



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И ДИЗАЙНА



ВЫСШАЯ ШКОЛА
ТЕХНОЛОГИИ
И ЭНЕРГЕТИКИ

ISSN 3033-7852

ТЕХНОЛОГИЯ и ЭНЕРГЕТИКА

№02 (02) 2026

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ



«Глубокая интеграция образования и науки с индустрией — ключевое условие для обеспечения технологического суверенитета страны».

П. В. Луканин

8 Исследование влияния композиции волокон на свойства сепараторной бумаги

16 Особенности разработки и изготовления зубчатых колес с помощью стереолитографической печати

59 Определение скорости осаждения механических примесей в предварительном цикле водоподготовки

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА УПРАВЛЕНИЕ МАССОЙ БУМАГИ НА БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЕ

Мария Дмитриевна Анисимова, Валерий Николаевич Суриков

Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Анисимова М. Д., Суриков В. Н., 2026

Автор-корреспондент: М. Д. Анисимова, e-mail: mari.anisimowa2013@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрена возможность снижения амплитуды колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины с помощью перенастройки существующего ПИД-регулятора системы управления массой бумажного полотна. Проведен статистический и спектральный анализ полученных с производства трендов массы и влажности бумажного полотна во время работы и после перехода бумагоделательной машины на другой режим. Изучены характер и диапазон колебаний массы бумажного полотна, выделены основные возмущения и их частота для моделирования работы системы управления. Рассмотрена амплитуда отклонения выходного сигнала моделируемой системы управления от заданного значения. Произведен краткий обзор существующих решений по снижению колебаний интересующего нас показателя, предлагавшихся ранее исследователями. Для подавления амплитуды возмущающих воздействий в статье рассмотрены несколько методов настройки ПИД-регулятора: Moros (1999), Minimum IAE — Pessen (1994), Minimum ISE — Zuang (1992), Minimum ISTES — Zuang (1992), Minimum ISE — Xing et al (2001) и Var der Grinten (1963). По результатам исследований рекомендуется в качестве одного из вариантов использовать метод Minimum ISE — Zuang (1992) для настройки ПИД-регулятора в установившемся режиме работы бумагоделательной машины для снижения амплитуды отклонений массы бумажного полотна при колебаниях параметра в диапазоне частот от 0,0003 до 0,001 Гц.

Ключевые слова: нестационарный случайный процесс, ПИД-регулятор, возмущения, случайный процесс, масса бумаги, управление бумагоделательной машиной

Для цитирования: Анисимова М. Д., Суриков В. Н. Влияние воздействия случайных возмущений на управление массой бумаги на бумагоделательной машине // Технология и энергетика. 2026. № 2 (2). С. 31–36. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_31-36.

EFFECT OF RANDOM DISTURBANCES ON PAPER BASIS WEIGHT CONTROL IN A PAPER MACHINE

Maria Dmitrievna Anisimova, Valery Nikolaevich Surikov

Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: M. D. Anisimova, e-mail: mari.anisimowa2013@yandex.ru

ABSTRACT

The paper discusses the possibility of reducing the amplitude of paper web basis weight fluctuations under steady-state paper machine conditions through retuning of the existing PID controller in the basis weight control system. Statistical and spectral analysis of production basis weight and moisture trends was conducted during operation and after the paper machine changed operating modes. The character and range of fluctuations of the paper web basis weight were studied, and the main disturbances and their frequency were identified for modeling the operation of the control system. The output signal deviation amplitude from the setpoint in the simulated control system is analyzed. A brief review is presented of previously proposed solutions for reducing fluctuations of the indicator in question. The article examines several PID controller tuning methods for suppressing the amplitude of disturbances: Moros (1999), Minimum IAE – Pessen (1994), Minimum ISE – Zuang (1992), Minimum ISTES – Zuang (1992), Minimum ISE – Xing et al (2001)



and Var der Grinten (1963). Based on the findings, the Minimum ISE – Zuang (1992) method is recommended for PID controller tuning during steady-state paper machine operation to reduce paper web basis weight deviation amplitude for parameter fluctuations in the 0.0003–0.001 Hz frequency range.

