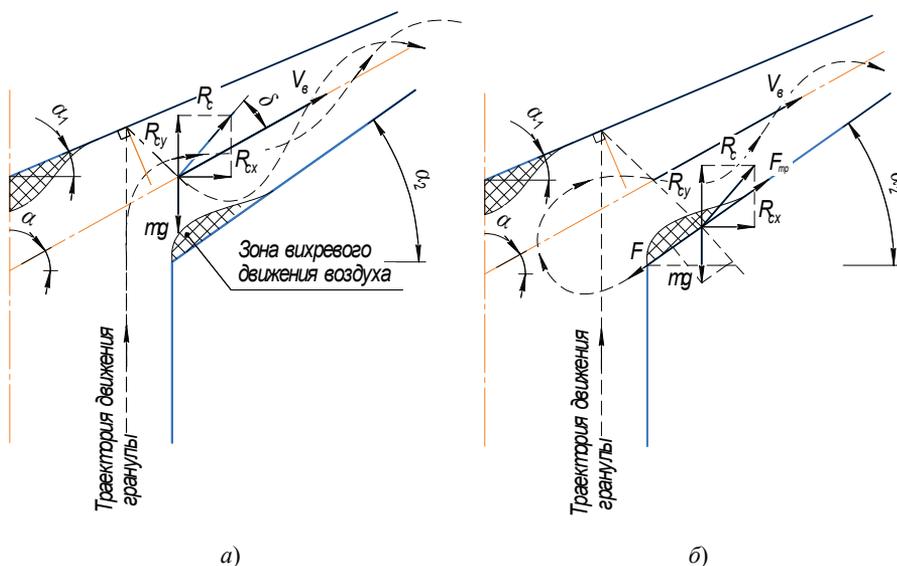


Рис. 5. Движение гранулы в канале головки при $R_{cy} \geq mg$ (а) и $R_{cy} < mg$ (б)

В случае, если $R_{cy} \geq mg$, гранула удобрения продолжает движение в канале (рис. 5, а), если $R_{cy} < mg$, она падает на дно канала распределительной головки и остается там, удерживаемая силой трения $F_{тр}$, либо скатывается в центральную шахту и с потоком воздуха вновь попадает в канал (рис. 5, б). Кроме того, при повороте воздушного потока возникают вихревые зоны, в которых его скорость изменяет свое направление и, как правило, значительно снижается, в результате чего воздушный поток практически не оказывает на гранулы удобрения своего влияния, и их движение в канале прекращается.

Рассмотрим движение гранулы (см. рис. 5, б) в случае, если угол наклона конуса канала α_2 меньше угла трения удобрений о материал распределительной головки φ , тогда гранула, попавшая в зону вихревого движения воздуха, остается на нижнем конусе неподвижной. При этом силой, перемещающей гранулу удобрения, будет являться сила сопротивления воздушного потока R_c , а силой, препятствующей перемещению, составляющая силы тяжести mg и сила трения $F_{тр}$.

Силу трения определяем как

$$F_{тр} = fmg \cos \alpha_2, \quad (11)$$

где f – коэффициент трения; m – масса гранулы, кг; g – ускорение свободного падения, m/s^2 .

Условие перемещения гранулы воздушным потоком запишем как

$$R_c \cos(\delta + \alpha - \alpha_2) > mg \sin \alpha_2 + fmg \cos \alpha_2. \quad (12)$$

Если левая часть выражения (12) больше правой, то гранулы перекаатываются по нижнему конусу головки к тукопроводам. Работа в таком режиме более приемлема с точки зрения равномерности внесения удобрений. Однако необходимо учитывать, что в зоне вихревого движения воздуха, а также у стенок канала значение скорости воздушного потока V_b ниже, чем в центральной части канала, следовательно, ниже и значение силы R_c . При этом перемещение гранулы будет определяться условием

$$R_c \cos(\delta + \alpha - \alpha_2) < mg \sin \alpha_2 + fmg \cos \alpha_2. \quad (13)$$

В случае, если правая часть выражения (13) больше левой, гранула остается неподвижной, что приводит к накоплению удобрений в нижней части распределительной головки и снижает равномерность распределения по поверхности поля. Для предотвращения данного эффекта необходимо обеспечить соскальзывание остановившихся в вихревой зоне гранул по нижнему конусу распределительной головки к вертикальной шахте. Для этого необходимо соблюдение условия, чтобы угол нижнего конуса распределительной головки был больше угла трения гранул $\alpha_2 > \varphi$. Таким образом, гранулы, находящиеся на нижнем конусе в вихревой зоне, при условии недостаточности движущей силы R_c скатываются по нижнему конусу к шахте распределительной системы. Условие перемещения гранул запишем как

$$mgsin\alpha_2 > R_{св}\cos(\delta + \alpha - \alpha_2) + fmg\cos\alpha_2, \quad (14)$$

где $R_{св}$ – сила сопротивления воздушного потока в вихревой зоне, Н.

При движении гранул, которое описывается условием (14), силой движущей гранулы является составляющая силы тяжести, а противостоят – сила трения и сила сопротивления потока $R_{св}$, действующая в вихревой зоне. Учитывая условия движения воздушного потока и пропорциональность его скорости по высоте канала, а также то, что наибольшее свое значение скорость будет иметь в центральной части канала, а минимальное – в вихревой зоне, то примем $V_B < V_{кр}$, тогда $U = 0$, и после упрощения выражение (14) примет вид

$$\sin\alpha_2 > f\cos\alpha_2 \Rightarrow \alpha_{2min} > \varphi_{max}. \quad (15)$$

Условие (15) соответствует условию (14) и обеспечивает движение гранул, упавших на нижний конус распределительной головки, к вертикальной шахте.

Для определения минимальной скорости воздушного потока $V_{B\ min}$, при которой происходит забивание системы, должно выполняться условие $V_B > V_{кр}$

$$V_{B\ min} = (mg(\sin\alpha_2 - f\cos\alpha_2)/(kpS_m\cos(\delta + \alpha - \alpha_2)))^{0,5} + V_{кр}. \quad (16)$$

На рисунке 6 представлены графики зависимости изменения скорости воздушного потока $V_{B\ min}$ от угла наклона нижнего конуса распределительной головки α_2 , при разной плотности удобрений, характеризующихся следующими характеристиками: максимальный диаметр гранул $d = 4$ мм [9], максимальный угол трения о пластик 33° [7].

