

УДК 62-551.4

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.31.4.030](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.030)

## Применение регуляторов с дробными степенями для регулирования параметров технологических процессов

**Н. В. Лысова, Н.В. Мясникова**

*Пензенский государственный университет  
Пенза, Российская Федерация*

**Резюме:** В настоящее время нарастает интерес к динамическим системам нецелого порядка. Развитие теории дробных степеней вызвало интерес к использованию нецелых порядков в задачах управления и регулирования, в составе которых объект регулирования и контроллер описываются моделями нецелых порядков. Исчисление дробного порядка предлагает гибкие вычислительные возможности, которые могут быть применены в проектировании систем управления. Однако, прежде чем результаты теоретических исследований могут быть перенесены на промышленные установки важно изучить эффекты контроллеров дробного порядка с помощью лабораторных экспериментов и моделирования. В данной статье рассматривается концепция дробного ПИД-контроллера, включающего в себя интегратор и дифференциатор нецелых порядков, анализируются его поведение и характеристики. Рассмотрены практические аспекты настройки и реализации контроллеров дробного порядка для системы регулирования веса бумажного полотна с использованием FOMCON (набор инструментов MATLAB для идентификации и управления системами дробного порядка). В работе рассмотрены способы применения ПИД-регуляторов, основанных на законах дробного исчисления для системы управления напорным устройством бумагоделательной машины (БДМ). Приведены результаты моделирования с применением классических ПИД-регуляторов и с применением ПИД-регуляторов с дробными степенями.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, бумагоделательная машина (БДМ), дробное исчисление, FOMCON, ПИ контроллер, ПИД-контроллер, проектирование системы управления, автоматическое управление, набор инструментов MATLAB.

**Для цитирования:** Лысова Н.В., Мясникова Н.В. Применение регуляторов с дробными степенями для регулирования параметров технологических процессов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(4). Доступно по: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=876> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.030

## Using regulators with fractional degrees to control process parameters

**N.V. Lysova, N.V. Myasnikova**

*Penza State University  
Penza, Russian Federation*

**Annotation:** Currently, there is a growing interest in dynamical systems of non-integer order. The development of the theory of fractional powers has aroused interest in the use of non-integer orders in control and regulation problems, in which the object of regulation and the controller are described by models of non-integer orders. Fractional order calculus offers flexible numerical capabilities that can be applied in the design of control systems. However, before the results of theoretical research can be transferred to industrial installations, it is important to study the effects of fractional flow controllers using laboratory experiments and simulations. This article discusses the concept of a fractional PID controller that includes an integrator and a non-integer order differentiator, and analyzes its behavior

and characteristics. Practical aspects of setting up and implementing fractional order controllers for the paper web weight control system using FOMCON (a set of MATLAB tools for identifying and managing fractional order systems) are considered. The paper presents an example of implementation of PID controllers of fractional order for the control system of the pressure device of a paper machine (BDM). The results of modeling using classical PID controllers and using PID controllers with fractional powers are presented.

**Keywords:** mathematical modeling, paper machine (PM), fractional calculus, FOMCON, PI-controller, PID-controller, design of control systems, automatic control, MATLAB tools.

**For citation:** Lysova N.V., Myasnikova N.V. Primenenie regulyatorov s drobnymi stepenyami dlya regulirovaniya parametrov technologicheskikh processov. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=876> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.030 (In Russ).

## Введение

Современным объектам управления свойственны сложная структура в сочетании со все более жесткими требованиями к качеству переходных процессов, временными ограничениями и минимизацией энергетических затрат [1,2]. Несмотря на это в системах управления технологическими процессами преобладают традиционные методы управления. Самым распространённым методом управления технологическими процессами сегодня являются ПИД-регуляторы. Они сохраняют свою популярность благодаря низкой стоимости и удобству внедрения [3].

Из этого можно сделать вывод о том, что для повышения эффективности управления ответственными объектами необходимо рассматривать другие методы и подходы, обеспечивающие более качественный контроль [4].

Известно, что для ответственных объектов (которые могут представлять опасность в аварийных случаях), используется явная модель, на которую подается предполагаемое воздействие. Задача усложняется из-за влияющих факторов (температуры, давления, вибрации, шумы разной природы), приводящих к изменению параметров объекта.

