

УДК 676.2.056-55

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.31.4.002](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.002)

## Совершенствование функциональных подсистем управления бумажного производства на основе координирующего нечеткого регулятора и кросскорреляционных измерителей

М.С. Ревунов<sup>1,2</sup>, Н.В. Лысова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «МАЯК», Пенза, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», Пенза, Российская Федерация

**Резюме:** действующие системы управления процессом формирования бумажного полотна с регуляторами уровня массы и давления в напускном устройстве не обеспечивают желаемых показателей качества. В тоже время применение высокоточных и помехозащищенных алгоритмов управления на базе экстремальных и предиктивных регуляторов снижает быстродействие систем. Таким образом, дальнейшее повышение эффективности системы управления процессом формирования бумажного полотна возможно в рамках АРС-управления и нечеткой логики. Введение в систему кросскорреляционных оптических вычислителей скорости позволит сформировать данные об основных параметрах потока бумажной массы в моменты формирования полотна на сетке машины, что является необходимым и достаточным для внедрения в экстремальные системы управления регулятора соотношения скоростей, повышающего их быстродействие. Для замещения каскадного соединения регуляторов в системах управления процессом формирования бумажного полотна предлагается использовать координирующий нечеткий регулятор и методы нечеткого управления, позволяющие «развязать» между собой выходные сигналы с экстремального регулятора, регуляторов соотношения скоростей и общего давления, предназначенные для одного исполнительного механизма – компрессора. Таким образом, применение дополнительного контура стабилизации соотношения скоростей и координирующего нечеткого управления на 59.4% повысило быстродействие систем управления процессом формирования бумажного полотна по сравнению с экстремальными регуляторами и позволило снизить дисперсию веса полотна бумаги на 1.4%, что подтверждается актами внедрения на предприятии ОАО «МАЯК».

**Ключевые слова:** бумагоделательная машина, напорный ящик, дисперсия веса бумаги, скорость напуска бумажной массы, координирующее нечеткое управление.

**Для цитирования:** Ревунов М.С., Лысова Н.В. Совершенствование функциональных подсистем управления бумажного производства на основе координирующего нечеткого регулятора и кросскорреляционных измерителей. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=844>  
DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.002

## Improvement of functional subsystems of paper production management based on a coordinating fuzzy controller and cross-correlation meters

M.S. Revunov<sup>1,2</sup>, N.V. Lysova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Open joint stock company «MAYAK», Penza, Russian Federation

<sup>2</sup>Federal state budgetary educational institution of higher education "Penza state University", Penza, Russian Federation

**Abstract:** existing control systems for the paper web formation process with mass and pressure level regulators in the inlet device do not provide the desired quality indicators. At the same time, the use of

high-precision and noise-proof control algorithms based on extreme and predictive controllers reduces the performance of systems. Thus, further improvement of the efficiency of the control system for the paper web formation process is possible within the framework of APC control and fuzzy logic. The introduction of cross-correlation optical speed calculators into the system will allow generating data on the main parameters of the paper mass flow at the moments when the web is formed on the machine grid, which is necessary and sufficient for implementing a speed ratio controller in extreme control systems that increases their speed. To replace the cascade connection of regulators in the control systems for the process of forming a paper web, it is proposed to use a coordinating fuzzy controller and fuzzy control methods that allow “decoupling” the output signals from the extreme controller, speed ratio and total pressure regulators designed for a single actuator – the compressor. Thus, the use of an additional speed ratio stabilization loop and coordinating fuzzy control increased the speed of paper web formation control systems by 59.4% in comparison with extreme regulators and allowed reducing the dispersion of paper web weight by 1.4%, which is confirmed by the implementation certificates at the MAYAK enterprise.

**Keywords:** paper machine, headbox, the dispersion of the weight of the paper, the speed of filling up paper pulp, coordinating fuzzy control.

**For citation:** Revunov M.S., Lysova N.V. Improvement of functional subsystems of paper production management based on a coordinating fuzzy controller and cross-correlation meters. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=844> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.002 DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.002 (In Russ).

