

Управление технологическими процессами производства бумаги по ширине полотна с использованием интеллектуальных технологий

М.О. Слюта

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна Высшая школа технологии и энергетики

Аннотация: Обеспечение высоких показателей качества бумажной продукции, изготавливаемой на современных широкоформатных бумагоделательных машинах, требует применения систем точного регулирования основных параметров: вес 1м^2 , влажность и толщина. Технологическая сложность данной задачи обусловлена необходимостью одновременного управления многочисленными исполнительными устройствами по ширине бумажного полотна. Представленное исследование демонстрирует инновационную систему управления основными параметрами качества бумаги в поперечном направлении, построенную с применением нейросетевых технологий. Разработанное решение обеспечивает высокую точность регулирования параметрами в сравнении с традиционными методами управления, что подтверждается результатами экспериментальной проверки в производственных условиях.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажное производство; бумагоделательная машина; управление по ширине полотна; нейронный регулятор; взаимосвязанное управление; объект управления с распределенными параметрами, исполнительный механизм, система управления, бумажное полотно, математическая модель, толщина бумажного полотна, влажность бумажного полотна, вес 1м^2 бумажного полотна.

Целлюлозно-бумажная индустрия представляет собой стратегически важный сегмент промышленного комплекса Российской Федерации, обеспечивающий производство широкого спектра продукции, востребованной в различных отраслях экономики. Конкурентоспособность предприятий данного сектора в значительной степени определяется качеством выпускаемой продукции, которое, в свою очередь, зависит от стабильности технологических параметров производственного процесса.

Современные бумагоделательные машины характеризуются высокой производительностью и значительной шириной формуемого полотна, что создает существенные трудности в обеспечении равномерности качественных показателей по всей ширине бумажного полотна. Неравномерность распределения таких параметров как масса одного квадратного метра, влажность и толщина приводит к снижению сортности

продукции, увеличению количества обрывов полотна и, как следствие, к экономическим потерям.

Традиционные системы управления, базирующиеся на классических математических моделях, демонстрируют недостаточную эффективность в условиях динамически изменяющихся характеристик оборудования и сырья. Это обусловлено сложностью формализации многофакторных взаимосвязей между управляющими воздействиями и результирующими показателями качества, а также необходимостью постоянной корректировки параметров моделей.

В данной статье представлена система управления параметрами качества бумаги по ширине полотна с применением методов искусственного интеллекта.

В процессе комплексного изучения регулирования качественных характеристик бумажного полотна в поперечном направлении был осуществлен всесторонний мониторинг функционирующих систем автоматизации от различных производителей, интегрированных в действующие бумагоделательные комплексы. Проведенная диагностика выявила ряд концептуальных ограничений, присущих современным системам управления:

1. Недостаточная динамическая адаптивность к изменению производственных параметров, что существенно снижает эффективность регулирования при изменении технологических режимов.

2. Отсутствие комплексного учета многофакторных корреляций между исполнительными механизмами и регулируемыми параметрами качества бумажного полотна.

3. Значительная временная задержка между фиксацией параметрических отклонений и введении корректирующих воздействий, что

критически важно при высокоскоростном режиме функционирования бумагоделательных машин.

4. Необходимость в трудоемкой калибровке и регулярном техническом сопровождении высококвалифицированными специалистами [1-3].

В качестве объекта исследования была проанализирована система управления параметрами качества бумаги в поперечном направлении на бумагоделательной машине со стандартизированной конфигурацией исполнительных элементов (рис.1).

