

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БУМАЖНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

AUTOMATION OF PAPER MANAGEMENT SYSTEM WITH THE USE OF EXTREMUM-SEEKING COMBINED CONTROL METHOD

**O. Sokolova
S. Nikulin
A. Semenov**

Summary. The use of a noise-immune algorithm for extreme control of an inertial object is considered, based on combining synchronous accumulation and synchronous detection methods with the subsequent search for a maximum of the amplitude of the second harmonic of the filtered signal, aimed at reducing the root-mean-square deviation of the mass of a square meter of paper web. It was proposed to stabilize the change in productivity and the coordinate of the fall of the paper pulp to the mesh, which made it possible to increase the efficiency of paper production.

Keywords: Paper production, extremum-seeking regulator, automation, synchronous accumulation, synchronous detection.

Соколова Ольга Викторовна

К.т.н., доцент, Пензенский государственный университет
rasuma@mail.ru

Никулин Сергей Васильевич

К.т.н., ООО «МАЯКТРАНСЭНЕРГО»

Семенов Анатолий Дмитриевич

Д.т.н., профессор, Пензенский государственный университет

Аннотация. Рассмотрено использование помехоустойчивого алгоритма экстремального управления инерционным объектом, основанный на совмещении методов синхронного накопления и синхронного детектирования с последующим поиском максимума амплитуды второй гармоники отфильтрованного сигнала, направленный на снижение среднеквадратического отклонения массы квадратного метра бумажного полотна. Предложено стабилизировать изменение производительности и координату падения струи бумажной массы на сетку, что позволило повысить эффективность бумажного производства.

Ключевые слова. Бумажное производство, экстремальный регулятор, автоматизация, синхронное накопление, синхронное детектирование.

В настоящее время целлюлозно-бумажная промышленность является одной из ведущих динамично развивающихся отраслей в нашей стране. Задача дальнейшего развития этой отрасли промышленности связана с повышением качества готовой продукции при рациональном использовании сырьевых, топливно-энергетических и других материальных ресурсов. Наиболее из перспективных направлений развития современных средств автоматизации является совершенствование подсистем АСУТП бумажным производством [1].

В ходе проведения эксперимента была получена экстремальная зависимость между напором напускного устройства и среднеквадратичным отклонением веса, представленным на рис. 1. Полученная зависимость подтверждает экстремальное соотношение между соотношением скоростей массы и сетки бумагоделательной машины (БДМ) и неравномерностью просвета приведенную в [2].

Полученная экспериментальная зависимость СКО веса бумажного полотна от напора бумажной массы позволяет сформулировать задачу экстремального комбинированного регулирования неравномерности

просвета бумажного полотна в следующей постановке: реализовать систему стабилизации веса бумажного полотна и экстремальное регулирование его СКО по текущим измеренным значениям напора бумажной массы и веса бумажного полотна на выходе БДМ.

Анализ экстремальной зависимости среднеквадратичного отклонения веса бумажного полотна от напора напускного устройства позволяет утверждать, что использование традиционных методов поиска экстремума используемых в экстремальных системах для рассматриваемого случая невозможно из-за высокого соотношения сигнал-шум.

Экстремальное управление инерционными объектами с запаздыванием, работающими в условиях сильных помех, основанное на традиционных методах оптимальной фильтрации [3], стохастической аппроксимации [4], методах теории статистических решений и динамического программирования (дуального управления) [5] и требует определенных ограничений на характеристики объекта и действующих на него возмущений.

В связи с этим на первый план выступает задача эффективного выделения полезного сигнала на фоне силь-

ных помех, а задача экстремального управления отодвигается на второй план.

Одним из эффективных методов фильтрации полезного сигнала является метод накопления (усреднения) [6]. При использовании этого метода наибольший эффект достигается в том случае, если полезный сигнал является гармоническим сигналом с известным периодом. Частота этого сигнала должна находиться в полосе пропускания системы и для повышения быстродействия должна приближаться к её верхней границе. Тогда его эффективное выделение достигается использованием либо корреляционного метода [6], либо метода синхронного накопления [6].

Наиболее предпочтительным представляется использование метода синхронного накопления как более простого в реализации и менее требовательного к форме входного и выходного сигналов экстремальной системы [7].

Использование метода синхронного накопления предопределяет применение методов периодического поискового сигнала для поиска экстремума. В том случае, если временное запаздывание в экстремальном объекте фиксированное, для поиска экстремума можно воспользоваться методом синхронного детектирования предварительно, с учётом запаздывания, синхронизируя фазы опорного и выходного сигналов экстремальной системы с помощью фазовращателя. В противном случае, при изменяющемся временном запаздывании, требуется использование специальных методов поиска экстремума.

Будем полагать, что объект находится в окрестностях экстремума. При значительном удалении от него переход в окрестность точки экстремума можно осуществить, совмещая методы синхронного накопления и детектирования, выбирая период опорного сигнала в несколько раз больше времени запаздывания.

При нахождении в области экстремума, в силу чётности экстремальной характеристики, в выходном сигнале экстремального объекта, вход которого модулируется гармоническим сигналом, будут появляться чётные гармоники. Тогда экстремальное значение амплитуды второй гармоники будет свидетельствовать о нахождении системы в точке экстремума. Временное запаздывание в этом случае не будет влиять на точность определения экстремума. Кроме того, можно увеличить частоту гармонического сигнала на входе экстремального объекта, выбирая её, как уже отмечалось, около верхней границы полосы пропускания инерционного объекта.

На основании вышеизложенного предлагается следующий помехозащищённый алгоритм поиска экстремума инерционного объекта с запаздыванием.

1. Формируют гармонический сигнал, частота которого выбирается в несколько раз больше временного запаздывания в объекте, а амплитуда, не нарушает его работу.

2. Модулируют вход экстремальной системы этим гармоническим сигналом.

3. Производят фильтрацию выходного сигнала методом синхронного накопления.