Keywords: unsteady random process, random process, PID controller, disturbances, random process, paper basis weight, paper machine control

For citation: Anisimova M. D., Surikov V. N. (2026) 'Effect of random disturbances on paper basis weight control in a paper machine', Technology and Energy, vol. 2 no. 2, pp. 31–36. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_2_2_31–36

ВВЕДЕНИЕ

Свойства бумажного полотна определяются составом бумажной массы и точностью управления технологическими параметрами бумагоделательной машины (БДМ) в процессе ее работы. К таким параметрам можно отнести скорость истечения бумажной массы из напорного ящика, давление воздушной подушки в напорном ящике, давление пара в сушильной части БДМ, расход наполнителей, концентрацию разбавленной массы, скорость машины и т. д. Все указанные переменные в идеальном случае должны поддерживаться на постоянном уровне, но на практике их значения колеблются вокруг установившихся средних величин, что приводит к варьированию показателей качества выпускаемой продукции, допустимые значения которых регламентируются нормами действующих стандартов в зависимости от вида вырабатываемой продукции, а бумага с колебаниями, выходящим за пределы норм стандартов, не является кондиционной [1].

Колебания массы бумажного полотна можно разделить на низкочастотные, высокочастотные и случайные. Происхождение длительных периодических возмущений веса бумажного полотна, как правило, обусловлено технологическими факторами. Происхождение высокочастотных колебаний обусловлено вибрацией узлов бумагоделательной машины и динамикой напуска массы на сетку. Случайная составляющая рассматриваемого явления представляет собой множество произвольных факторов, например, колебания гидропланок, возмущения от рядом стоящих машин и т. п. [9].

Обычно возмущения с частотами ниже 0,01 Гц практически устраняются автоматическими контурами управления, пассивными регулирующими устройствами (гидропланки и др.) и т. д.

На многих предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) России основой контуров автоматического регулирования остаются традиционные ПИД-регуляторы, обеспечивающие колебания управляемых параметров в границах, установленных регламентом.

Проблемой снижения колебаний массы бумажного полотна занимались М. С. Ревунов, Н. В. Лысова, С. В. Никулин, Н. В. Байкин и др.

В работах М. С. Ревунова [2; 3] для решения задачи снижения дисперсии массы бумажного полотна рассматривается вариант введения дополнительного контура регулирования соотношения скоростей напуска бумажной массы и сетки БДМ.

В работах Н. В. Лысовой [4, 5, 6] приведены обоснования применения алгоритма обработки информации на основе экстремальной фильтрации. Рассматривались алгоритмы управления с использованием методов оптимального, дробного и цифрового регулирования [4,5,6].

В работе С. В. Никулина [7] на основе подсистем регулирования массы бумажного полотна с использованием предиктора Смита была предложена комбинированная экстремальная система управления режимом работы БДМ, система управления положением верхней планки напорного ящика с использованием нейросети и экстремальная система определения минимума среднеквадратичного отклонения массы с помехозащищенным алгоритмом.

В патенте [8] Н. В. Байкина предлагаемый способ регулирования массы бумажного полотна заключается во введении корректировки открытия массовой задвижки при отклонении параметра концентрации перед напорным ящиком.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Целью данного исследования является рассмотрение возможности снижения амплитуды колебаний массы

бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины с помощью перенастройки существующего ПИД-регулятора системы управления массой бумажного полотна. Для достижения



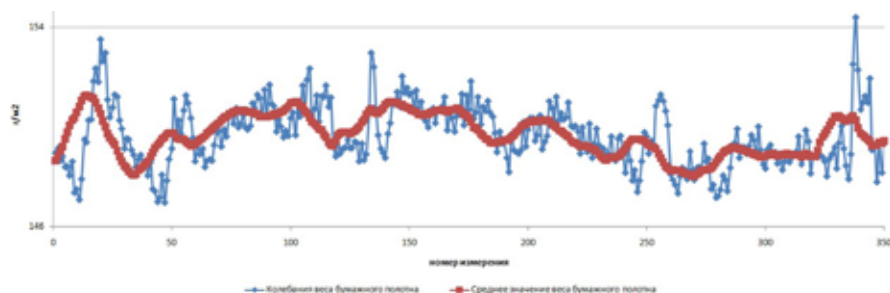


Рисунок 1. Статистический анализ колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины
Figure 1. Statistical analysis of paper web basis weight fluctuations in steady-state paper machine operation



Рисунок 2. Статистический анализ колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины
Figure 2. Statistical analysis of paper web basis weight fluctuations in steady-state paper machine operation

поставленной цели необходимо определить характер и диапазон колебаний массы бумажного полотна, выделить основное возмущение и его частоту для моделирования работы системы управления и рассмотреть амплитуду отклонения выходного сигнала моделируемой системы управления от заданного значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1 и 2 представлены результаты статистического анализа колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины, полученных с производства, дискретностью равной 1 минуте. Из рисунков видно, что колебания массы бумажного полотна носят случайный характер.