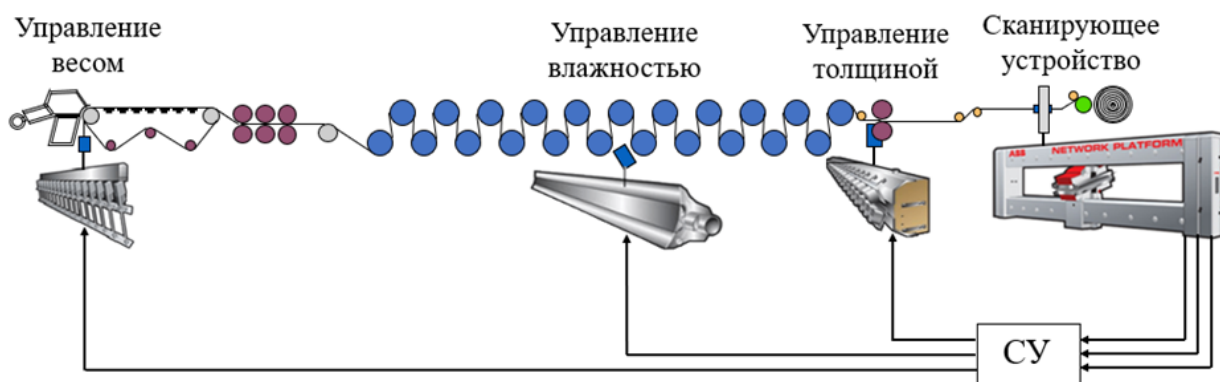


Рис. 1. Общая структура системы управления показателями качества бумаги по ширине полотна

Функционал системы поперечного регулирования Cross Direction control (CD-control) интегрирует в себя комплексное управление массой 1 м^2 , влажности и толщины бумажного полотна.

Механизм регулирования основного веса осуществляет изменение профиля верхней губы напорного устройства, сконструированной из металлической балки, сегментированной на 64 зоны.

Принцип функционирования системы регулирования влагосодержания базируется на дифференцированном увлажнении каждой зоны бумажного полотна путем вариации расхода жидкости и давления воздуха в 85 аэрогидравлических форсунках увлажнительного устройства.

Толщина бумаги регулируется посредством термического воздействия на каландровый вал в 114 дискретных зонах с помощью электрических нагревательных элементов.

Ключевым компонентом системы CD-control является сканирующее устройство, осуществляющее перпендикулярное движение относительно бумажного полотна и выполняющее замеры параметров качества [4,5].

На основе эмпирических данных, полученных в производственных условиях, был проведен математический анализ с использованием программных комплексов MATLAB и Desmos Studio, который позволил сформировать математическую модель функционирования системы регулирования качественных показателей бумажного полотна в поперечном направлении:

$$\Delta y_l = \begin{cases} A_y e^{-\alpha|l-m|} \cos \omega(l-m) * \Delta X_n & \text{при } -c \leq l \leq c \\ 0 & \text{при } c \leq l \leq -c, \end{cases} \quad (1)$$

где Δy – изменение показателей качества бумаги; ΔX – изменение положения пары регулирующих винтов; n – координата положения регулирующих вентилей по ширине машины: $n = 1, 2, 3 \dots$; l – координата параметра относительно правого винта рассматриваемой пары: $l = \dots -2, -1, 0, +1, +2$; m – величина сдвига максимального значения параметра; A – амплитуда; ω – частота; α – коэффициент затухания; c – зона влияния [6].

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие формулы моделей по семи контурам управления:

$$\Delta y_l = 0,09 e^{-0,035|2l-1*0,1*(n-20)|} \cos \left(0,04 * (2l - 1 * 0,1 * (n - 20)) \right) * \left(\frac{1}{1,5} \right) * 0,1 \quad (2)$$

$$\Delta y_l = 0,38 e^{-0,04|2l-1*0,1*(n-20)|} \cos \left(0,01 * (2l - 1 * 0,1 * (n - 20)) \right) * \left(\frac{1}{1,5} \right) * 0,1 \quad (3)$$

$$\Delta y_l = 0,38 e^{-0,04|2l-1*0,1*(n-20)|} \cos \left(0,01 * (2l - 1 * 0,1 * (n - 20)) \right) * \left(\frac{1}{1,5} \right) * 0,1 \quad (4)$$

$$\Delta y_l = 0,45e^{-0,3|2l-1*0,1*(n-20)|} \cos\left(0,01 * (2l - 1 * 0,1 * (n - 20))\right) * \left(\frac{1}{1,5}\right) * 0,1 \quad (5)$$

$$\Delta y_l = 2,77e^{-3|2l-1*0,1*(n-20)|} \cos\left(0,5 * (2l - 1 * 0,1 * (n - 20))\right) * \left(\frac{1}{1,5}\right) * 0,1 \quad (6)$$

$$\Delta y_l = 0,0739e^{-1,3|2l-1*0,1*(n-20)|} \cos\left(1,1 * (2l - 1 * 0,1 * (n - 20))\right) * \left(\frac{1}{1,5}\right) * 0,1 \quad (7)$$

$$\Delta y_l = 0,135e^{-0,5|2l-1*0,1*(n-20)|} \cos\left(0,01 * (2l - 1 * 0,1 * (n - 20))\right) * \left(\frac{1}{1,5}\right) * 0,1 \quad (8)$$

В рамках исследования была разработана система управления бумагоделательной машины, состоящая из семи нейронных регуляторов.