4. Гармоническим анализом выделяют вторую гармонику отфильтрованного выходного сигнала.

5. По фазовому сдвигу определяют направление движения к экстремуму.

6. Изменяют входной сигнал объекта до тех пор, пока в выходном сигнале не появится вторая гармоника.

7. Увеличивают частоту модулирующего сигнала, выбирая её близкой к частоте пропускания экстремального объекта.

8. Традиционными методами экстремального управления реализуют поиск максимума амплитуды второй гармоники

Для проверки разработанного алгоритма была построена Simulink-модель экстремального объекта. Объектом исследования была выбрана бумагоделательная машина (БДМ).

Известна [6], экстремальная зависимость между соотношением скоростей бумажной массы, поступающей из напускного устройства и сетки бумагоделательной машины и неравномерностью просвета бумаги. Поскольку изменение скорости бумагоделательной машины ведёт к изменению технологического режима и влияет на все её системы, отношение скоростей будем задавать путём изменения скорости истечения бумажной массы, регулируя её с помощью изменения напора в напускном устройстве.

Данные о неравномерности просвета будем косвенным образом вычислять по весу бумажного полотна, измеряемого сканирующим устройством. Очевидно, что чем меньше изменение веса относительно среднего значения, тем меньше неравномерность бумажного полотна и, следовательно, изменение дисперсии веса метра квадратного будет оценкой неравномерности просвета.

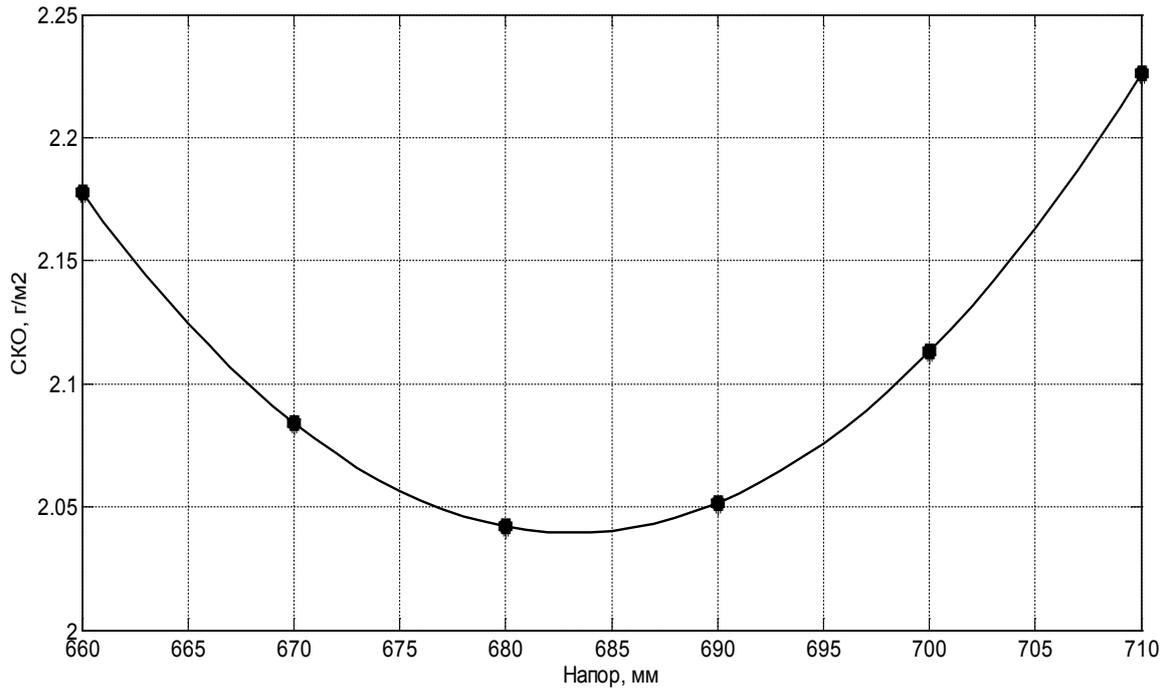


Рис. 1. Экстремальная зависимость СКО от напора

По экспериментальным данным, представленным на рис. 1, с помощью пакета System Identification Toolbox была получена модель, устанавливающая взаимосвязь между напором и СКО веса бумажного полотна. Модель включает в себя две подмодели: подмодель типа Гаммерштейна, воспроизводящую нелинейную экстремальную зависимость и линейные подмодели возмущений, действующие на входе и выходе объекта. Simulink — модель такого объекта приведена на рис. 2.

Блок ограничения Saturation ограничивает входной сигнал нелинейного (экстремального) элемента в диапазоне 660 -710 мм. Нелинейный блок Fcp воспроизводит экстремальную зависимость, приведённую на рис. 2, запаздывание в объекте равно 30 с.

С помощью разработанной Simulink-модели инерционного экстремального объекта, приведённой на рис. 1, было проведён анализ помехозащищённого экстремального управления, построенного на основе предлагаемого алгоритма. Для этого на вход сумматора Add подавался гармонический сигнал с амплитудой 10 мм и периодом 125 с, что примерно в четыре раза превышает время запаздывания.

В процессе моделирования постоянный входной сигнал экстремального объекта, задаваемый блоком Constant, выбирался таким образом, чтобы рабочая точка объекта находилась справа от точки экстремума

(рис. 3), в точке экстремума (рис. 4) и слева от точки экстремума (рис. 5)

На рис. 5–7, а приведены входной гармонический и выходной зашумлённый сигналы инерционного экстремального объекта, на рис. 3–5, б — результаты синхронного накопления входного и выходного сигналов за 23 периода входного сигнала, на рисунках 3–5, в-результаты гармонического анализа входного и выходного сигналов, отфильтрованных методом синхронного накопления.

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного алгоритма. При нахождении в точке экстремума видно, что амплитуда второй гармоники достигает максимального значения.