Согласно статистической обработке трендов данных по изменению массы бумажного полотна, диапазон изменения среднего значения массы бумажного полотна за смену составляет от 140,15 до 151,26 г/м²; диапазон изменения дисперсии массы бумажного полотна за смену составляет от 0,082 до 4,83. Таким образом, характеристики колебаний массы бумажного полотна изменяются со временем, что указывает на нестационарный случайный процесс. При этом временные масштабы дрейфа статистических характеристик (около 50 минут)

существенно превышают длительность переходного процесса системы регулирования (около 20 минут). В связи с этим для упрощения последующих расчётов допустимо принять процесс квазистационарным на интервалах, меньших времени дрейфа характеристик.

Для параметрического синтеза системы управления, как правило, выбирается одно основное возмущающее воздействие. Для чего проводят корреляционный анализ возмущений с регулируемым параметром. Для контура регулирования массы бумажного полотна таким возмущением является влажность бумажного полотна [10].

На рисунке 3 представлен спектральный анализ колебаний массы бумажного полотна при переходе на другой режим работы бумагоделательной машины. Спектральный анализ произведен с помощью быстрого преобразования Фурье в программной среде Matlab.

На рисунке 4 представлен спектральный анализ колебаний влажности бумажного полотна при переходе на другой режим работы бумагоделательной машины.

Согласно рисункам 3 и 4, большинство частот колебаний массы бумаги совпадают с частотами отклонений влажности бумажного полотна.

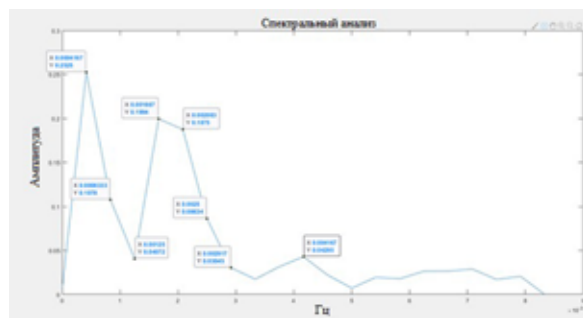


Рисунок 4. Спектральный анализ влажности бумажного полотна при переходе на другой режим работы бумагоделательной машины

Figure 4. Spectral analysis of paper web moisture content during the transition to a different operating mode of a paper machine

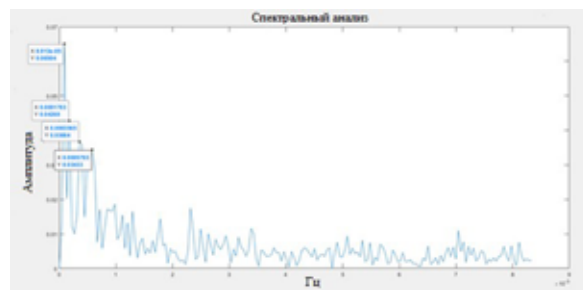


Рисунок 6. Спектральный анализ влажности бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины

Figure 6. Spectral analysis of paper web moisture content fluctuations in steady-state paper machine operation

Краткосрочные колебания массы бумажного полотна возникают в диапазоне 0,4–40 Гц, они обычно связаны с колебаниями давления в напорном ящике или на более низких частотах с изменениями консистенции.

Периодические колебания в диапазоне 10–25 Гц обычно вызваны колебаниями давления от лопаток сортировок и асимметричных крыльчаток насосов. Периодические и случайные колебания давления могут возникать также в напорном ящике или в связанных с ним трубопроводах из-за механических вибраций ближайшего оборудования.

Нестабильный поток в плохо спроектированных трубопроводах может вызывать периодические колебания перепада давления, обычно на частотах 1–10 Гц. Дополнительное усиление колебаний массы бумажного полотна вызывается возникновением волн в бумажной массе на сетках плоскосеточных БДМ. Этот эффект может быть максимальным на частоте из диапазона 4–40 Гц, которая зависит от скорости машины и длины сетки [1].

При сравнении рисунков 5 и 6 видно, что частоты колебаний влажности и массы бумажного полотна совпадают лишь частично, т. е. в контуре присутствует источник возмущения, не связанный с формированием свойства влажности бумажного полотна.