Поэтому актуальна задача разработка модели, исследование влияющих факторов, разработка методов экспресс - идентификации параметров и прогнозирования поведения объекта с последующей коррекцией управляющих воздействий на объект.

## Материалы и методы

Рассмотрим пример исследования технологического процесса на основе моделирования при производстве бумажной продукции [5-7].

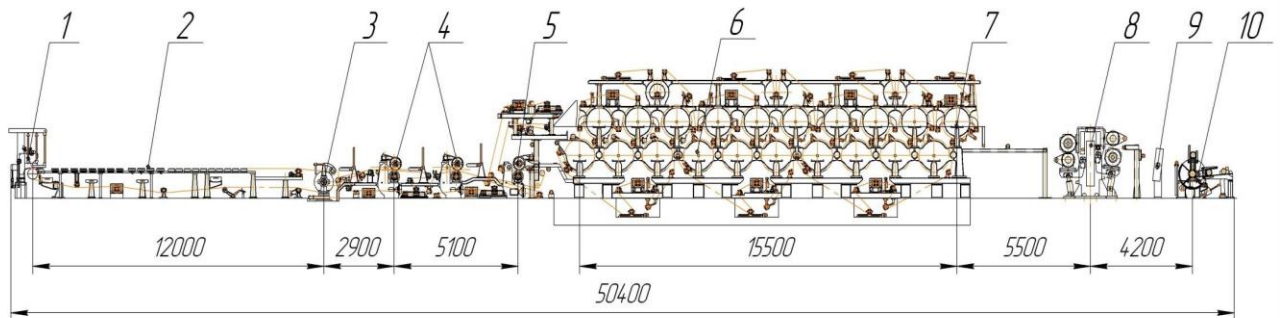
Бумажная промышленность является одной из ведущих областей лесного комплекса, который в силу динамики своего развития имеет весьма широкие перспективы не только в недалеком будущем, но и на настоящем этапе развития.

Производство бумаги отличается высокой материалоемкостью, водоемкостью и энергоемкостью. Качество продукции в настоящее время является одним из определяющих факторов, именно поэтому сегодня актуальна проблема повышения качества производимого продукта при максимальной экономии ресурсов.

Целью работы является повысить показатели качества регулирования и уменьшить дисперсию бумажного полотна, что позволит снизить процент брака и, соответственно, уменьшить затраты на производство. Что в свою очередь за счёт повышения качества получаемого изделия и уменьшения затрат на его изготовление сырья и энергии весьма заметно отразится на получаемой прибыли.

На Рисунке 1 представлена общая технологическая схема бумажного производства в упрощенном виде.

Структурно бумажное производство можно разделить на две части: системы управления по подготовке бумажной массы и изготовление бумаги на машине.



- 1 – Напорное устройство (закрытого типа); 2 – Сеточная часть; 3 –Отсасывающий гучвал; 4 –Пресс прямого направления; 5 –Пресс обратного направления; 6 – Сушильная часть;  
7 – Охлаждающий валик; 8 –Каландр; 9 – Сканирующее устройство;  
10 – Накат периферический.

Рисунок 1 – Структура бумагоделательной машины  
Figure 1 – Paper machine structure

На Рисунке 2 представлена функциональная схема процесса производства бумажного полотна.