Работа алгоритма проверялась на реальном объекте для оптимального значения напора, равного 550 мм (см. рис. 6), что также подтвердило эффективность предложенного алгоритма.

Экспериментально подтверждена экстремальная зависимость между соотношением скоростей бумажной массы и бумагоделательной машины и среднеквадратичным отклонением веса бумажного полотна, которое определяет степень неравномерности просвета бумаги.

Разработан помехозащищённый алгоритм поиска экстремума инерционного объекта с запаздыванием, ос-

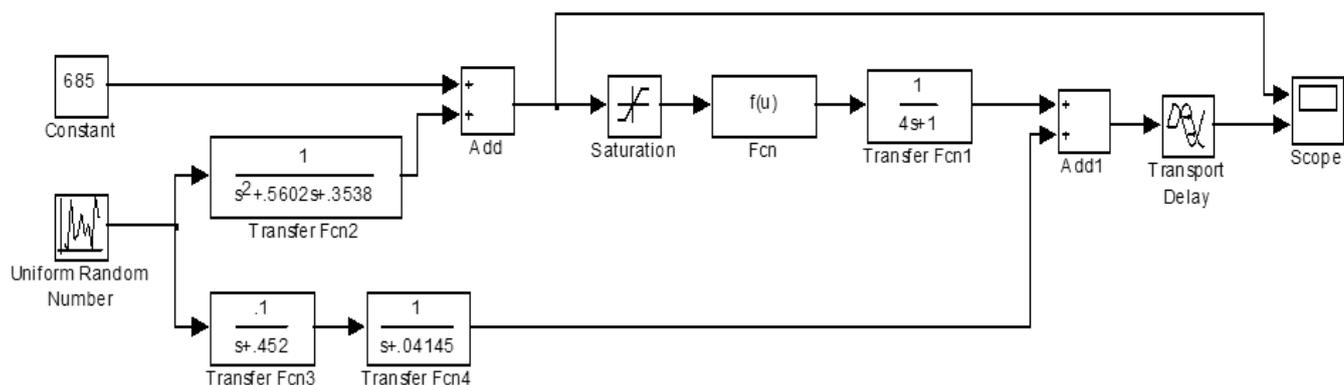


Рис. 2. Simulink-модель инерционного экстремального объекта

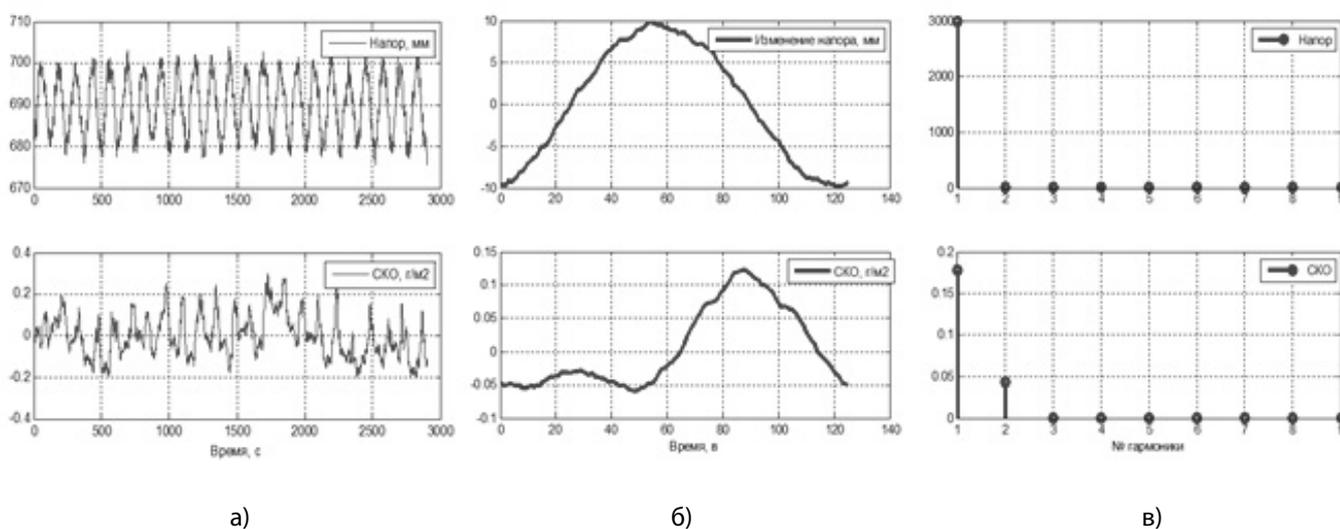


Рис. 3. Результаты моделирования при среднем значении входного сигнала больше оптимального (690 мм)