## Введение

На сегодняшний день много говорится о необходимости импортозамещения. Не является исключением и целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП). Состояние отечественной отрасли характеризуется ресурсо- и энергоемкими технологиями. Более того, высокая конкуренция в отрасли вынуждает компании, фабрики, заводы постоянно повышать эффективность производства и качество конечной продукции с помощью современных систем управления.

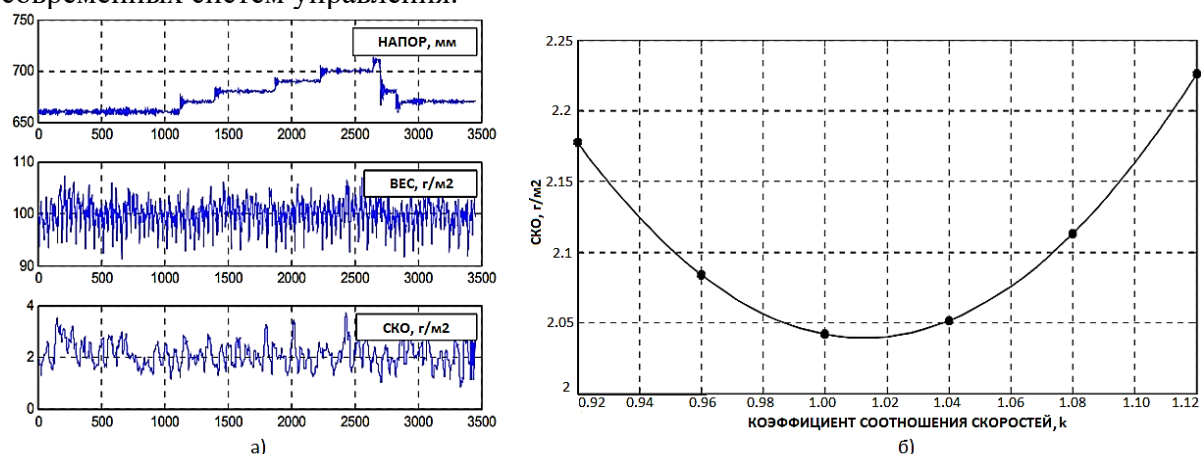


Рисунок 1 – а) экспериментальные и расчетные осциллограммы изменения напора, веса бумажного полотна и его СКО; б) экстремальная зависимость СКО от коэффициента соотношения скоростей бумажной массы и сетки

Figure 1 – a) experimental and calculated waveforms of changes in the pressure, weight of the paper web and its SKR; b) extreme dependence of the SKR on the ratio of the paper mass and mesh velocities

Одним из ключевых показателей качества бумаги и картона является их вес ( $\text{г/м}^2$ ) [1]. На современных бумагоделательных машинах (БДМ) для минимизации дисперсии веса бумаги в продольном направлении используются системы с регуляторами давления в напускном устройстве [2, 3], которые не учитывают экстремальной зависимости между дисперсией веса и скоростью напуска массы на сетку БДМ (Рисунок 1).

### Повышение точности системы управления процессом формирования бумажного полотна

Применение экстремальных регуляторов в системах стабилизации веса бумажного полотна усложняется наличием в объекте управления больших величин временного запаздывания и сильных помех [4]. Для реализации контура экстремального регулирования дисперсии веса предлагается использовать помехозащищенный алгоритм, состоящий из следующих шагов:

- формируем гармонический сигнал, амплитуда которого не нарушает работу объекта, а период в несколько раз больше временного запаздывания;
- модулируем вход экстремальной системы этим сигналом;
- производим фильтрацию выходного сигнала (метод синхронного накопления) и выделяем вторую гармонику;
- определяем направление движения к экстремуму по фазовому сдвигу;
- изменяем входной сигнал до появления в выходном сигнале второй гармоники;
- находим максимум амплитуды второй гармоники [5, 6].

Таким образом, имитационные Simulink-модели систем управления процессом формирования бумажного полотна на основе регулятора давления и экстремального регулятора представлены на Рисунке 2, а их переходные характеристики на Рисунке 3.