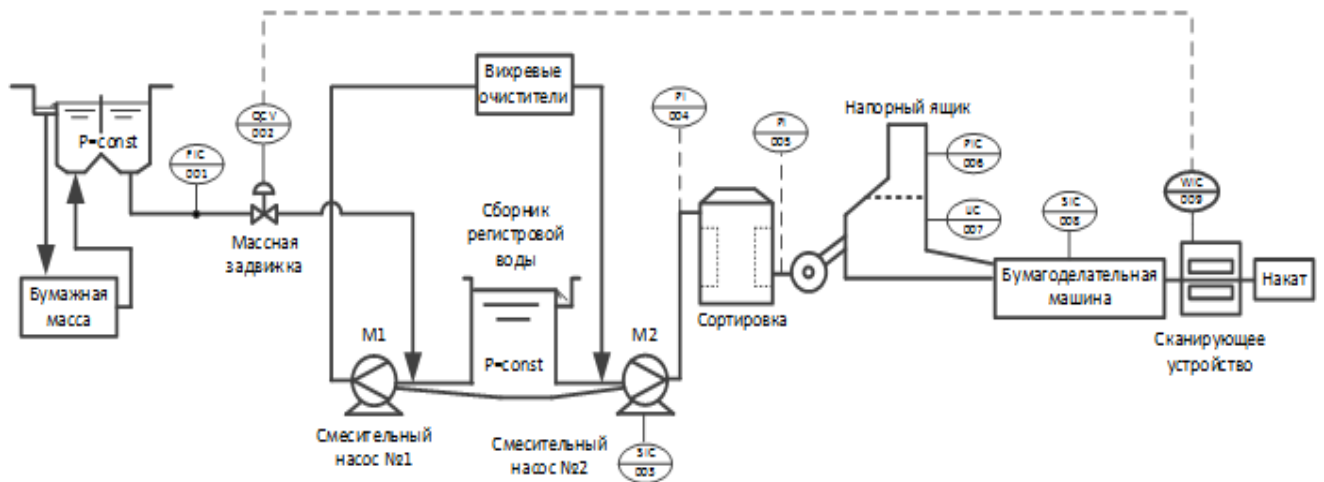


Рисунок 2 – Функциональная схема процесса производства бумажного полотна  
Figure 2 – Functional diagram of the paper production process

Равномерность структуры бумажного полотна формирование механических характеристик характеризуются сильной зависимостью от всех стадий процесса производства бумажного полотна.

Каждая часть бумагоделательной машины является функциональной подсистемой, которая выполняет определенные функции.

На Рисунке 3 представлены функциональные подсистемы бумажного производства.