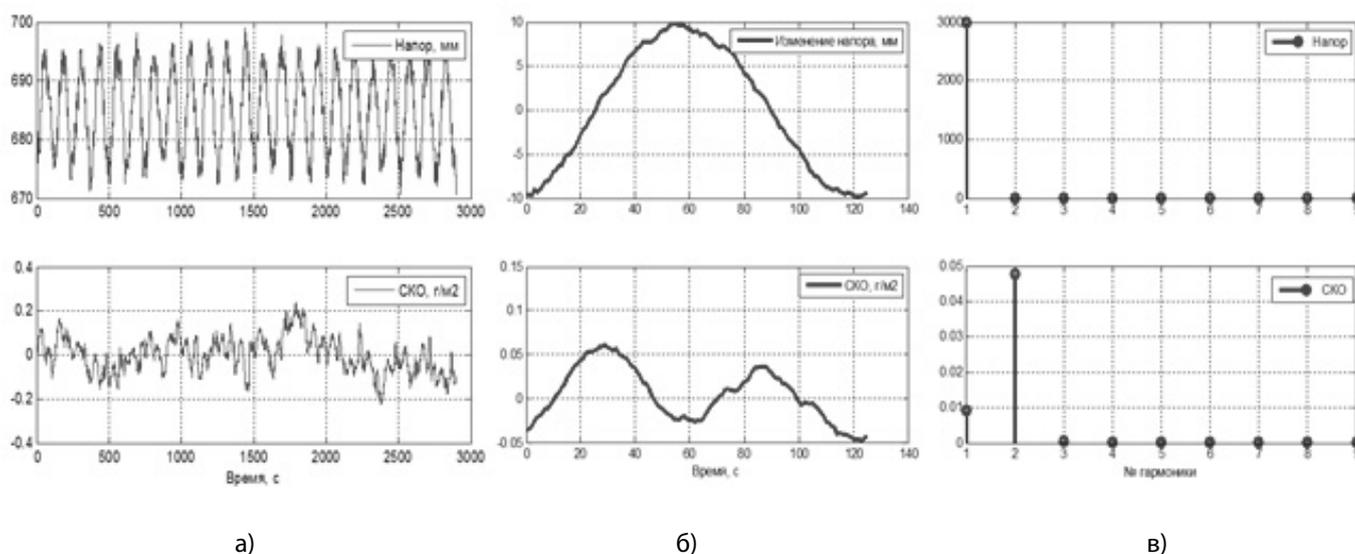


Рис. 4. Результаты моделирования при среднем значении входного сигнала, равного оптимальному (685 мм)

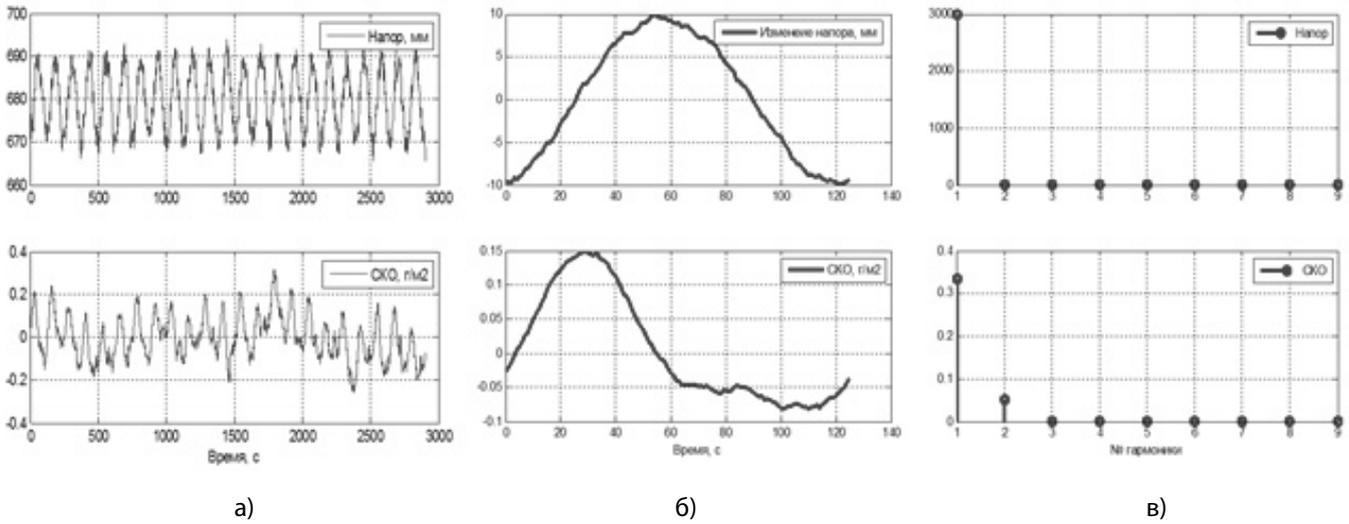


Рис. 5. Результаты моделирования при среднем значении входного сигнала меньше оптимального (680 мм)

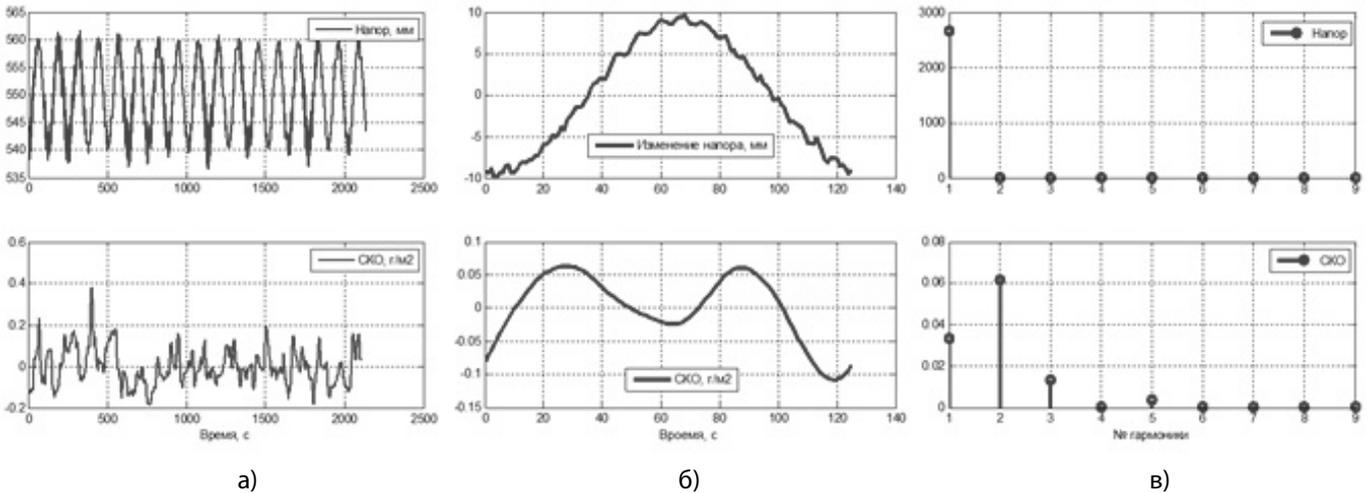


Рис. 6. Результаты моделирования при среднем значении напора, равного оптимальному (550 мм)

нованный на методе периодического поискового сигнала с фильтрацией помех путем синхронного накопления и последующего поиска максимума выделенной из входного сигнала второй гармоники.