Анализ графиков зависимостей показывает, что гранулы удобрений будут удерживаться на поверхности нижнего конуса силой трения $\alpha_2 \leq \varphi_{max}$, при этом влияние воздушного потока минимально, а значение скорости может быть меньше либо равно критической $V_B \leq V_{кр}$. Увеличение угла наклона нижнего конуса больше угла трения $\max \varphi$ приведет к движению гранул в сторону вертикальной шахты, и остановить их может сила сопротивления воздушного потока R_c , величина которой зависит от его скорости V_B . Так, при $\alpha_2 = 45^\circ$ значение скорости воздушного потока для удобрений плотностью 1700 кг/м^3 (суперфосфат) должно быть выше $16,2 \text{ м/с}$, а для удобрений плотностью 800 кг/м^3 (карбамид) [7] – выше $15,3 \text{ м/с}$. Из выражений (4) и (8) видно, что значение критической скорости удобрений является определяющим, и гранулы, имеющие большую критическую скорость, воздушный поток остановить в зоне вихревого движения воздуха не сможет. Отсюда следует, что сужающийся канал конической распределительной головки, образованной верхним и нижним конусами со значениями углов: $\alpha_1 = 12^\circ$, $\alpha_2 = 35^\circ \dots 40^\circ$, обеспечит стабильное движение смеси и достаточное отклонение силы R_c на угол δ до 33° , что предотвратит опускание гранул в менее скоростной воздушный поток к нижнему конусу канала.

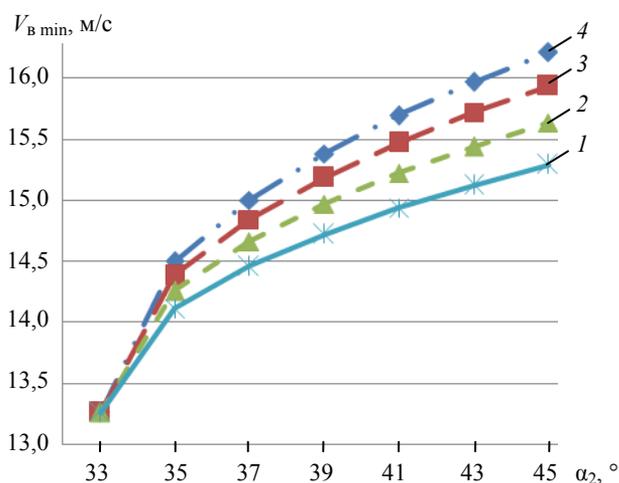


Рис. 6. Графики зависимостей изменения скорости $V_{в min}$ от угла α_2 при разной плотности минеральных удобрений ρ , кг/м³: 1 – 800; 2 – 1100; 3 – 1400; 4 – 1700

Выводы. Предложена оригинальная конструкция распределительной головки пневматической системы для внесения гранулированных минеральных удобрений, кольцевой канал которой имеет постоянное сечение и образован двумя конусами. Использование представленной конструкции позволит обеспечить стабильную скорость воздушного потока и равномерное транспортирование гранулированных минеральных удобрений, тем самым обеспечив заданную равномерность распределения их по поверхности поля.

Основной причиной выпадения гранулированных удобрений на донную часть распределительной головки является резкое изменение траектории движения туковоздушного потока с вертикального на горизонтальный, следствием чего являются удары гранул о верхнюю часть распределительной головки и изменение их скорости движения относительно потока.

Получены графики, позволяющие определить потери скорости движения гранул удобрений, зависящие от угла наклона верхнего конуса распределительной головки: если угол наклона верхнего конуса равен 10° , то относительная скорость составляет 26,5 м/с; 35° – 19,2 м/с. Использование нижнего конуса распределительной головки с углом наклона $\alpha_2 = 35^\circ$, который больше угла трения туков о его поверхность $\max \varphi = 33^\circ$, будет препятствовать скоплению гранул на ней.

Список литературы

1. Трубин, Б. Г. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчет / Б. Г. Трубин, А. Б. Лурье, С. М. Григорьев [и др.] ; под ред. Б. Г. Турбина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1967. – 589 с.
2. Соболев, А. А. Движение частиц в воздушном потоке / А. А. Соболев, П. А. Мельников, А. О. Тютюник // Вектор науки ТГУ. – 2011. – № 3 (17). – С. 82 – 86.
3. Рогальская, Ю. Н. Анализ равномерности распределения минеральных удобрений зерновой пневматической сеялкой / Ю. Н. Рогальская, В. Н. Еднач // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24–25 октября 2019 г., Минск. – Минск, 2019. – Ч. 1. – С. 59 – 61.

4. Обоснование параметров пневматической системы транспортирования семян и удобрений почвообрабатывающего посевного агрегата / З. С. Рахимов, Н. Т. Хлызов, И. Р. Рахимов [и др.] // АПК России. – 2017. – Т. 24, № 1. – С. 91 – 104.
5. Пневматические высевальные системы посевных машин: теория, расчет, эксперимент / В. П. Чеботарев, Н. Д. Лепешкин, Ю. Л. Салапура, Д. В. Зубенко. – Минск : БГАТУ, 2019. – 224 с.
6. Анализ аэродинамических свойств минеральных удобрений / Ю. Н. Рогальская, В. Н. Еднач, М. И. Сулейманов, Ю. Н. Сапьян // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24–25 октября 2019 г., Минск. – Минск, 2019. – Ч. 1. – С. 84–85.
7. НТП-АПК 1.10.13.001–03. Нормы технологического проектирования складов твердых минеральных удобрений и химических мелиорантов. – Текст : электронный // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. – 2003. – URL : <http://gostrf.com/normadata/1/4293852/4293852020.htm> (дата обращения: 13.10.2021).
8. Еднач, В. Н. Определение оптимальных характеристик туковых бункеров / В. Н. Еднач, Ю. Н. Рогальская // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Белагро-2019», 6–7 июня 2019 г., Минск. – Минск, 2019. – С. 387 – 391.
9. ГОСТ 21560.1-82 Удобрения минеральные. Метод определения гранулометрического состава. – Взамен ГОСТ 21560.1-76 ; введ. 1983-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 3 с.