Таблица 1. Сравнение отношений амплитуд колебаний выходного сигнала к исходному при различных настройках ПИД-регулятора
Table 1. Comparison of output signal fluctuation amplitude ratios under different PID tuning parameters

	Moros (1999)	Minimum IAE — Pessen (1994)	Minimum ISE — Zuang (1992)	Minimum ISTES — Zuang (1992)	Minimum ISE — Xing et al (2001)	Var der Grinten (1963)
Отношение амплитуд вых. к исх.	0,77	11,6	0,4	0,45	7,6	1,8

Согласно спектральному анализу колебаний массы бумажного полотна, в установившемся режиме работы БДМ наибольшее отклонение массы бумажного полотна от заданного значения вносится сверхнизкими частотами.

Для подавления амплитуды возмущающих воздействий в статье рассмотрены несколько методов настройки ПИД-регулятора: Moros (1999), Minimum IAE — Pessen (1994), Minimum ISE — Zuang (1992), Minimum ISTES — Zuang (1992), Minimum ISE — Xing et al (2001) и Var der Grinten (1963) [11]. В среде Matlab Simulink была построена модель системы управления, состоящая из ПИД-регулятора с идеальной структурой и объекта управления в виде апериодического звена первого порядка с равным 0,25 соотношением τ/T . Возмущающее воздействие подавалось на выход объекта управления в виде синусоиды с параметрами согласно спектральному анализу массы бумажного полотна. Методы настройки регулятора выбирались согласно соотношению τ/T объекта управления и оптимизации интегрального критерия качества, который широко применяется для оценки качества переходных процессов систем управления с случайной составляющей. Для сравнения также были выбраны настройки Moros (1999) и Var der Grinten (1963). В таблице представлены результаты моделирования системы управления с различными настройками и оценка степени их подавления возмущающих воздействий. В строчке таблицы указано среднее отношение амплитуд колебаний массы бумажного полотна на выходе моделируемой системы к исходным значениям амплитуды колебаний, полученных с производства по нескольким частотам.

Из таблицы 1 видно, что наименьшим коэффициентом усиления обладает настройка ПИД-регулятора Minimum ISE — Zuang (1992), а наибольшим Minimum IAE — Pessen (1994). Рекомендуется в качестве одного из вариантов использовать метод Minimum ISE — Zuang (1992) для настройки ПИД-регулятора в установившемся режиме работы БДМ для снижения амплитуды отклонений массы бумажного полотна при колебаниях параметра в диапазоне частот от 0,0003 до 0,001 Гц. Таким образом, существует возможность снижения амплитуды колебаний массы бумажного полотна в установившемся режиме работы бумагоделательной машины

с помощью перенастройки существующего ПИД-регулятора системы управления массы бумажного полотна и существует возможность использования различных настроек при устоявшемся режиме и после перехода БДМ на другой режим работы.

Список литературы

1. Parker J. R., Epton J. B. A. The analysis of disturbances affecting paper machines // The role of fundamental research in paper-making: Trans. of the VIIth Fund. Res. Symp. Cambridge, 1981. Cambridge, 2018. Pp. 785–807. DOI: 10.15376/frc.1981.2.785.
2. Ревунов М. С., Ревунов Д. С., Семенов А. Д. Повышение эффективности автоматизированной системы управления технологическим процессом регулирования массы бумажного полотна // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 1(43). С. 17–23. DOI: 10.21685/2307-5538-2023-1-2. EDN: IZVTVM.
3. Ревунов М. С. Совершенствование систем стабилизации параметров потока бумажной массы с использованием кросскорреляционного алгоритма // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 4(26). С. 24–31. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-4-4.
4. Лысова Н. В., Никулин С. В., Семенов А. Д. Моделирование системы экстремального регулирования дисперсии веса бумажного полотна // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017): Междунар. науч.-техн. конф., 14–16 марта 2017 г.: сб. науч. тр. 2017. С. 932–935.
5. Лысова Н. В., Мясникова Н. В. Регулирование веса бумажного полотна на основе метода экстремальной фильтрации для систем реального времени с помощью кадровой обработки сигнала // Инженерный вестник Дона. 2019. № 5. С. 31–39.
6. Лысова Н. В. Повышение быстродействия алгоритмов обработки информации и управления автоматизированной системы формирования бумажного полотна: дис. ... канд. техн. наук: 2.3.1. Пенза, 2022. 149 с.
7. Никулин С. В. Совершенствование функциональных подсистем АСУТП бумажного производства на основе экстремального, нейросетевого и предиктивного управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Пенза, 2016. 160 с.
8. Пат. 2735402 Российская Федерация, МПК D21F 1/06 (2006.01), D21F 1/08 (2006.01), D21F 7/00 (2006.01). Способ регулирования веса 1 м² бумажного полотна / Байкин Н. В.,