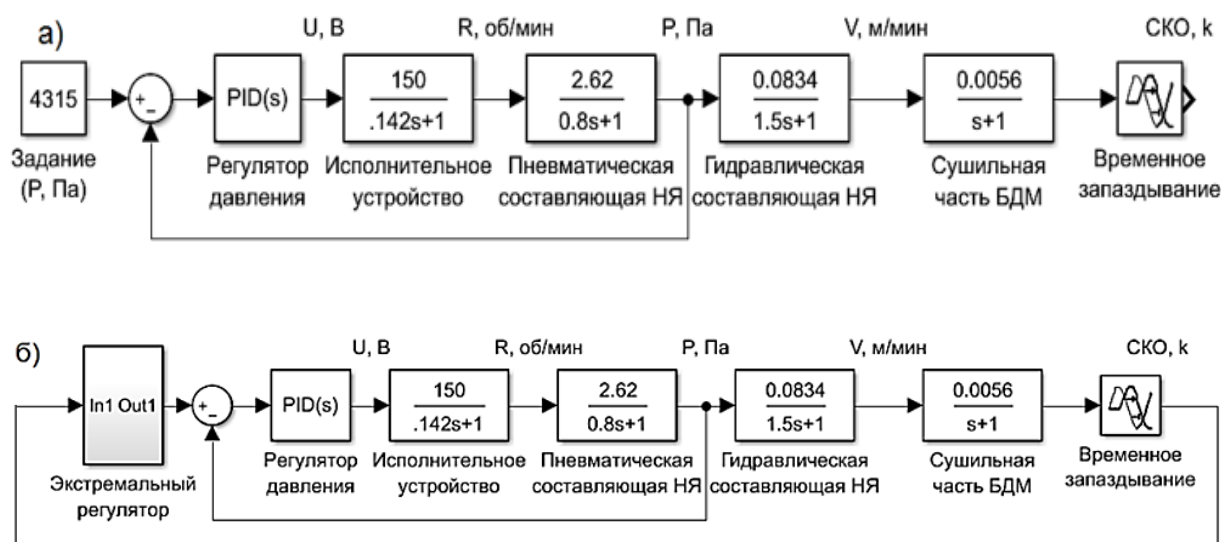


Рисунок 2 – Simulink-модели систем управления с различным сочетанием регуляторов  
 Figure 2 – Simulink models of control systems with different combinations of regulators

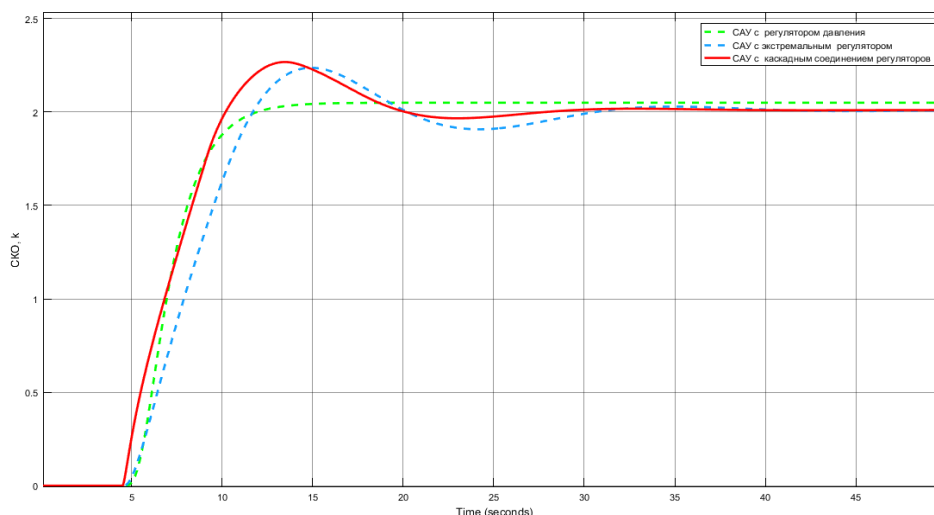


Рисунок 3 – Процесс регулирования дисперсии веса бумажного полотна на различных системах управления

Figure 3 – The process of controlling the dispersion of the paper web weight on various control systems

### Повышение быстродействия системы управления процессом формирования бумажного полотна

Предложенный помехозащищенный алгоритм очень сильно снижает быстродействие автоматизированных систем управления (АСУТП) весом бумаги. Для повышения быстродействия необходимо ввести в систему еще один контур регулирования, который позволит за несколько итераций попасть в область экстремума (Рисунок 4). Речь идет про контур управления с регулятором соотношения скоростей бумажной массы и сетки.