To the Question of Substantiation of Geometric Parameters of a Distribution Head of the Seeding Unit of the Fertilizer Seeder

N. N. Romanyuk¹, V. N. Ednach¹, R. I. Kozlov²,
A. M. Khartanovich¹, A. I. Popov³

*Department of Mechanics of Materials and Machine Parts,
Belarusian State Agrarian and Technical University (1),
Minsk, Republic of Belarus;*

*OJSC “Lidagroprommash” (2), Lida, Republic of Belarus;
Department of Equipment and Technology for Nanomanufacturing,
TSTU (3), Tambov, Russia*

Keywords: sowing machine; granules; critical speed; mineral fertilizers; pneumatic distribution system; soaring speed; air flow rate; fertilizer seeder.

Abstract: The patterns of change in the speed of movement of granular fertilizers in the pneumatic distribution system of the sowing apparatus of a fertilizer seeder are analyzed. The reasons for the violation of the uniformity of their distribution over the field surface as well as the settling of granules in the distribution head and fertilizer ducts, are considered. Dependencies that reflect the patterns of movement of granular fertilizers in the distribution system are obtained. The geometric parameters of the distribution head of the sowing system, based on the physical, mechanical and aerodynamic properties of granular fertilizers are substantiated.

References

1. Trubin B.G. [Ed.], Lur'ye A.B., Grigor'yev S.M. [et al.] *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny. Teoriya i tekhnologicheskii raschet* [Agricultural machines. Theory and technological calculation], Leningrad: Mashinostroyeniye, 1967, 589 p. (In Russ.)
2. Sobolev A.A., Mel'nikov P.A., Tyutyunik A.O. [Movement of particles in an air stream], *Vektor nauki TGU* [Vector of Science TSU], 2011, no. 3 (17), pp. 82-86. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Rogal'skaya Yu.N., Yednach V.N. *Tekhnicheskoye i kadrovoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve* [Technical and staffing of innovative technologies in agriculture], Proceedings of the International Scientific Practical Conference, 24-25 October, 2019, Minsk, 2019, part 1, pp. 59-61. (In Russ.)
4. Rakhimov Z.S., Khlyzov N.T., Rakhimov I.R., Sidochenko D.V., Galimov A.N. [Substantiation of the parameters of the pneumatic system for transporting seeds and fertilizers of a soil-cultivating sowing unit], *APK Rossii* [APK of Russia], 2017, vol. 24, no. 1, pp. 91-104. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Chebotarev V.P., Lepeshkin N.D., Salapura Yu.L., Zubenko D.V. *Pnevmaticheskoye vysevyayushchiye sistemy posevnykh mashin: teoriya, raschet, eksperiment* [Pneumatic sowing systems of sowing machines: theory, calculation, experiment], Minsk: BGATU, 2019, 224 p. (In Russ.)
6. Rogal'skaya Yu.N., Yednach V.N., Suleymanov M.I., Sap'yan Yu.N. *Tekhnicheskoye i kadrovoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve* [Technical and staffing of innovative technologies in agriculture], Proceedings of the International Scientific Practical Conference, 24-25 October, 2019, Minsk, 2019, part 1, pp. 84-85. (In Russ.)
7. <http://gostrf.com/normadata/1/4293852/4293852020.htm> (accessed 13 October 2021).
8. Yednach V.N., Rogal'skaya Yu.N. *Sovremennyye problemy osvoyeniya novoy tekhniki, tekhnologiy, organizatsii tekhnicheskogo servisa v APK* [Modern problems of mastering new equipment, technologies, organization of technical service in the agro-industrial complex], Proceedings of the International Scientific Practical Conference Belagro-2019, 6-7 June, 2019, Minsk, 2019, pp. 387-391. (In Russ.)
9. *GOST 21560.1-82 Udobreniya mineral'nyye. Metod opredeleniya granulometricheskogo sostava* [GOST 21560.1-82 Mineral fertilizers. Method for determining the granulometric composition], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2003, 3 p. (In Russ.)

Zur Frage der Begründung geometrischer Parameter des Verteilerkopfes des Säapparates der Düngerstreumaschine

Zusammenfassung: Es sind die Änderungsmuster der Bewegungsgeschwindigkeit von körnigen Düngemitteln im pneumatischen Verteilungssystem einer Dünger-Sämaschine analysiert. Die Gründe für die Verletzung der Gleichmäßigkeit ihrer Verteilung über die Feldoberfläche sowie das Absetzen von Granulat im Verteilerkopf und in den Düngerkanälen sind betrachtet. Es sind Abhängigkeiten erhalten, die die Bewegungsmuster von körnigen Düngemitteln in dem Verteilungssystem widerspiegeln. Basierend auf den physikalischen, mechanischen und aerodynamischen Eigenschaften von körnigen Düngemitteln sind die geometrischen Parameter des Verteilerkopfes des Säsystems begründet.

Sur le problème de la justification des paramètres géométriques de la tête de distribution du semoir à toupee

Résumé: Sont analysés les modèles de changement de la vitesse de déplacement des engrais granulaires dans le système de distribution pneumatique de l'appareil de semoir à toupee. Sont examinées les raisons de la violation de l'uniformité de leur distribution sur la surface du champ, ainsi que de la sédimentation des granules dans la tête de distribution. Sont obtenues les dépendances reflétant les schémas de mouvement des engrais granulaires dans le système de distribution. Sont justifiés les paramètres géométriques de la tête de distribution du système d'ensemencement en fonction des propriétés physiques, mécaniques et aérodynamiques des engrais granulaires.

Авторы: *Романюк Николай Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, ректор УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»; *Еднач Валерий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механика материалов и детали машин», УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь; *Козлов Радион Игоревич* – заместитель директора по инновационной деятельности, главный конструктор ОАО «Лидагропромаш», Лида, Республика Беларусь; *Хартанович Анастасия Михайловна* – студент, УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь; *Попов Андрей Иванович* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ФАНЕРЫ

В. П. Ярцев, В. М. Данилов

*Кафедра «Конструкции зданий и сооружений», vt.danilov1997@gmail.com;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: влажность; тепловое старение; термофлуктуация; УФ-облучение; фанера.

Аннотация: Представлены результаты экспериментальных исследований эксплуатационных свойств фанеры, подверженной влиянию влаги, теплового старения, УФ-облучения. Для получения достоверных данных применена термофлуктуационная концепция прочности, позволяющая учитывать одновременное действие температуры, времени и нагрузки, а также дополнительные внешние воздействия. Выявлено, что климатическое старение губительно влияет на фанеру, а именно происходит разрыв связей между частицами, а затем и комплексное снижение прочности и сопротивляемости материала другим климатическим воздействиям. Установлено, что некоторые виды воздействий повышают значение жесткости фанеры, что вызывает хрупкий характер разрушения, при этом УФ-облучение незначительно повышает прочность вследствие возникновения экранирующего эффекта.