- Салмов Е. Н., Байкин С. Н.; заявл. 04.02.2020; опубл. 30.10.2020. 9 с.
9. Куров В. С., Тихонов Ю. А. Гидродинамика процессов массоподачи на бумагоделательную машину. Санкт-Петербург, 2010. 264 с.
 10. Анисимова М. Д., Суриков В. Н. О повышении точности управления весом бумажного полотна в условиях возмущений // Инновационные решения в развитии целлюлозно-бумажной отрасли и лесопромышленного комплекса: материалы Всерос. отраслевой науч.-практ. конф. 2024. С. 135–143.
 11. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. London, 2009.

References

1. Parker J. R. and Epton J. B. A. (2018) 'The analysis of disturbances affecting paper machines', in *The role of fundamental research in paper-making: Transactions of the VIIth Fundamental Research Symposium, Cambridge, 1981. Cambridge: FRC, pp. 785–807. doi: 10.15376/frc.1981.2.785.
2. Revunov M. S., Revunov D. S. and Semenov A. D. (2023) 'Improving the efficiency of the automated process control system for regulating paper web mass', *Measurement. Monitoring. Control*, vol. 43, no. 1, pp. 17–23. DOI: 10.21685/2307-5538-2023-1-2. EDN: IZVTVM.
3. Revunov M. S. (2018) 'Improving the stabilisation systems of paper stock flow parameters using a cross-correlation algorithm', *Measurement. Monitoring. Control*, vol. 26, no. 4, pp. 24–31. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-4-4.
4. Lysova N. V., Nikulin S. V. and Semenov A. D. (2017) 'Modeling an extreme control system for paper web weight dispersion', in *Promising information technologies (PIT 2017): International Scientific and Technical Conference*, 14–16 March 2017: collection of scientific papers. Samara, pp. 932–935.
5. Lysova N. V. and Myasnikova N. V. (2019) 'Paper web weight control based on the extreme filtering method for real-time systems using frame signal processing', *Engineering Journal of Don*, no. 5, pp. 31–39.
6. Lysova N. V. (2022) Improving the performance of information processing and control algorithms for an automated paper web forming system. PhD thesis. Penza State University.
7. Nikulin S. V. (2016) Improving the functional subsystems of the automatic process control system for paper production based on extreme, neural network and predictive control. PhD thesis. Penza State University.
8. Baykin N. V., Salmov E. N. and Baykin S. N. (2020) 'Method for controlling the weight per 1 m² of a paper web', *Russian Patent 2735402*. Filed 4 February 2020, issued 30 October 2020.
9. Kurov V. S. and Tikhonov Yu. A. (2010) Hydrodynamics of mass supply processes to a paper machine. Saint Petersburg: Polytechnic University Publishing House.
10. Anisimova M. D. and Surikov V. N. (2024) 'On improving the accuracy of paper web weight control under disturbance conditions', in *Innovative solutions in the development of the pulp and paper industry and timber industry complex: Proceedings of the All-Russian industry scientific and practical conference*. Saint Petersburg: VShTE SPbGUPTD, pp. 135–143.
11. O'Dwyer A. (2009) Handbook of PI and PID controller tuning rules. London: Imperial College Press.

Информация об авторах

Анисимова Мария Дмитриевна, ассистент кафедры информационно-измерительных технологий и систем управления и кафедры автоматизации технологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4, 198095; SPIN-код: 9714–2276; Author ID: 1320819; e-mail: mari.anisimowa2013@yandex.ru.

Суриков Валерий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4, 198095; SPIN-код: 3077–4855; Author ID: 958855; e-mail: atpp_drugova@mail.ru.

Information about the authors

Anisimova Maria Dmitrievna, Assistant at the Department of Information and Measurement Technologies and Control Systems and at the Department of Automation of Technological Processes and Productions, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, 198095; SPIN-code: 9714–2276; Author ID: 1320819; e-mail: mari.anisimowa2013@yandex.ru.

Surikov Valery Nikolaevich, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Technological Processes and Productions, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 4 Ivana Chernykh St., Saint Petersburg, 198095; SPIN-code: 3077–4855; Author ID: 958855; e-mail: atpp_drugova@mail.ru.