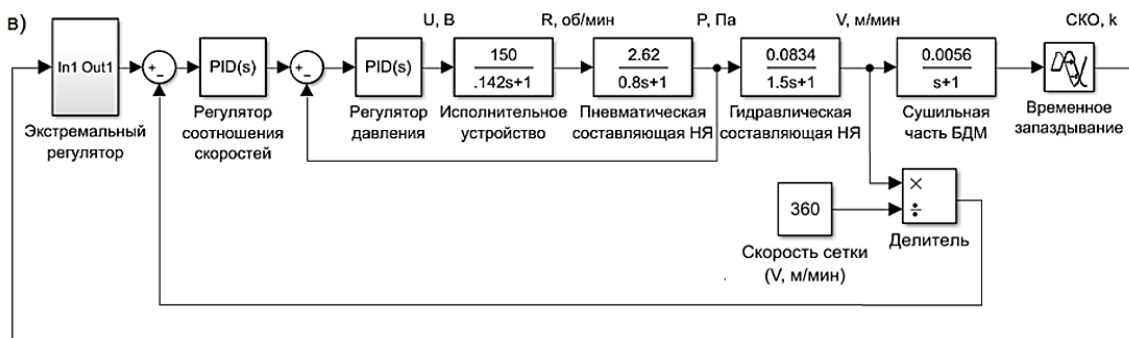


Рисунок 4 – Simulink-модели АСУТП с каскадным соединением регуляторов

Figure 4 – Simulink models of automatic control systems with cascading connection of regulators

Однако предпочтительнее заменить каскадное соединение регуляторов координирующим нечетким регулятором, чтобы избежать их возможной “гонки” [7]. Тогда система будет иметь следующий вид Рисунок 5.

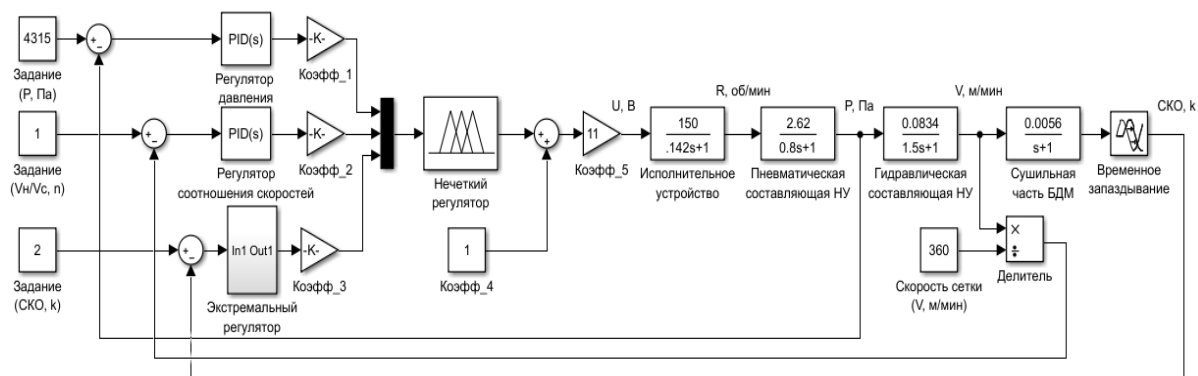


Рисунок 5 – Simulink-модель АСУТП с координирующим нечетким регулятором  
 Figure 5 – Simulink-APCS model with coordinating fuzzy controller

Синтез координирующего нечеткого регулятора проводился с помощью Fuzzy Logic MATLAB в соответствии с алгоритмом:

- формируется база правил работы регулятора;
- определяются его входные/выходные параметры;
- определяются функции принадлежности для входных/выходных параметров регулятора;
- определяется оптимальный тип функции принадлежности;
- на основе метода дефаззификации формируется управляющее напряжение [7, 8].

На Рисунке 6 для сравнения представлены переходные характеристики АСУТП с координирующим нечетким управлением и с каскадным соединением трех независимых регуляторов.