Введение

Одним из основных методов строительства жилых или небольших коммерческих сооружений является применение деревянных конструкций. В последние годы деревянное каркасное строительство стало растущей тенденцией отчасти из-за его экономической технологии строительства и широкой доступности материалов. Зачастую в качестве отделочного материала таких каркасов применяют фанеру [1, 2].

Фанера представляет собой слоистую клееную конструкцию, состоящую из трех и более листов древесины с взаимно перпендикулярным расположением волокон в смежных слоях. Это придает фанере повышенную прочность в различных направлениях, стабильность формы, что в свою очередь является большим преимуществом перед натуральной древесиной [3]. Фанера, как и натуральная древесина – материал, который легко поддается обработке. Поверхность фанеры обрабатывается разными способами: ламинирование, покрытие строганным шпоном, красками, лаками [4].

Изготавливают фанеру из древесины березы, ольхи, ясеня, ильма, дуба, липы, осины, тополя, клена, ели, сосны, пихты, кедра и лиственницы. Для склеивания применяют фенолформальдегидные, карбамидные и белковые клеи. Фанера состоит из наружных и внутренних слоев. Наружные слои подразделяются на ли-

цевой и оборотный, качество которых и определяет качество листа фанеры. Лицевой слой содержит меньше пороков древесины и дефектов обработки, чем оборотный и внутренний [5, 6].

Фанера, как и любой другой строительный материал, в большей либо меньшей степени подвергается влиянию внешних факторов. К ним можно отнести влагу, действие пониженных и повышенных температур, УФ-облучение, тепловое старение, внешние нагрузки и т.п. Действие внешних факторов приводит к ухудшению эксплуатационных свойств (прочности, теплостойкости и т.д.), то есть к старению материала [7, 8].

Методология проведения исследования

В данной работе для изучения влияния климатических воздействий на эксплуатационные свойства фанеры проведен комплекс исследований, включающий в себя пять типов эксперимента.

Первый эксперимент нацелен на выявление возможности нарушения связей в материале под действием УФ-облучения и теплового старения. Такая зависимость выявляется путем изучения поглощения материалом жидких сред и его набухания. Выбор воды в качестве исследуемой жидкой среды (как самой распространенной) обусловлен высоким ее влиянием на характеристики деревянных композитов [9].

Определение стойкости фанеры к действию УФ-облучения проводится в специальной камере искусственного фотостарения. Процесс теплового старения проводится путем тепловой обработки в сушильном шкафу. Водопоглощение и набухание материала по толщине определяются соответственно по формулам:

$$B = \frac{m_n - m_k}{m_n} 100 \%; \quad (1)$$

$$H = \frac{c_n - c_k}{c_n} 100 \%, \quad (2)$$

где m_n , m_k и c_n , c_k – масса и высота образцов соответственно до испытания и после его пребывания в воде, кг.

Второй эксперимент определяет влияние УФ-облучения и теплового старения на скорость набухания фанеры. Выявление скорости набухания определяется путем перестроения графоаналитическим дифференцированием в координаты логарифм скорости набухания от обратной температуры. Для их описания используется уравнение вида Аррениуса

$$w = w_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (3)$$

где w – скорость набухания, %; w_0 – предэкспоненциальный множитель, %/с; E – энергия активации (набухания или разбухания), кДж/моль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); T – температура, К.

Третий эксперимент нацелен на выявление влияния УФ-облучения и набухания на термическое расширение фанеры. Дилатометрические исследования позволяют определять не только температуры фазовых переходов, но и исследовать влияние на них различных факторов (молекулярной массы, термической предыстории, скорости нагрева и т.д.). Вид дилатометрических кривых в области переходов зависит от структуры макромолекул и надмолекулярной структуры полимера, что позволяет исследовать характер переходов в сополимерах, разветвленных и сшитых полимерах, в системах «полимер – полимер» и «полимер – низкомолекулярное вещество» и т.д.

При повышенных температурах и замачивании происходит изменение размеров строительных конструкций, вызывающее в материале значительные термические или влажностные напряжения. Исследование заключается в построении дилатометрических графиков на основе экспериментальных данных [10]. Испытания проводятся на линейном дилатометре при постоянной скорости нагрева $1,65\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ в свободном состоянии, после УФ-облучения и после замачивания в воде. По полученным кривым определяется коэффициент линейного термического расширения, $1/^\circ\text{C}$:

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad (4)$$

где l_0 – первоначальная длина образца, мм; Δl – удлинение образца, мм, при изменении температуры на величину ΔT , $^\circ\text{C}$.

Ввиду того что зависимости не являются прямолинейными, их разбивают на линейные участки, где для каждого участка находится α . Затем данный коэффициент усредняется и принимается как общий для всего графика.

Четвертый эксперимент определяет влияние температуры на прочность фанеры до и после УФ-облучения. Испытание заключается в поперечном изгибе элементов фанеры при различных температурах. Образцы ступенчато нагружаются на шестипозиционном стенде (рис. 1). Данный стенд состоит из рамы 1, которая выполнена из швеллеров. На опорной площадке рамы 2 установлены две роликовые опоры 3 на расстоянии друг от друга, равным пролету балки 50 мм. Образец 4 помещается на роликовые опоры и нагружается с помощью грузового устройства 5. Повышенная температура создается стержневыми электронагревателями 6. Для снижения теплопотерь и создания направленного теплового потока на опорную площадку установлен и закреплен на раме кожух 8. Температура задается лабораторным автотрансформатором 7, а регулируется потенциометром в диапазоне $0 \dots 300\text{ }^\circ\text{C}$ и дополнительно контролируется термометром с точностью $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$. Следует отметить, что термopара и шарик термометра расположены в зоне разрушения рабочего участка образца. Для устранения механических колебаний при разрушении образцов использовалось демфирующее устройство – заполненная песком емкость 9.

В ходе эксперимента фиксируется их критическая нагрузка. На основе экспериментальных данных строится график зависимости критического напряжения от температуры.