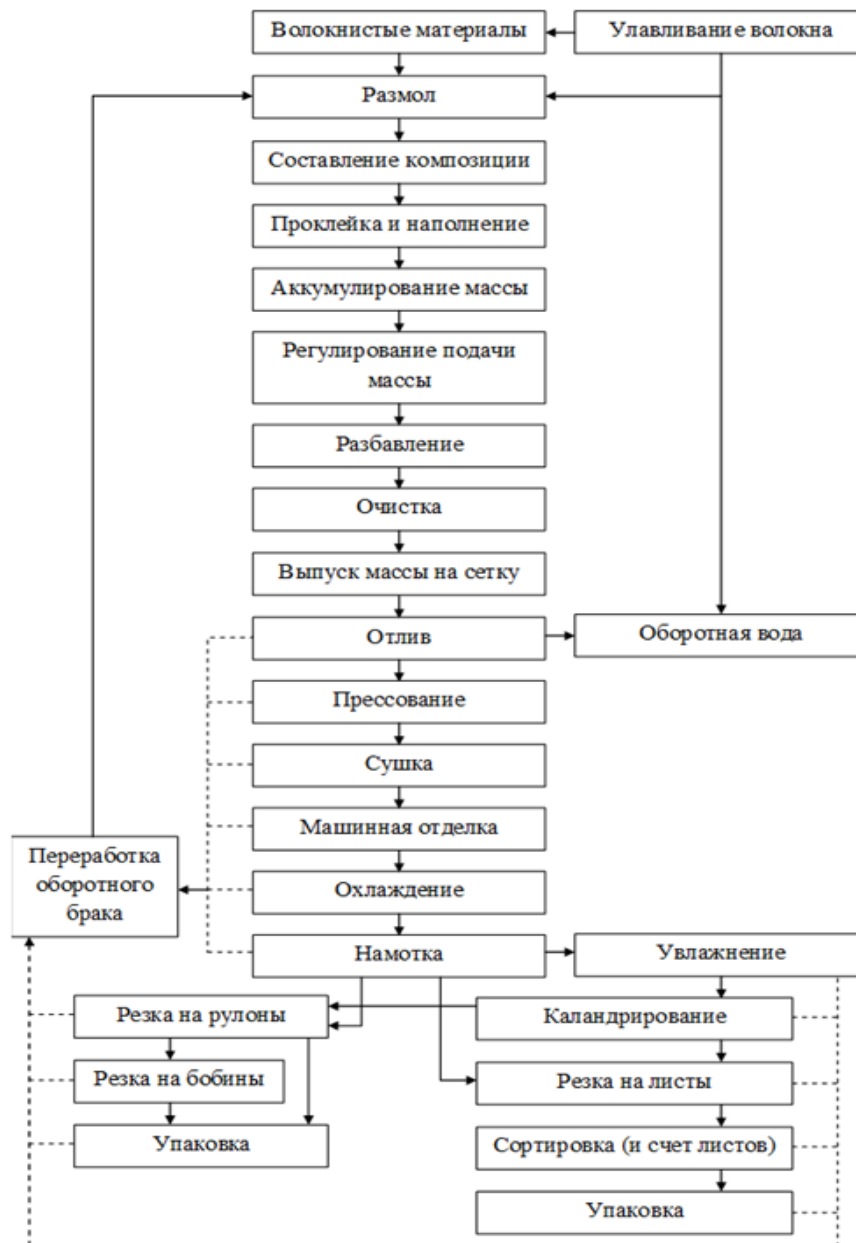


Рисунок 3 – Функциональные подсистемы бумажного производства  
Figure 3 – Functional subsystems of papermaking

### Математическая модель и основные параметры процесса

Качество изготавливаемой бумаги в значительной степени зависит от поступления массы на сетку бумагоделательной машины. Чтобы масса квадратного метра бумаги оставалась неизменной, необходимо постоянное соотношение между количеством подаваемой в единицу времени бумажной массы и скоростью машины.

Для этого необходимо: стабилизировать параметры струи (скорость, толщина, место контакта с сеткой бумагоделательной машины) бумажной массы, поступающей из напорного устройства.

Производство бумажного полотна и формирование свойств производимой бумаги начинается на мокрой части бумагоделательной машины. Можно не учитывать уровень

флокуляции волокон целлюлозосодержащих компонентов суспензии, что позволит считать степень однородности волокон в воде постоянными.

Наибольшая равномерность бумажного полотна достигается при равенстве скоростей сетки бумагоделательной машины и бумажной массы. Поскольку скорость привода сетки бумагоделательной машины постоянна и ее изменение ведет к изменению технологического режима, для достижения равномерности бумажного полотна необходимо стабилизировать производительность бумажной массы  $Q$ , поступающей из напорного ящика, которая задаётся выражением:

$$Q = \rho b u V_H, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность водной суспензии,

$b$  - ширина щели напорного ящика,

$u$  – высотой щели напорного ящика,

$V_H$  – скоростью выпуска бумажной массы из напорного ящика.

Ранее в работах [8,9] была построена Simulink – модель процесса отлива бумажной массы на сетку бумагоделательной машины, которая определяет три управляемых и управляющих параметра с нелинейными и перекрёстными взаимными связями.

Регулирование параметров осуществляется при помощи классических ПИ и ПИД-регуляторов, настройка которых достаточно сложна в подборе параметров. Классические регуляторы характеризуются высокими показателями перерегулирования и низким быстродействием.

Рассмотрим систему регулирования бумажного производства на основе регуляторов дробного порядка, представленную на Рисунке 4.