На основе моделирования и экспериментальной проверки на реальном объекте подтверждена эффективность предложенного алгоритма.

Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного алгоритма. При оптимальном напоре чётко видно, что амплитуда второй гармоники достигает максимального значения.

Simulink — модель системы экстремального регулирования показана на рис. 7.

Для уменьшения времени моделирования из модели исключён блок синхронного накопления. Модель содержит следующие основные блоки: *Subsystem* — модель инерционного экстремального объекта, показанная на рисунке 3, *Bufer* — буфер выделяющий выделение из временного ряда, формируемого на выходе экстремального объекта, временные отрезки с периодом равным периоду модулирующего сигнала, *Magnitude FFT* — анализатор спектра, осуществляющий гармонический анализ отрезков временного ряда и, в первую очередь его первую и вторую гармоники (см. показания дисплея), *Selector* и *Selector1* — селекторы выделяющие амплитуды первой и второй гармоник, блок сравнения текущего и предыдущего значений, состоящий из временной задержки и элемента сравнения, *cumulative Sum* — цифровой интегратор, *db Gain* — усилитель, *Rate*

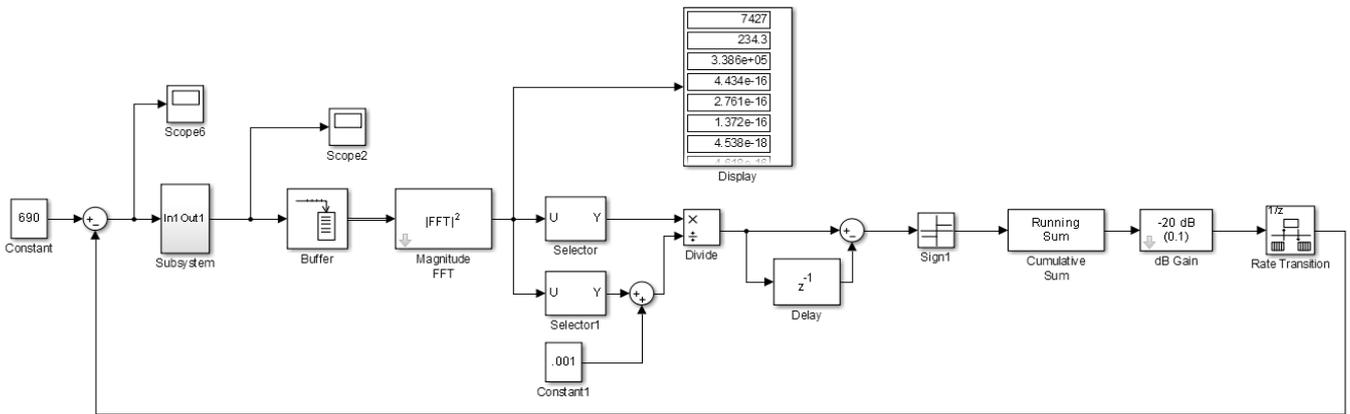
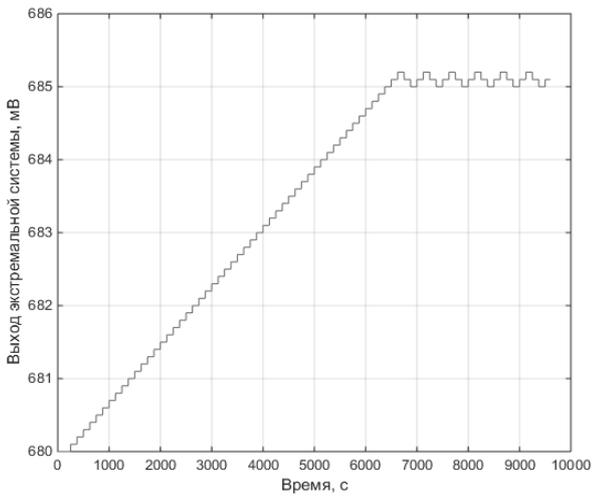
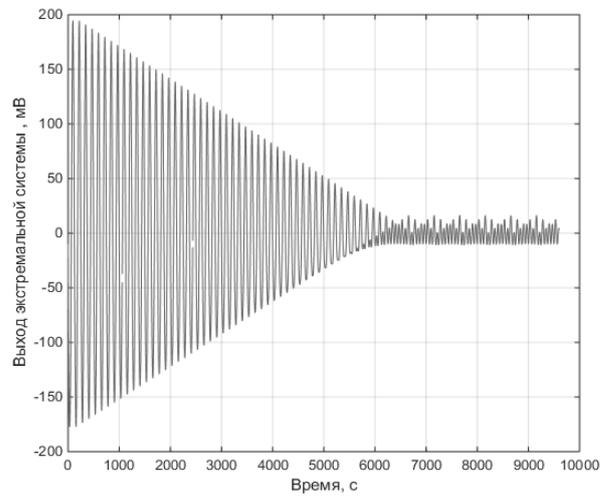


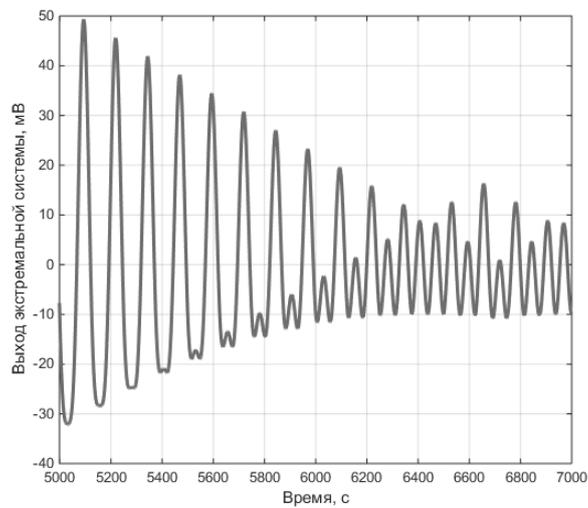
Рис. 7. Simulink — модель системы экстремального регулирования