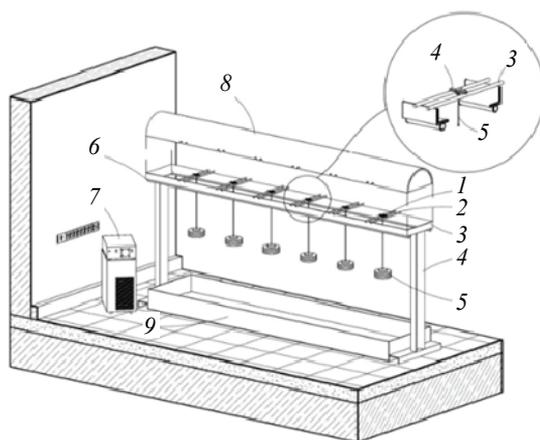


Рис. 1. Схема установки для проведения испытаний

Пятый эксперимент нацелен на изучение влияния влажности на долговечность фанеры. Предварительно образцы замачиваются в воде в течение 1 часа. Затем определяется их несущая способность при поперечном изгибе на шестипозиционном стенде, в режиме постоянных заданных температур и напряжений. Затем по полученным экспериментальным данным строится график в координатах логарифм долговечности от напряжения.

Результаты проведенного исследования

Вода существенно влияет на физико-механические характеристики древесных материалов, в том числе и на фанеру. Испытания проводились в воде при постоянных температурах (20, 40, 60 °С) до и после воздействия теплового старения и УФ-облучения. По полученным результатам построены кинетические кривые в координатах «водопоглощение – время выдержки в воде» (рис. 2) и «набухание – время выдержки в воде» (рис. 3). Кривые имеют экспоненциальный вид.

Из приведенных выше графиков видно, что наиболее сильно процессы набухания и водопоглощения протекают на начальном уровне (в течение 50...100 мин), после чего они замедляются, и наступает стабилизация. При этом на скорость процессов сильно влияет температура воды. Так, при ее нагреве до 60 °С величина водопоглощения фанеры увеличивается в 2 раза.

После воздействия теплового старения и УФ-облучения поведение фанеры в воде меняется. Из полученных результатов следует, что в фанере под действием УФ-облучения и теплового старения наблюдается нарушение связей между частицами, в результате чего материалы становятся менее восприимчивыми к действию воды.

Для определения характеристик водопоглощения фанеры построены графики зависимости скорости набухания от обратной температуры, имеющие вид прямых (рис. 4).

Предэкспонента определяется экстраполяцией данной прямой на ось ординат (скорость набухания), а энергия активации данного процесса определяется как тангенс угла наклона прямой. Полученные результаты представлены в табл. 1.

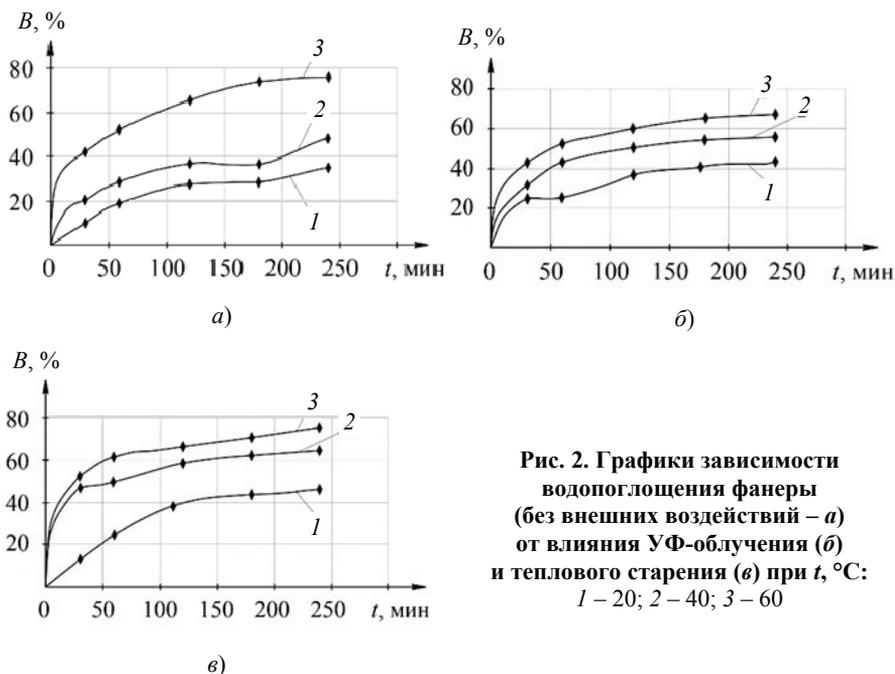


Рис. 2. Графики зависимости водопоглощения фанеры (без внешних воздействий – а) от влияния УФ-облучения (б) и теплового старения (в) при t , °С: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60

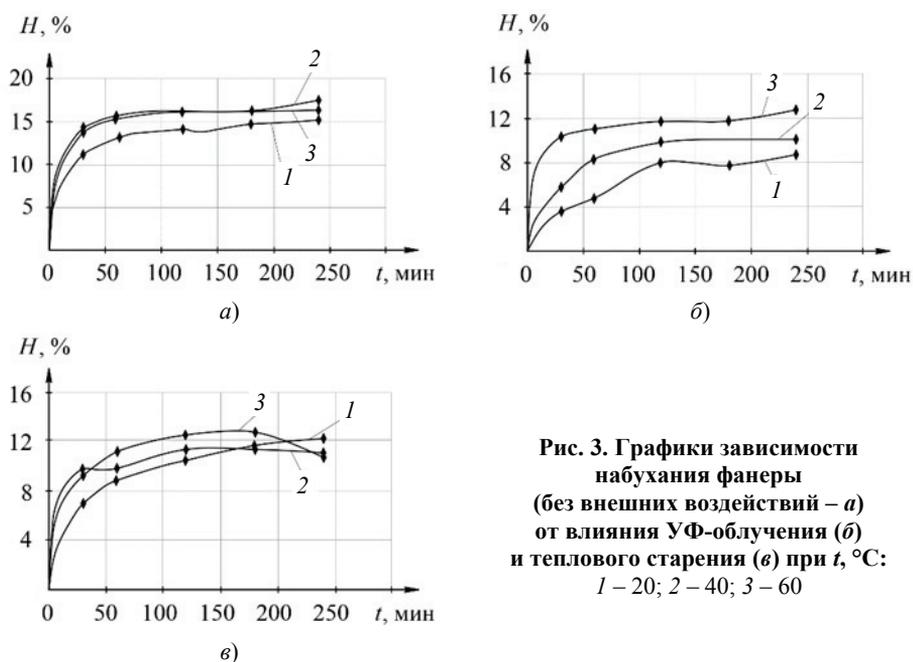


Рис. 3. Графики зависимости набухания фанеры (без внешних воздействий – а) от влияния УФ-облучения (б) и теплового старения (в) при $t, ^\circ\text{C}$: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60