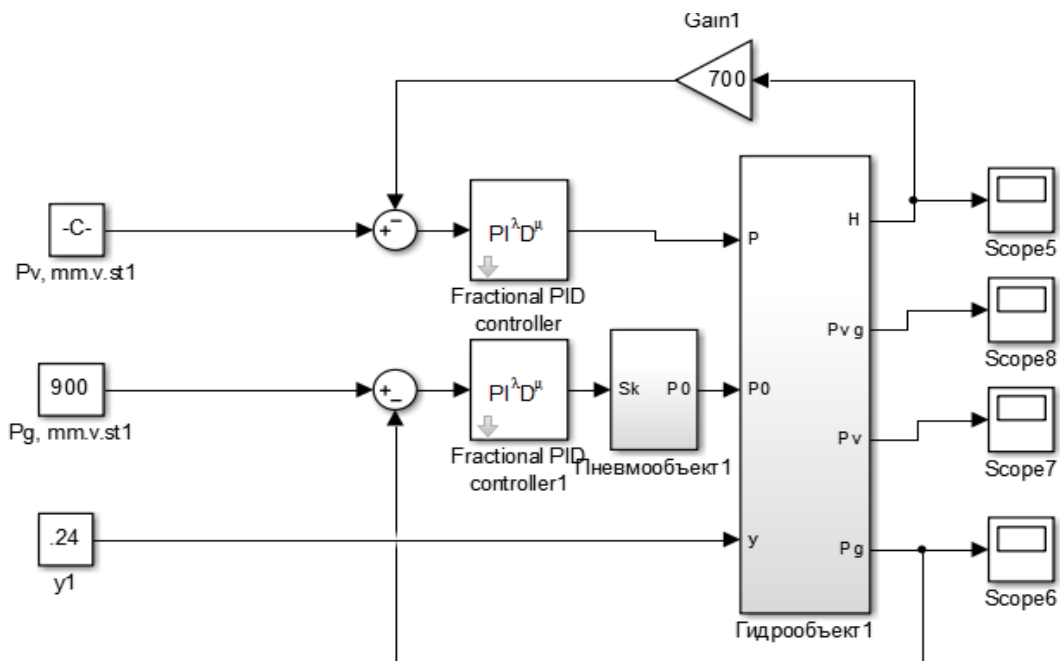


Рисунок 4 - Система регулирования с применением регуляторов дробного порядка

Figure 4 – Regulation system using fractional regulators

Законы дробного исчисления, являются предметом активных дискуссий более ста лет. На протяжении этого времени разрабатываются новые математические инструменты, которые применимы в области регулирования и управления. Изучение и применение законов дробного исчисления открывают новые возможности в усовершенствовании систем управления, что позволяет повысить точность описания системы и проектировать надежные контроллеры для улучшения качества контуров управления [10-12].

Основной концепции дробного исчисления является возможность расширения порядка производной от целых чисел к вещественным числам или дробям. Новые возможности моделирования позволяют разрабатывать эффективные линейные и нелинейные стратегии управления. Средства проектирования автоматизированных систем управления способны помочь инженерам в разработке подходящих контроллеров для конкретных установок.

В настоящее время в области проектирования систем управления существуют несколько инструментов для работы с дробными моделями и контроллерами. В данной работе рассмотрен набор инструментов Matlab Fomcon («Моделирование и управление дробным порядком»). В частности, большое внимание было уделено разработке универсального дробного ПИД-регулятора, основанного на алгоритмах численной оптимизации.

Известно, что ПИД-регуляторы повсеместно используются в промышленности. Однако, обычный ПИД-регулятор уступает ПИД-регулятору дробного порядка за счет более гибкой настройке последнего.

Исчисление дробного порядка предлагает широкие вычислительные возможности, которые могут быть применены в проектировании систем управления. Однако, прежде чем результаты теоретических исследований могут быть перенесены на промышленные установки важно изучить эффекты контроллеров дробного порядка с помощью лабораторных экспериментов и моделирования.