а) Изменение напряжения



б) изменение выходного сигнала



в) фрагмент изменения выходного сигнала при достижении экстремума

Рис. 8. Осциллограммы поиска экстремума

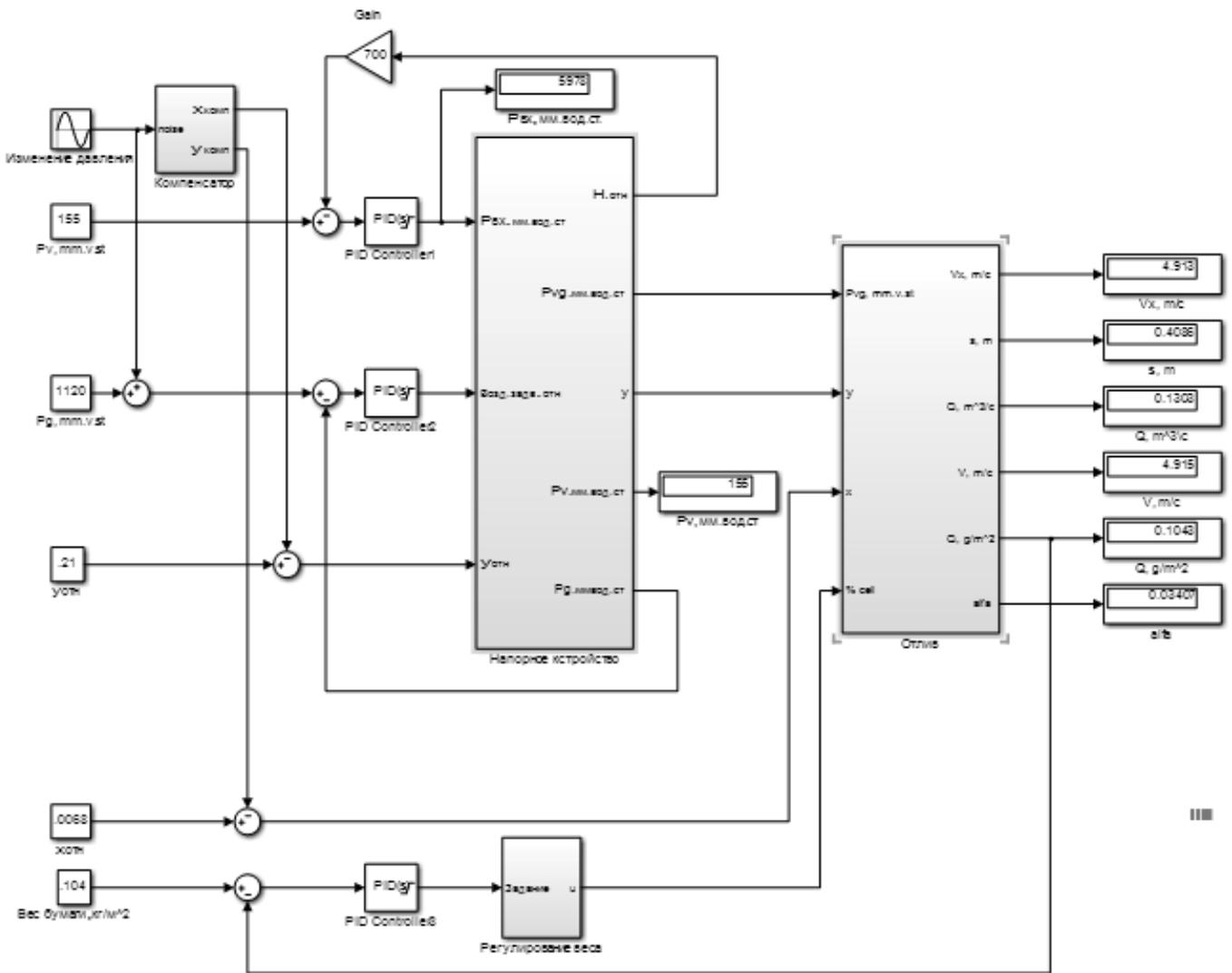


Рис. 9. Simulink-модель стабилизации параметров

Transition — блок предотвращающий эффект цифровых гонок.

Работа схемы поясняется осциллограммами нахождения экстремума при движении к нему слева (рис. 8).

На осциллограмме рис. 8, в) в чётко видно, что при движении к экстремуму постепенно появляется вторая гармоника в выходном сигнале экстремальной системы.

Использование динамических компенсаторов для динамической развязки каналов из-за нелинейности объекта управления наталкивается на известные проблемы физической реализуемости и устойчивости таких компенсаторов. В связи с этим было предложено использовать статическую компенсацию каналов управления как показано на Simulink — модели комбинированной системы (рис. 9).

Функции компенсации координат верхней планки напорного устройства x и y подбирались экспериментально. Было установлено, что функция компенсации как для координаты x , так и для координаты y оказались практически линейными. Затем была проведена аппроксимация этих функций линейным полиномом.

Сравнение работы системы без компенсации и с компенсацией параметров представлено на рис. 10 и свидетельствует о приемлемости использования статических компенсаторов

Анализ рисунков показывает, что при изменении давления воздуха Pg с компенсатором, производительность в установившемся состоянии не отличается более чем на $\pm 1,5\%$. Координата падения струи бумажной массы на сетку колеблется в пределах $\pm 3,4\%$.