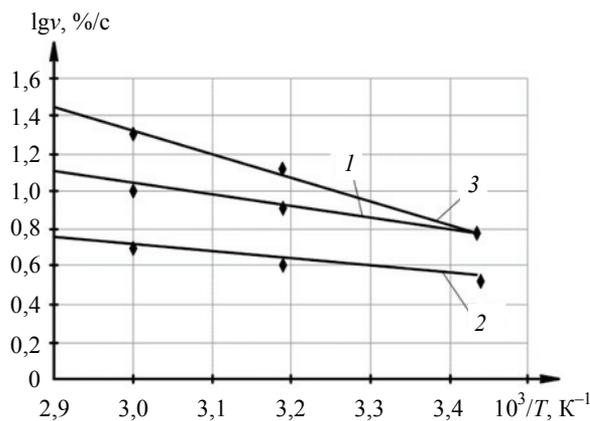


Рис. 4. Графики зависимости скорости набухания фанеры в воде от обратной температуры: 1 – без воздействий; 2 – УФ-облучение; 3 – тепловое старение

Таблица 1

Значения физических констант набухания фанеры

Тип воздействия	$E, \text{кДж/моль}$	$\lg v$	$E/\lg v$
Без воздействий	19,96	2,5	7,98
После УФ-облучения	19,96	2,2	9,07
После теплового старения	21,95	4,6	4,77

Из таблицы видно, что константы, характеризующие скорость набухания, меняются в зависимости от вида воздействия. Для фанеры наиболее опасным видом воздействия является тепловое старение.

Также изучено поведение фанеры в свободном состоянии при нагревании с заданной скоростью 1,65 °С/мин до и после УФ-облучения и после замачивания в воде (рис. 5). При УФ-облучении вид дилатометрических кривых не меняется, но линейное изменение размеров образца происходит менее интенсивно (см. рис 5, а). После замачивания вид зависимостей остается таким же, однако интенсивность расширения изменяется (см. рис. 5, б).

По полученным кривым определены коэффициенты линейного термического расширения $\alpha \times 10^{-6}$, 1/°С, которые составили без воздействий, после УФ-облучения и набухания соответственно 131, 99 и 61.

Из таблицы видно, что воздействие УФ-облучения уменьшает коэффициент линейного термического расширения в 1,2 раза, то есть происходит увеличение жесткости материала. После замачивания фанеры значение данного коэффициента уменьшилось в 2,2 раза, что говорит о повышении жесткости. Определены структурные переходы после фотостарения, которые характеризуются температурами перехода, для фанеры – 40 и 70 °С. После УФ-облучения температура перехода смещается в более высокую область температур – 50 и 90 °С, что связано со слоистой структурой материала.

Результаты влияния температуры на прочность фанеры приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что после УФ-облучения несколько возрастает прочность фанеры, то есть ультрафиолет оказывает экранирующий эффект на фанеру. Таким образом увеличивается необходимая нагрузка, требующаяся для разрушения материала.

На основе данных из графика получены следующие значения: температура разрушения фанеры без приложения нагрузки составила без воздействий и после УФ-облучения соответственно 212 и 237 °С; предельное напряжение при $t = 0$ °С – без воздействий 100 МПа, после УФ-облучения 119 МПа. Значение предельной

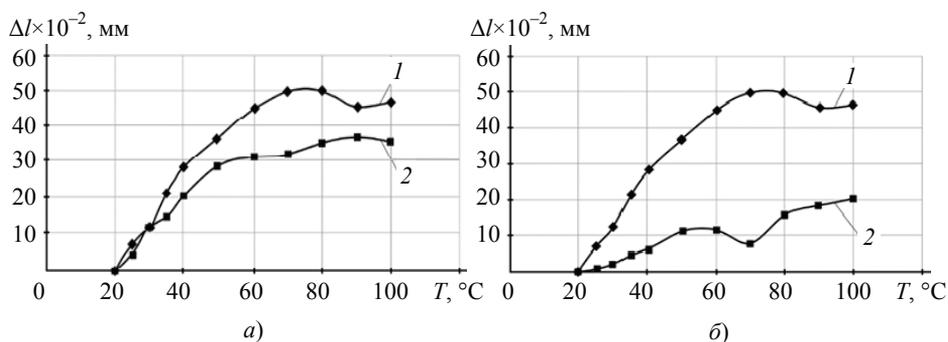


Рис. 5. Графики зависимости линейного термического расширения фанеры от влияния УФ-облучения (а) и набухания (б):
1 – без воздействий; 2 – после УФ-облучения и набухания

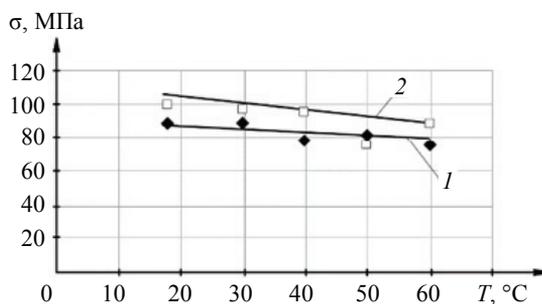


Рис. 6. Графики зависимости прочности фанеры от влияния температуры до УФ-облучения (1) и после (2)

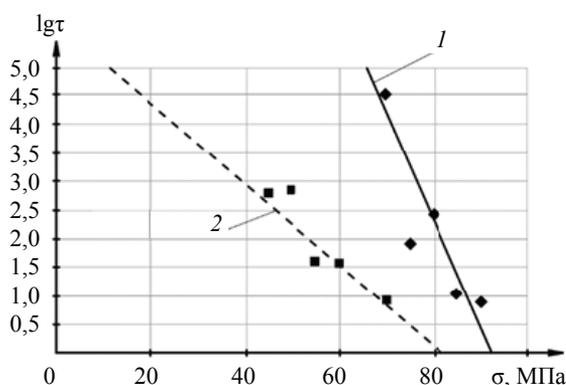


Рис. 7. Зависимость логарифма долговечности от напряжения для фанеры до (1) и после (2) набухания в течение 1 часа

температуры без приложения нагрузки получено путем интерполяции на ось абсцисс. Значение разрушающего напряжения при нулевой температуре получено путем интерполяции на ось ординат.