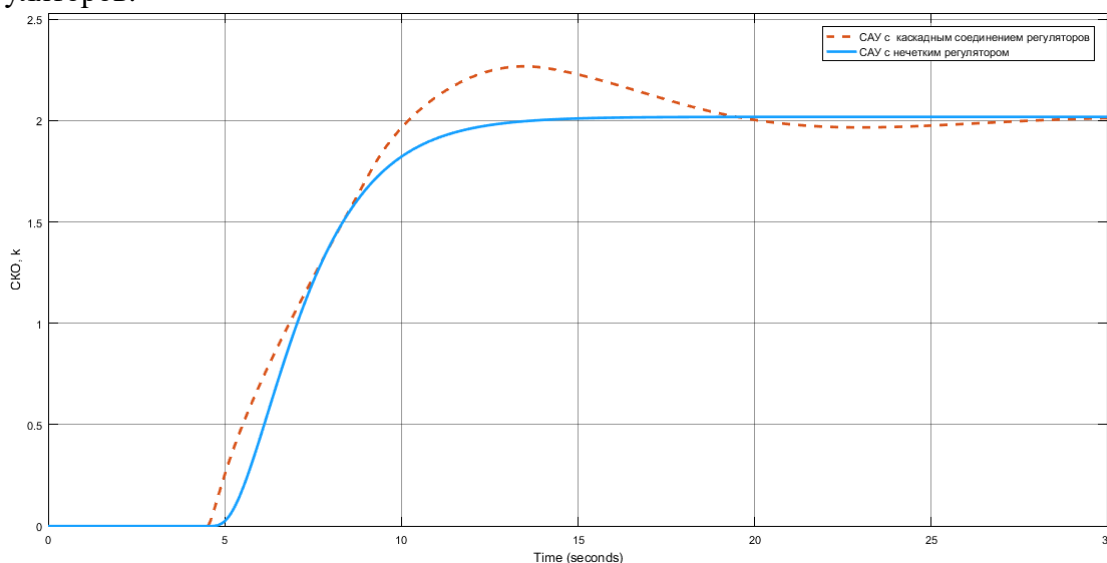
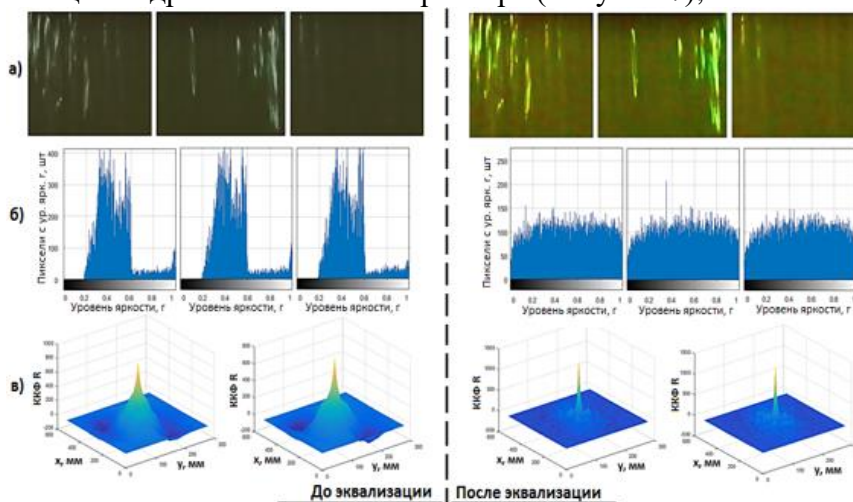


Рисунок 6 – Графики переходных процессов АСУТП  
 Figure 6 – Graphs of transient processes control system

### Кросскорреляционный оптический вычислитель скорости напуска бумажной массы на сеточный стол БДМ

Применение контактных датчиков измерения скорости бумажной массы, так же, как и применение лазерных приборов или радиоизмерителей, невозможно на бумагоделательной машине в силу ряда объективных обстоятельств [9]. Таким образом, для решения поставленной задачи был использован оптический кросскорреляционный вычислитель, работающий по следующему алгоритму:

- запись видеоизображения процесса формирования бумаги, кадрирование видео (сохранение квадратных кадров в формате RAW);
- предварительная обработка кадров;
- поиск оптимального размера расчетной области кадра по медиане кросскорреляционной функции (ККФ), полученной при сравнении кадров с разной размерностью;
- эквализация кадров оптимального размера (Рисунок 7);



Примеры: а) изображений; б) гистограмм значений яркостей; в) кросскорреляционных максимумов до и после эквализации

Рисунок 7 – Эквализация кадра  
Figure 7 – Frame equalization

- расчет перемещения в пикселях максимума ККФ в зависимости от порядкового номера кадра;
  - пересчет расстояния, пройденного объектом исследования, от пикселей к метрам, пересчет показателей времени;
  - вычисление скорости потока бумажной массы по найденным значениям.
- Функциональная схема вычислителя представлена на Рисунке 7.



Рисунок 7 – Функциональная схема вычислителя  
Figure 7 – Functional diagram of the computer

Алгоритм измерения скорости был апробирован в реальных условиях на действующей бумагоделательной машине фабрики ОАО “МАЯК”. Расчетная скорость совпала с данными чашечного анемометра, измеряющего скорость напуска массы до соприкосновения с сеткой, и с данными датчика угловых перемещений (энкодера) [10], измеряющего скорость сетки и, соответственно, скорость массы на ней (Рисунок 8).



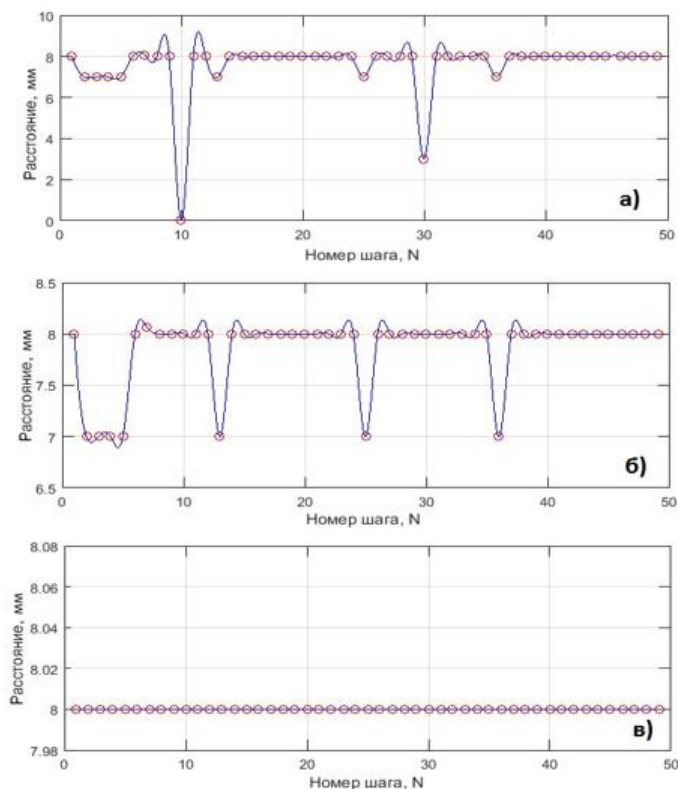


Рисунок 8 – Процедура напуска массы и результирующие графики скорости ее напуска  
а) до эквализации; б) до фильтрации; в) после всех процедур  
Figure 8 – Mass injection procedure and resulting graphs of the mass injection rate a) before  
equalization; b) before filtration; c) after all procedures

### Заклучение

Практическая значимость заключается в разработке современных алгоритмов управления техпроцессами бумажного производства, которые позволили:

- повысить быстродействие системы регулирования и, за счет этого, сократить время выхода на рабочий режим при опытной выработке бумаги и время перехода БДМ с одного рецепта на другой;
- повысить качество конечной продукции (бумаги и картона), снизив дисперсию веса 1 кв. м. полотна;
- минимизировать расходы на производство бумажного полотна за счет снижения процента брака конечной продукции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лысова Н.В., Мясникова Н.В. Регулирование веса бумажного полотна на основе метода экстремальной фильтрации для систем реального времени с помощью покадровой обработки сигнала. *Инженерный вестник Дона*. 2019;5(56). Доступно по: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2019/5882> (дата обращения: 01.10.2020).
2. Тарасов С.М., Азаров В.И., Ковернинский И.Н. Современные тенденции в развитии технологии производства бумаги и картона. *Лесной вестник*. 2003;5(30):89-92.
3. Пронина Е.В. Пути совершенствования конструкций основных узлов бумагоделательных машин. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018;2(46):322-331.