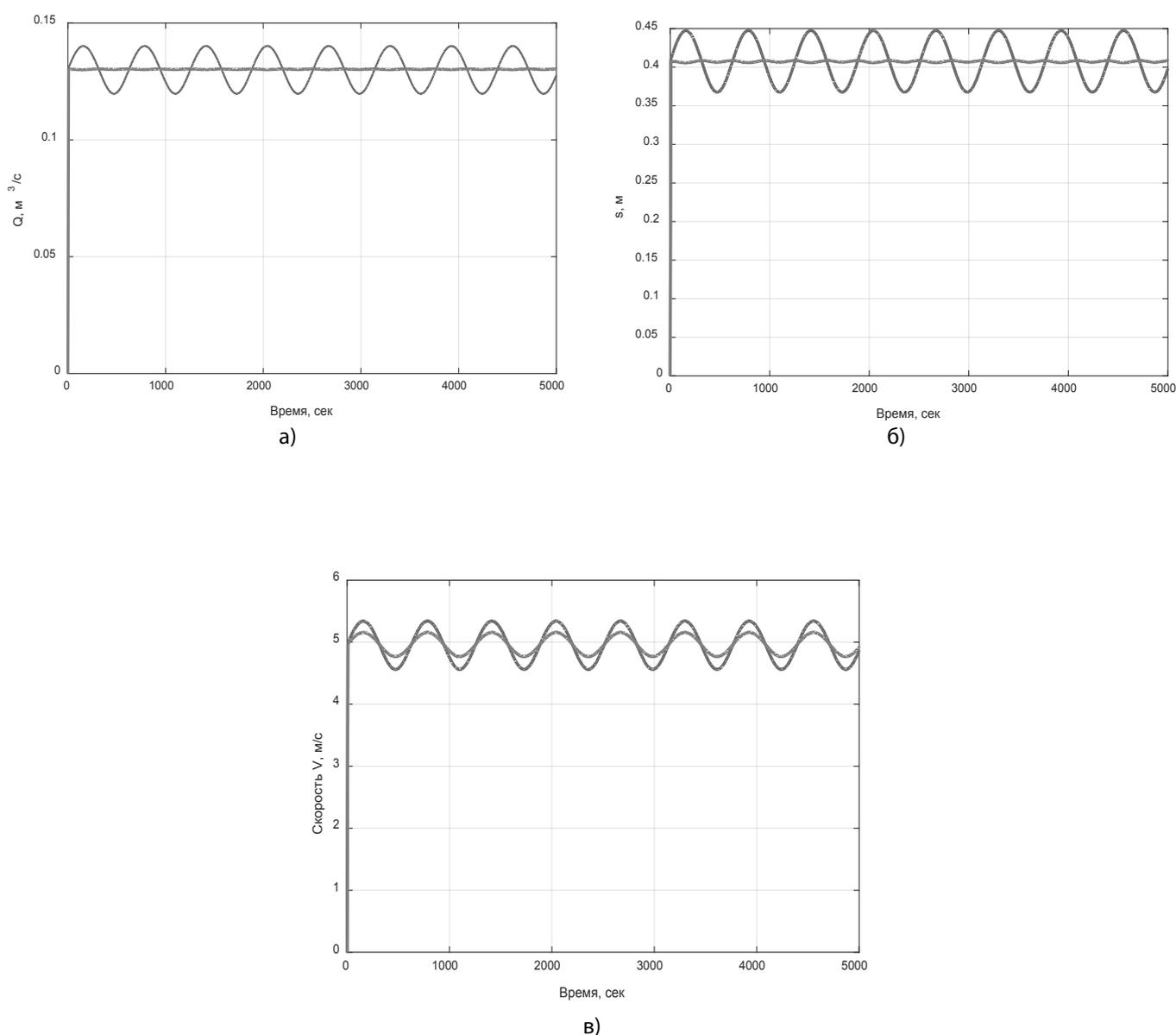


Рис. 10. Сравнение работы системы без компенсации и с компенсацией параметров: а) производительности; б) координаты падения струи бумажной массы на сетку БДМ; в) изменение скорости напуска бумажной массы из напорного устройства

Работа системы с использованием метода экстремального комбинированного управления проверялась на реальном объекте, при производстве бумаги марки «КПС-2» (ТУ 5441–045–00279344–2005) достигнуто оптимальное значение напора, равное 550 мм, что подтвердило эффективность предложенного алгоритма.

Для повышения точности и стабильности регулирования среднеквадратического отклонения массы квадратного метра бумажного полотна бумаги использовались разработанные алгоритмы предиктивного, помехозащищенного экстремального и нейросетевого

управления. чтобы обеспечить повышение точности и стабильности техпроцесса производства бумаги, в отличие от известных схем управления в данной системе использованы экстремальный, нейросетевой регуляторы и добавлена функция коррекций значений массы, участвующая в контуре регулирования массы квадратного метра бумажного полотна.

Программируемый логический контроллер осуществляет экстремальное регулирование среднеквадратического отклонения массы квадратного метра бумажного полотна. Данные о технологическом процессе отобра-