Для изучения влияния воды на долговечность фанеры проведены длительные испытания. Полученные экспериментальные данные в координатах «lgt – σ » приведены на рис. 7, из которого видно, что характер зависимостей до и после воздействия воды сохраняется, но при этом наблюдается значительная потеря (в 4,5-5 раз) долговечности и прочности фанеры.

Выводы

На основе проведенных исследований установлено, что воздействие как УФ-облучения, так и теплового старения вызывает нарушение связей между частицами, что значительно понижает способность фанеры сопротивляться влиянию воды. Константы, характеризующие скорость набухания, меняются в зависимости от вида воздействия (УФ-облучения или теплового старения). Для фанеры наиболее опасным видом воздействия является тепловое старение.

Из полученных данных видно, что воздействие УФ-облучения уменьшает коэффициент линейного термического расширения в 1,2 раза, то есть происходит увеличение жесткости материала. После замачивания фанеры значение коэффициента уменьшилось в 2,2 раза, что также говорит о повышении жесткости. Определены структурные переходы до воздействия УФ-облучения (40 и 70 °С) и после (50 и 90 °С).

При изучении влияния УФ-облучения на кратковременную прочность фанеры установлено, что происходит незначительное ее повышение вследствие экраняющего эффекта. Замачивание фанеры в воде в течение одного часа (для изучения длительной прочности) показывает, что происходит снижение долговечности, при этом характер зависимостей сохраняется.

Список литературы

1. Корчаго, И. Г. Применение древесноплитных материалов в строительстве / И. Г. Корчаго. – М. : Стройиздат, 1984. – 94 с.
2. Строительные материалы : учебник / В. Г. Микульский, Г. И. Горчаков, В. В. Козлов [и др.] ; под общей ред. В. Г. Микульского. – М. : Ассоциация строительных вузов, 1996. – 488 с.
3. Леонович, А. А. Древесноплитные материалы специального назначения / А. А. Леонович. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Лань, 2019. – 160 с.

4. Васечкин, Ю. В. Технология и оборудование для производства фанеры : учебник / Ю. В. Васечкин. – М. : Лесная промышленность, 1983. – 312 с.

5. Сузюмов, А. В. Прогнозирование долговечности фанеры в ограждающих и несущих строительных конструкциях / А. В. Сузюмов, О. А. Киселева, В. П. Ярцев // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения : материалы Десятых академических чтений РААСН, 24 – 29 апреля 2006 г., Казань – Пенза. – Казань, 2006. – С. 222 – 224.

6. Уголев, Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение : учеб. / Б. Н. Уголев. – М. : Академия, 2004. – 272 с.

7. Hrazsky, J. A Contribution to the Properties of Combined Plywood Materials / J. Hrazsky, P. Kral // Journal of Forest Science. – 2007. – Vol. 53. – P. 483 – 490.

8. Demir, A. The Effect of Some Technological Properties of Plywood Panels on Seismic Resistant Performance of Wooden Shear Wall / A. Demir, C. Demirkir, I. Aydin // Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences. – 2019. – Vol. 10, No. 1. – P. 37 – 45.

9. Мамонтов, С. А. Тепловое и световое старение фанеры строительного назначения / С. А. Мамонтов, О. А. Киселева // Вестн. гражданских инженеров. – 2014. – № 5 (46). – С. 85 – 89.

10. Мамонтов, С. А. Дилатометрия фанеры, подверженной тепловому старению и УФ-облучению / С. А. Мамонтов, О. А. Киселева // Технические науки – от теории к практике. – 2014. – № 41. – С. 101 – 106.

The Impact of Climatic Aging on the Performance Properties of Plywood

V. P. Yartsev, V. M. Danilov

*Department of Design of Buildings and Structures, vm.danilov1997@gmail.com;
TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: humidity; thermal aging; thermal fluctuation; UV irradiation; plywood.

Abstract: The results of experimental studies of the performance properties of plywood exposed to moisture, thermal aging, and UV irradiation are presented. To obtain reliable data, the thermal fluctuation concept of strength was used, which allows taking into account the simultaneous action of temperature, time and load, as well as additional external influences. It was revealed that climatic aging has a detrimental effect on plywood, namely, there is a break in the bonds between the particles, and then a complex decrease in the strength and resistance of the material to other climatic influences. It has been established that some types of impacts increase the value of plywood stiffness, which causes a brittle fracture, while UV irradiation slightly increases strength due to the occurrence of a screening effect.

References

1. Korchago I.G. *Primeneniye drevesnoplitnykh materialov v stroitel'stve* [Application of wood-based materials in construction], Moscow: Stroyizdat, 1984, 94 p. (In Russ.)

2. Mikul'skiy V.G. [Ed.], Gorchakov G.I., Kozlov V.V. [et al.] *Stroitel'nyye materialy: uchebnik* [Building materials: textbook], Moscow: Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov, 1996, 488 p. (In Russ.)

3. Leonovich A.A. *Drevesnoplitnyye materialy spetsial'nogo naznacheniya* [Wood-based materials for special purposes], Moscow: Lan', 2019, 160 p. (In Russ.)

4. Vasechkin Yu.V. *Tekhnologiya i oborudovaniye dlya proizvodstva fanery: uchebnik* [Technology and equipment for plywood production: textbook], Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1983, 312 p. (In Russ.)

5. Suzyumov A.V., Kiseleva O.A., Yartsev V.P. *Dostizheniya, problemy i perspektivnyye napravleniya razvitiya teorii i praktiki stroitel'nogo materialovedeniya* [Achievements, problems and perspective directions of development of the theory and practice of building materials science], of the Tenth academic readings of RAASN, 24 - 29 April, 2006, Kazan - Penza, Kazan, 2006, pp. 222-224. (In Russ.)

6. Ugolev B.N. *Drevesinovedeniye i lesnoye tovarovedeniye: uchebnik* [Wood science and forest commodity science: textbook], Moscow: Akademiya, 2004, 272 p. (In Russ.)

7. Hrazsky J., Kral P. A Contribution to the Properties of Combined Plywood Materials, *Journal of Forest Science*, 2007, vol. 53, pp. 483-490.

8. Demir A., Demirkir C., Aydin I. The Effect of Some Technological Properties of Plywood Panels on Seismic Resistant Performance of Wooden Shear Wall, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 37-45.