4. Fleisher V.L., Chernaya N.V., Bogdanovich N.I. Reduction of energy consumption of paper and cardboard machines in production of glued paper and cardboard. *Известия ВУЗов. Лесной журнал*. 2019;5(371):188-193 (На англ.).
5. Семенов А.Д., Авдеева О.В., Никиткин А.С. Алгоритм экстремального регулирования на основе рекуррентной процедуры метода наименьших квадратов. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2012;1(21):3-12.
6. Авдеева О.В., Артамонов Д.В., Никулин С.В., Семенов А.Д. Экстремальное управление инерционным объектом с запаздыванием в условиях сильных помех. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2014;3(31):54-64.
7. Revunov M.S., Semenov A.D., Nikulin S.V. Fuzzy extremal regulatory system with multidimensional input. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (ICMTMTE 2019)*. 2020;709 (На англ.).
8. Чернецкая И.В., Чернецкий В.О. Нечеткие регуляторы в системах автоматического регулирования. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2006;2(107):156-159.
9. Ревунов М.С. Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*. 2018;4(26):24-31.
10. Андреев Д.А., Панфилов А.Н., Скоба А.Н. Управление операционными процессами операторов сложных систем. *Инженерный вестник Дона*. 2017;3(47). Доступно по: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4322/> (дата обращения: 02.10.2020).

## REFERENCES

1. Lysova N.V., Mjasnikova N.V. Paper web weight control based on the extreme filtering method for real-time systems using frame-by-frame signal processing. *Engineering journal of Don*. 2019;5(56). Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2019/5882> (In Russ) (accessed: 01.10.2020).
2. Tarasov S.M., Azarov V.I., Koverninskij I.N. Current trends in the development of paper and cardboard production technology. *Forestry Bulletin*. 2003;5(30):89-92. (In Russ)
3. Pronina E.V. Ways to improve the design of the main components of paper machines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2018;2(46):322-331. (In Russ)
4. Fleisher V.L., Chernaya N.V., Bogdanovich N.I. Reduction of energy consumption of paper and cardboard machines in production of glued paper and cardboard. *Izvestiya VUZov. Lesnoj zhurnal*. 2019;5(371):188-193. (In Russ)
5. Semenov A.D., Avdeeva O.V., Nikitkin A.S. The algorithm of extreme regulation based on the recurrent procedure of the least squares method. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki*. 2012;1(21):3-12. (In Russ)
6. Avdeeva O.V., Artamonov D.V., Nikulin S.V., Semenov A.D. Extreme control of an inertial object with a delay in conditions of strong interference. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehnicheskie nauki*. 2014;3(31):54-64. (In Russ)
7. Revunov M.S., Semenov A.D., Nikulin S.V. Fuzzy extremal regulatory system with multidimensional input. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (ICMTMTE 2019)*. 2020;709.



8. СЧерneckaya I.V., СЧерneckij V.O. Fuzzy controllers in automatic control systems. *Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*. 2006;2(107):156-159. (In Russ)
9. Revunov M.S. Improvement of systems of stabilization of parameters of the flow of paper pulp using a cross-correlation algorithm. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2018;4(26):24-31. (In Russ)
10. Andreev D.A., Panfilov A.N., Skoba A.N. Managing the operational processes of operators of complex systems. *Engineering journal of Don*. 2017;3(47). Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2017/4322/> (In Russ) (accessed: 02.10.2020).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ревунов Максим Сергеевич**, инженер АСУТП ОАО «МАЯК», Пенза, Российская Федерация  
e-mail: [revunov\\_rabota@mail.ru](mailto:revunov_rabota@mail.ru)

**Maksim S. Revunov**, engineer of the automated control system of JSC "MAYAK", Penza, Russian Federation

**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