Нейронные регуляторы написаны в программной среде Neural Works Professional II/PLUS. Структура нейронных регуляторов представляет собой трехслойную сеть, для обучения был использован алгоритм Backpropagation [7]. Структура и график обучения одного из нейронных регуляторов представлен на рис. 2.

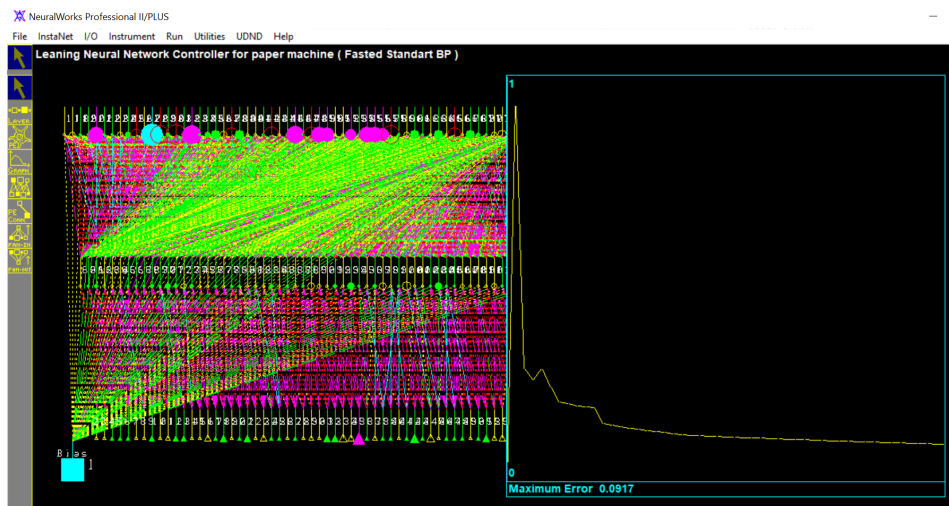


Рис.2. Топология и график обучения нейронного регулятора в программной среде Neural Works Professional II PLUS

Разработанная система управления была проверена с помощью имитационного моделирования. Представленные графики на рис. 3 демонстрируют сравнительный анализ параметров качества по ширине

бумажного полотна до и после применения разработанной системы управления.

На левой части графиков отображены исходные значения контролируемых параметров, где регулирование происходит за счет традиционной системы управления.

Правая часть графиков иллюстрирует динамику изменения качественных показателей в результате функционирования системы управления. Визуальное сопоставление позволяет провести количественную и качественную оценку достигнутых улучшений по каждому из контролируемых параметров.

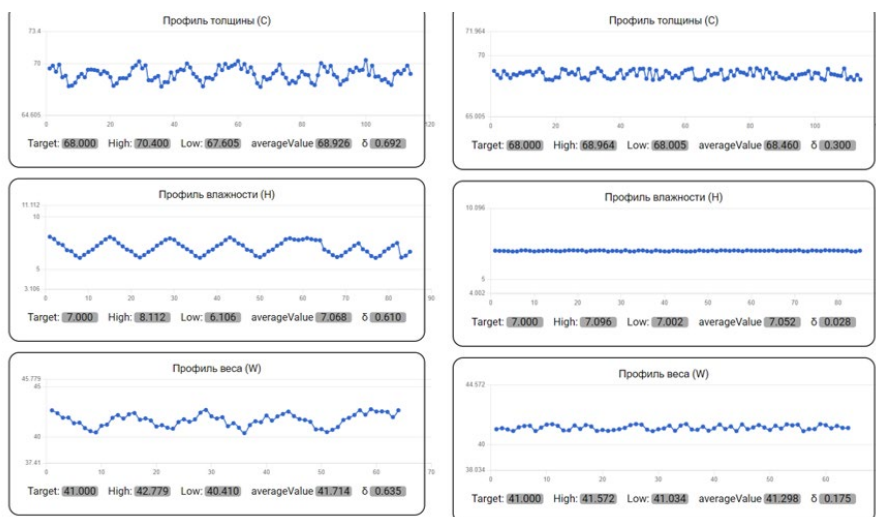


Рис. 3. – Графики изменения параметров качества бумаги по ширине полотна

Полученные результаты свидетельствуют о значительном потенциале применения интеллектуальных технологий для совершенствования процессов управления в целлюлозно-бумажной промышленности. Разработанный программно-аппаратный комплекс создает технологическую основу для повышения качества бумажной продукции, снижения количества брака и оптимизации использования сырьевых и энергетических ресурсов [8-10].