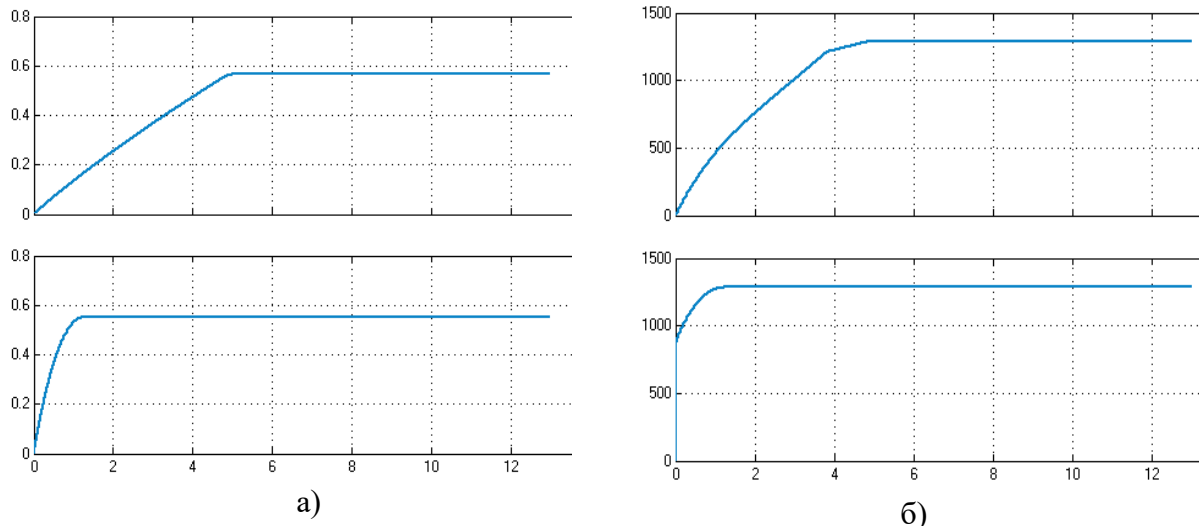
## Результаты

В работе рассматривается концепция дробного ПИД-контроллера, включающего в себя интегратор и дифференциатор нецелых порядков, анализируются его поведение и характеристики. Рассмотрены практические аспекты настройки и реализации контроллеров дробного порядка для системы регулирования веса бумажного полотна.

Представлен метод идентификации систем и настройки ПИД-регуляторов дробного порядка, основанный на применении программного пакета Fomcon (Fractional-Order Transfer Functions – передаточные функции дробного порядка) [13,14].

С помощью Simulink и инструментального средства Fomcon была усовершенствована модель системы и получены оптимальные параметры регулятора дробного порядка.

На Рисунке 5 представлено сравнение результатов работы системы с применением классических ПИД-регуляторов и ПИД-регуляторов с дробными степенями (по оси абсцисс – время (с), по оси ординат – сигнал в размерных единицах).



а) графики изменения относительной высоты столба суспензии;  
б) графики изменения давлений в напорном устройстве.

Рисунок 5 – Результаты работы системы с использованием классических и дробных ПИД-регуляторов

Figure 5 – System results using classic PID and fractional power PID controllers

Из Рисунков видно, что реализация дробных законов в системах управления с помощью применения дробных регуляторов, позволяет повысить качество регулирования и управления по сравнению с классическими системами.

Применение ПИД-регуляторов с дробными степенями позволяет повысить быстродействие, снизить перерегулирование и увеличить запас устойчивости системы.

Дальнейшее направление исследований – реализация моделируемых регуляторов программными средствами.

### Заключение

В данной работе на основе известной ранее математической модели была разработана математическая модель процесса отлива бумажной массы с применением регуляторов с дробными степенями.

Предложенная в данной работе система регулирования веса бумажного полотна с использованием регуляторов с дробными степенями для дает лучшие результаты по сравнению с традиционными методами регулирования с использованием ПИД-регуляторов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90186.*

*The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90186.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Егупов Н. Д. *Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления*. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2001;744.
2. Zadeh L.A. *Fuzzy sets*. Information and Control. 1965;8:338–353.
3. Ткалич С.А, Пивоваров В.П, Бурковский В.Л. *Модели принятия решений в системах управления потенциально – опасными производствами*. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014;10(5-1):129-132.

4. Митрохин А.А., Яхиауи Б., Бурковский В.Л. *Интеллектуализация процессов принятия решений в условиях потенциально опасных технологических процессов*. НТ-2019, Воронеж. 2019;135-139.
5. Шерстобитова А., Яськов А. *Оптические технологии в целлюлозно-бумажной промышленности*. М.: LAP Lambert Academic Publishing. 2015;164.
6. Карпунин И. И. *Щелочная варка древесины в присутствии хинона и его влияние на качество целевого продукта, используемого для производства упаковки*. Наука и техника. 2017;5.
7. Gullichen J. *Papermaking Part I. Stock Preparation and Wet End*. Helsinki, 2000;120.
8. Никулин С.В. *Совершенствование функциональных подсистем АСУТП бумажного производства на основе экстремального, нейросетевого и предиктивного управления*: дис. кандидата технических наук: 05.13.06. Пенза, 2016; 160.
9. Myasnikova N. V., Lysova N.V *Application of Modern Digital Processing Methods in Automated Control Systems*. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). DOI:10.1109/MWENT47943.2020.9067381
10. Yahyazadeh M., Haen M. *Application of fractional derivative in control functions*. Proc. Annual IEEE India Conf. INDICON. 200;1:252-257.
11. Monje C. A., Chen Y., Vinagre B., Xue D., Feliu V. *Fractional-order Systems and Controls: Fundamentals and Applications*. Advances in Industrial Control. Springer Verlag. 2010.
12. Miller K., Ross B. *An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations*. Wiley. 1993.
13. Oustaloup A., Melchior P., Lanusse P., Cois O., Dancla F. *The CRONE toolbox for Matlab*. Proc. IEEE Int. Symp. Computer-Aided Control System Design CACSD. 2000;190-195.
14. Xue D., Chen Y. Atherton D. P. *Linear Feedback Control- Analysis and Design with MATLAB (Advances in Design and Control)*, 1st ed. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics. 2008.