9. Mamontov S.A., Kiseleva O.A. [Thermal and light aging of plywood for construction purposes], *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2014, no. 5 (46), pp. 85-89. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Mamontov S.A., Kiseleva O.A. [Dilatometry of plywood subjected to thermal aging and UV irradiation], *Tekhnicheskiye nauki - ot teorii k praktike* [Technical sciences - from theory to practice], 2014, no. 41, pp. 101-106. (In Russ., abstract in Eng.)

Der Einfluss von Klima-Alterung auf die Betriebseigenschaften des Sperrholzes

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse experimenteller Studien zu den Leistungseigenschaften von Sperrholz vorgestellt, das Feuchtigkeit, thermischer Alterung und UV-Bestrahlung ausgesetzt ist. Um zuverlässige Daten zu erhalten, wurde das thermische Fluktuationkonzept der Festigkeit verwendet, das die Berücksichtigung der gleichzeitigen Einwirkung von Temperatur, Zeit und Belastung sowie zusätzlicher äußerer Einflüsse erlaubt. Es ist festgestellt, dass die klimatische Alterung eine nachteilige Wirkung auf Sperrholz hat, nämlich tritt ein Bruch der Bindungen zwischen den Partikeln und dann eine komplexe Abnahme der Festigkeit und Widerstandsfähigkeit des Materials gegenüber anderen klimatischen Einflüssen auf. Es ist festgestellt, dass einige Arten von Stößen den Wert der Sperrholzsteifigkeit erhöhen, was einen Sprödebruch verursacht, während UV-Bestrahlung die Festigkeit aufgrund des Auftretens eines Abschirmeffekts geringfügig erhöht.

Influence du vieillissement climatique sur les propriétés de performance du contreplaqué

Résumé: Sont présentés les résultats des études expérimentales sur les propriétés de performance du contreplaqué affecté par l'humidité, le vieillissement thermique, l'irradiation UV. Pour l'obtention des données fiables, est appliqué le concept de résistance à la thermofluction ce qui permet de prendre en compte les effets simultanés de la température, du temps et de la charge, ainsi que les effets externes supplémentaires. Est constaté que le vieillissement climatique a un effet néfaste sur le contreplaqué qui aboutit à la rupture des liaisons entre les particules et la réduction complexe de la résistance aux influences climatiques. Est constaté que certains types d'effets augmentent la rigidité du contreplaqué, ce qui entraîne un caractère de rupture fragile, tandis que l'irradiation UV augmente légèrement la résistance en raison de l'effet de blindage.

Авторы: *Ярцев Виктор Петрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений»; *Данилов Владислав Михайлович* – аспирант кафедры «Конструкции зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.



**Куди
Андрей Николаевич**

Andrei Kudi

Доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

16 декабря 2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Квазидиффузионная сепарация в гравитационном потоке зернистых материалов и ее технологическое применение» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Работа выполнена на кафедре «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор В. Н. Долгунин.

В диссертационной работе разработаны теоретические основы процесса сепарации частиц по размеру и плотности при быстром сдвиговом гравитационном течении в условиях его высокой структурной неоднородности, а также способы управления эффектами сепарации и их технологического использования при воздействии физических полей.

Впервые обнаружен эффект квазидиффузионной сепарации (миграции) неоднородных частиц, обусловленный пространственной неоднородностью быстрого гравитационного течения зернистой среды. Установлен физический механизм и разработана модель кинетики квазидиффузионной сепарации вследствие пространственной структурной неоднородности сдвигового потока. Проведено моделирование процесса сепарации и определены области относительных значений размера и плотности частиц, в которых доминируют эффекты сегрегации и квазидиффузионной сепарации. Предложены способы управления эффектами сепарации частиц по размеру и плотности в быстром гравитационном потоке путем воздействия на его структурные и кинематические параметры физических полей (гравитационного, гидродинамического и вибрационного).

На основе результатов исследования разработан алгоритм принятия решений при обработке зернистых материалов по комплексу физико-механических свойств с использованием эффектов сегрегации и квазидиффузионной сепарации при быстром гравитационном течении. Алгоритм использован при разработке мультифракционной технологии сепарации частиц по размеру, плотности и форме.

Приказом Минобрнауки России от 02 июня 2022 года № 607/нк А. Н. Куди присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: теоретические и экспериментальные исследования сепарации неоднородных частиц в быстрых гравитационных течениях зернистых сред, разработка технологии и оборудования для сепарации зернистых материалов.

**Обухов
Артём Дмитриевич**

Obukhov Artem

Доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», руководитель молодежной лаборатории VR тренажеров ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

09 декабря 2021 года на заседании диссертационного совета 24.2.408.03 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитил диссертацию на тему «Методология структурно-параметрического синтеза адаптивных информационных систем на основе нейросетевых методов» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации.

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный консультант – д-р техн. наук, профессор М. Н. Краснянский.

В диссертации разработана методология структурно-параметрического синтеза адаптивных информационных систем, основанная на нейросетевых методах обработки и передачи информации; автоматической генерации данных; автоматической переадресации; классификации и распределения данных; адаптации параметров интерфейса; управления. Применение разработанных методов и программных средств на основе технологий машинного обучения позволило повысить эффективность процесса синтеза адаптивных информационных систем (сократить экономические затраты, уменьшить сложность программной реализации, повысить адаптивность, качество и производительность работы системы). Разработан метод формализации информационных потоков предметной области адаптивных информационных систем (АИС), который отличается использованием многоуровневых графов для формирования моделей описания процессов движения и обработки информации на разных уровнях декомпозиции. На основе теоретических исследований системных связей, существующих методологий, архитектур и моделей информационных систем впервые поставлена и решена задача структурно-параметрического синтеза АИС с использованием комплексного критерия оптимизации АИС. Впервые разработана нейросетевая архитектура АИС, основанная на организации связей между модулями посредством нейросетевых компонентов.

Приказом Минобрнауки России от 05 мая 2022 года № 466/нк А. Д. Обухову присуждена ученая степень доктора технических наук.

Область научных исследований: адаптивные информационные системы, машинное обучение, виртуальные тренажерные комплексы, системы электронного документооборота.



Муратова Наталья Сергеевна

Младший научный сотрудник управления фундаментальных и прикладных исследований, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов.

24 декабря 2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВО «ТГТУ» защитила диссертацию на тему «Гидротермальная карбонизация биоотходов в кипящем слое в среде перегретого водяного пара» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Работа выполнена на кафедре «Энергообеспечение предприятий и теплотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ».

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент С. Н. Кузьмин.

Область научных интересов: аппаратурно-технологическое оформление процессов высокотемпературной карбонизации биоотходов.