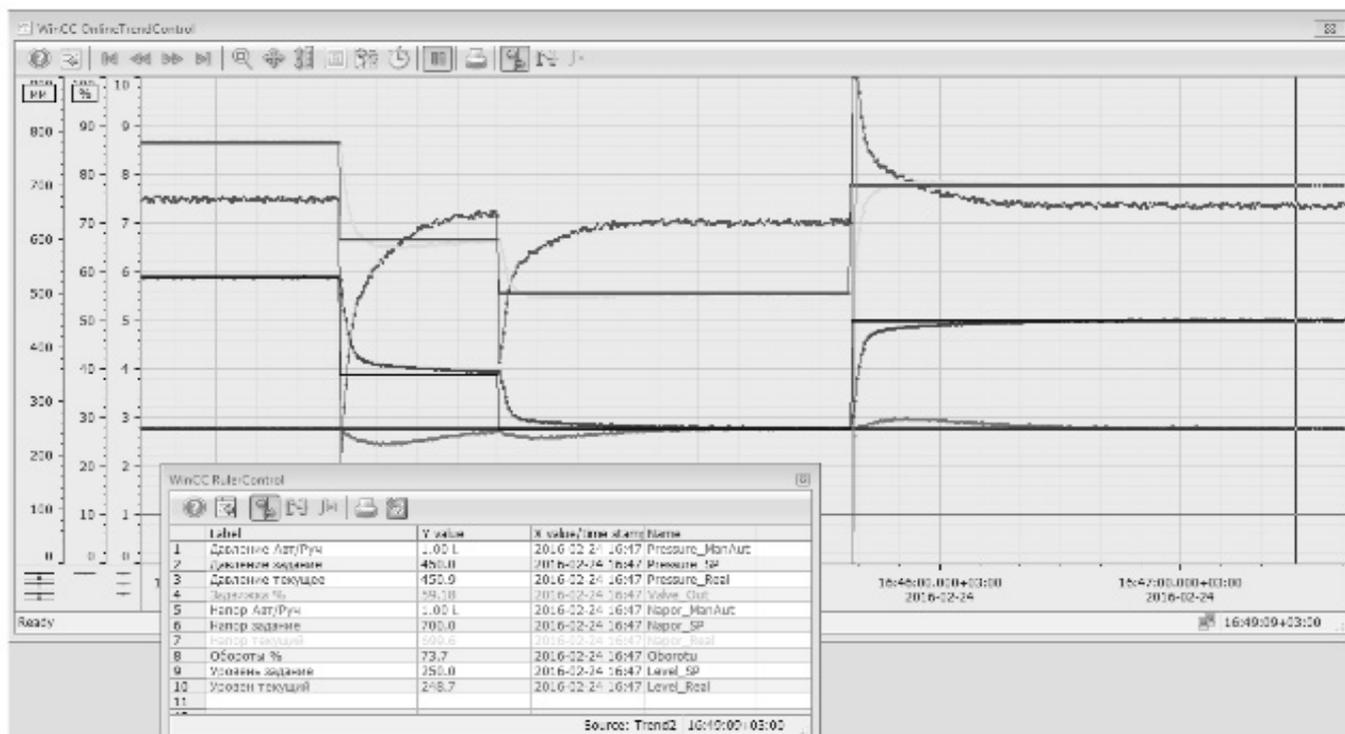


Рис. 12. Тренды работы системы АСУТП бумажного производства с предиктивным, помехозащищенным экстремальным и нейросетевым управлением

Таблица 1. Оценка эффективности АСУТП бумажного производства

Наименование параметра	До внедрения	После внедрения
1. Время, необходимое для выхода на режим при опытной выработке бумаги	180 мин	120 мин
2. Время перехода бумагоделательной машины с одного режима работы на другой для производства нового типа	30	20
3. Основные параметры бумагоделательной машины, изменяемые для перехода на другой тип бумаги	Задание массы квадратного метра, скорость машины, давление пара, давление воздушной подушки, открытие щели напорного ящика	Задание массы квадратного метра, скорость машины, давление пара

Таблица 2. Оценка норм расхода волокна

Наименование	До внедрения	После внедрения
1. Бумага-основа для обоев марки «В1»:целлюлоза СФА листоваямакулатура МС-7Б	430 кг/т834 кг/т	422 кг/т820 кг/т
2. Бумага-основа для обоев марки «В2»:целлюлоза СФА листоваямакулатура МС-7Б	260 кг/т1168 кг/т	255 кг/т1150 кг/т
3. Бумага-основа для обоев марки «Н1»:макулатура МС-7Б	1115 кг/т	1100 кг/т
4. Бумага-основа для обоев марки «АГ»:целлюлоза СФА листоваямакулатура МС-7Б	420 кг/т834 кг/т	411 кг/т820 кг/т
5. Бумага писчая марки «Б»:целлюлоза СФА хвойнаяцеллюлоза СФА листовая	218 кг/т655 кг/т	215 кг/т650 кг/т

Время переходного процесса составило примерно 2 часа.

Предложено стабилизировать изменение производительности и координату падения струи бумажной массы на сетку. Коэффициенты компенсации координат x и y подбирались вручную, по составленным значениям проводилась аппроксимация. Максимальную точность аппроксимации дает линейная функция. Анализ полученных результатов показывает, что при изменении давления воздуха P_g с компенсатором,

производительность в установившемся состоянии не отличается более чем на $\pm 1,5\%$. Координата падения струи бумажной массы на сетку колеблется в пределах $\pm 3,4\%$.

Разработана и внедрена система автоматизированного управления бумажным производством, повысившая точность и стабильность регулирования веса бумажного полотна бумаги. Нормы расхода волокна уменьшились на 2%. Среднее квадратичное отклонение веса бумажного полотна уменьшилось на 1,5–2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология целлюлозно-бумажного производства: В 3 т. Т. П. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона. — СПб.: Политехника, 2005. — 423 с.
2. Авдеева О. В. Экстремальное управление инерционным объектом с запаздыванием в условиях сильных помех / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, С. В. Никулин, А. Д. Семенов // Известия высших учебных заведений поволжский регион. Технические науки. — 2014. — № 3. — С. 54–64
3. Растринин Л. А. Статистические методы поиска / Л. А. Растринин. — М.: Наука, 1968. — 376 с.
4. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы / А. Г. Александров. — М.: Высш. шк., 1989. — 263 с.
5. Фельдбаум А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А. А. Фельдбаум. — М.: Физматгиз, 1963 г. — 552 с.
6. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах / Ж. Макс, пер. с франц. — М.: Мир, 1983. — Т. 1. 312 с.
7. Зверев В. А. Выделение сигналов из помех численными методами / В. А. Зверев, А. А. Стромков. — Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. — 188 с.

© Соколова Ольга Викторовна (gasuma@mail.ru), Никулин Сергей Васильевич, Семенов Анатолий Дмитриевич.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