## REFERENCES

1. Egupov N. D. *Metody robustnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravlenija*. М.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Bauman. 2001;744.
2. Zadeh L.A. *Fuzzy sets*. Information and Control. 1965;8:338-353.
3. Tkalich S.A., Pivovarov V.P., Burkovsky V.L. *Decision-making Models in control systems for potentially dangerous industries*. Bulletin of the Voronezh state technical University. 2014;10(5-1):129-132.
4. Mitrokhin A.A., Yahiaoui B., Burkovsky V.L. *Intellectualization of decision-making processes in conditions of potentially dangerous technological processes*. NT-2019. Voronezh. 2019;135-139.
5. Sherstobitova A., Jas'kov A. *Opticheskie tehnologii v celljulozno-bumazhnoj promyshlennosti*. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2015; 164.
6. Karpunin I. I. *SHHelochnaya varka drevesiny v prisutstvii khinona i ego vliyanie na kachestvo tselevogo produkta, ispol'zuemogo dlya proizvodstva upakovki*. Nauka i tekhnika. 2017; 5.
7. Johan Gullichen. *Papermaking Part I. Stock Preparation and Wet End*. Helsinki. 2000;120.
8. Nikulin S.V. *Sovershenstvovanie funkcional'nyh podsystem ASUTP bumazhnogo proizvodstva na osnove jekstremal'nogo, nejrosetevogo I prediktivnogo upravlenija* dis. kandidata tehniceskikh nauk 05.13.06. Penza, 2016;160.



9. Myasnikova N. V., Lysova N.V *Application of Modern Digital Processing Methods in Automated Control Systems*. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). DOI:10.1109/MWENT47943.2020.9067381
10. Yahyazadeh M., Haen M. *Application of fractional derivative in control functions*. Proc. Annual IEEE India Conf. INDICON. 200;1:252-257.
11. Monje C. A., Chen Y., Vinagre B., Xue D., Feliu V. *Fractional-order Systems and Controls: Fundamentals and Applications*. Advances in Industrial Control. Springer Verlag. 2010.
12. Miller K., Ross B. *An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations*. Wiley. 1993.
13. Oustaloup A., Melchior P., Lanusse P., Cois O., Dancla F. *The CRONE toolbox for Matlab* Proc. IEEE Int. Symp. Computer-Aided Control System Design CACSD. 2000;190-195.
14. Xue D., Chen Y. Atherton D. P. *Linear Feedback Control- Analysis and Design with MATLAB (Advances in Design and Control)*, 1st ed. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics. 2008.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Лысова Наталья Владимировна**, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», Пенза, Российская Федерация  
*e-mail:* [natali22000@yandex.ru](mailto:natali22000@yandex.ru)  
ORCID: [0000-0003-0815-3012](https://orcid.org/0000-0003-0815-3012)

**Natalia V. Lysova**, P. G. of the Department of Automation and Telemechanics, Penza State University, Penza, Russian Federation

**Мясникова Нина Владимировна**, д.т.н., профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», Пенза, Российская Федерация  
*e-mail:* [genok123@mail.ru](mailto:genok123@mail.ru)

**Nina V. Myasnikova**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Telemechanics, Penza State University, Penza, Russian Federation