Дальнейшие исследования в данном направлении могут быть сосредоточены на расширении функциональных возможностей системы управления и интеграции с другими производственными системами предприятия.

Литература

1. Зорин И.Ф., Петров В.П., Рогольская С.А. Управление процессами целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесная промышленность, 1981. 272 с.
2. Ковалев В.З, Годовников Е.А., Хусаинов Э.И., Архипова О.В., Армян Е.В., Ахмедов И.А. О точности полиномиальных моделей погружных электродвигателей в составе АСУТП // Инженерный вестник Дона. 2025. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10281
3. Журавлев А.С., Прокофьев Г.В., Климов А.С., Звегинцева А.П. Совершенствование автоматизированной системы управления нестандартными процессами дозирования реагентов гальванического производства // Инженерный вестник Дона. 2025. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/210
4. Бахтин А.В. Развитие системы управления показателями качества бумажного полотна на базе нейросетевых технологий: дис. канд. техн. наук: 05.13.07. СПб, 2000. 154 с.
5. Фляте Д.М. Свойства бумаги. Краснодар: Лань, 2012. 384 с.
6. Жукова Ю.С. Анализ колебаний веса и влажности бумажного полотна на быстроходных бумагоделательных машинах // Материалы второй научно-технической конференции по автоматизации ЦБП. Ленинград, 1970. С. 87-92.
7. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. М: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

8. Duncan S.R., Corsadden K.W. Mini-max control of cross-directional variations on a paper machine // IEE Proc. control theory. 1998. Vol.145. №2. С. 189-195.
9. Heath W.P. Orthogonal Functions for Cross-Directional Control of Web Forming Processes // Automatica. 1996. №32. С. 183-198.
10. Бахтин А.В., Слюта М. О. Разработка и анализ математической модели для автоматической системы управления цветовыми характеристиками печатной бумаги // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77, № 1. С. 35-38.

References

1. Zorin I.F., Petrov V.P., Rogul'skaja S.A. Upravlenie processami celljulozno-bumazhnogo proizvodstva [Pulp and paper production process management]. M.: Lesnaja promyshlennost', 1981. 272 p.
2. Kovalev V.Z., Godovnikov E.A., Husainov Je.I., Arhipova O.V., Armjan E.V., Ahmedov I.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10281
3. Zhuravlev A.S., Prokof'ev G.V., Klimov A.S., Zveginceva A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/issue/210
4. Bahtin A.V. Razvitie sistemy upravlenija pokazateljami kachestva bumazhnogo polotna na baze nejrosetevyh tehnologij [Development of a paper web quality indicator management system based on neural network technologies]: dis. kand. tehn. nauk: 05.13.07. SPb, 2000. 154 p.
5. Fljate D.M. Svojstva bumagi [Paper properties]. Krasnodar: Lan', 2012. 384 p.
6. Zhukova Ju.S. Materialy vtoroj nauchno-tehnicheskoy konferencii po avtomatizacii CBP. Leningrad: 1970. pp. 87-92.

7. Hajkin Sajmon. Nejronnye seti [Neural networks]: polnyj kurs, 2-e izdanie: Per. s angl. M: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2006. 1104 p.
8. Duncan S.R., Corsadden K.W. Mini-max control of cross-directional variations on a paper machine. IEE Proc. control theory. 1998. Vol.145. №2. pp. 189-195.
9. Heath W.P. Orthogonal Functions for Cross-Directional Control of Web Forming Processes. Automatica. 1996. №32. pp. 183-198.
10. Bahtin A.V., Slyuta M. O. Avtomatizacija. Sovremennye tehnologii. 2023. T. 77, № 1. pp. 35-38.

Дата поступления: 30.06.2025

Дата публикации: 25.08.2025