

Компенсация транспортного запаздывания в сушильной секции БДМ с использованием индукционного нагрева и нейросетевых алгоритмов

Т. З. Фам

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

phamthanhduymbaa@mail.ru

М. П. Белов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

mpbelov@etu.ru

Аннотация. В условиях непрерывной модернизации бумажной промышленности вопросы компенсации транспортного запаздывания в системах управления сушильной частью бумагоделательной машины всегда выделяется особое внимание. Традиционные системы сушки паром имеют большие задержки, поэтому предлагается комплексное решение: использование электромагнитного индукционного нагрева. В докладе также рассматривается использование нейросетевой наблюдатель для контроля влажности бумажного полотна при сушке, а также регулирование скорости при перемещении бумажного полотна с использованием нейронных регуляторов.

Ключевые слова: система управления; индукционный нагрев; бумагоделательная машина; нейронная сеть

I. ВВЕДЕНИЕ

Сушильная часть является наиболее энергоемким участком бумагоделательной машины (БДМ), на который приходится от 60% до 80% общего потребления тепловой энергии всего бумажного производства. Традиционные пароконденсатные системы сушки обладают огромной тепловой инерцией, существенные ограничивают возможности оптимизации и повышения энергоэффективности процесса.

Основной проблемы традиционных систем управления профилем влажности является использование сканирующих устройств, расположенных в самом конце машины. Такая архитектура контроля порождает существенный динамический недостаток — огромное транспортное запаздывание.

Анализ научных работ [3–7] показал, что применение искусственных нейронных сетей (ИНС) и нейронечетких алгоритмов позволяет эффективно моделировать нелинейные процессы сушки БДМ и предсказывать параметры влажности. Следовательно, для полного исключения тепловой инерции исполнительных механизмов наиболее перспективным направлением является внедрение электромагнитного индукционного нагрева. Установка нейросетевых наблюдателей в зоне индукционного нагрева позволяет мгновенно корректировать профиль полотна, полностью нивелируя транспортное запаздывание и повышая общее качество управления.

II. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И АППАРАТНОЕ РЕШЕНИЕ: АНАЛИЗ МЕТОДОВ СУШКИ

Самой большой проблемой традиционных систем сушки является значительное транспортное запаздывание. Чугунные цилиндры и паровые клапаны нагреваются с большими задержками, иногда до нескольких течение нескольких минут. В то же время в системах управления электроприводом скорость (v) и натяжение полотна (F) регулируются за миллисекунды. Из-за этой разницы тепловая система просто не успевает отрегулировать работу электропривода. Это приводит к образованию «влажных полос» на бумажном полотне или пересушиванию его кромок.

В последние годы в научной и производственной практике получила широкое распространение технология сушки бумажного полотна с использованием индукционно-нагревательных цилиндров. При использовании метода индукционного нагрева поверхность цилиндра подвергается локальному тепловому воздействию. Это эффективно компенсирует колебания температуры, вызванные изменениями влажности бумажного полотна. Термостойкость стержней сводит к минимуму локальное тепловое расширение, обеспечивая качество бумаги.

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ С ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ СУШКИ

Критерий	Индукционные нагревательные цилиндры	Паровая сушка
Принцип работы	Тепло образуется непосредственно внутри вихревых токов. Это происходит благодаря статичной катушке, которая находится внутри оболочки.	Когда пар конденсируется, он передает тепло через эту оболочку. Однако удаление конденсата в этом процессе довольно сложное.
Время нагрева	Сокращение >50%	Медленнее, зависит от управления конденсатом
Энергоэффективность	>30% выше, без теплотерь в окружающую среду; использует возобновляемую электроэнергию	80% энергозатрат бумагоделательной машины, потери через капоты и утечки

Критерий	Индукционные нагревательные цилиндры	Паровая сушка
Размеры оборудования	Сокращение секции сушки на 50–75%	Длиннее, требуются большие капоты
Обслуживание и экология	Простое (оборудование вне оболочки), нулевые прямые выбросы	Сложное (сифоны, коллекторы), выбросы от ископаемого топлива
Практическое применение	машины Toscotec, рост производительности на 15%	Стандарт для большинства бумагоделательных машин, но менее эффективно чем SYD

III. СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВОГО АЛГОРИТМА И ВИРТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ

Учитывая неэффективную транспортировку вызванной задержки, сигналы, поступающие с устройств сканирования, недопустимы. Процессы увлажнения и сушки описываются нелинейным дифференциальным уравнением теплового и массообмена:

$$\Delta\varphi = -k(T, v, u) \cdot (\varphi - \varphi_{eq}),$$

где φ — текущая влажность бумаги; $k(T, v, u)$ — коэффициент скорости сушки, нелинейно зависящий от температуры цилиндров T , скорости перемещения полотна v и аэродинамики воздушного потока u ; φ_{eq} — равновесная влажность.

Классические наблюдатели состояния не способны расширить сильную взаимозависимость указанных переменных для предсказания профиля влажности во время усадки бумаги с необходимой точностью. В качестве практического применения в рамках технологий искусственного интеллекта предлагается реализовать виртуальный датчик на базе рекуррентной нейронной сети Элмана (РНС). Структурная схема предложенного нейросетевого наблюдателя представлена на рис. 1.

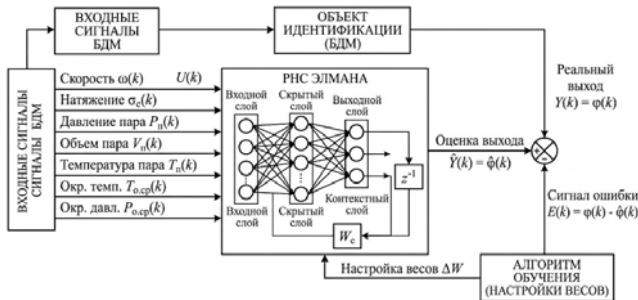


Рис. 1. Структурная схема нейросетевого наблюдателя (виртуального датчика влажности) на основе РНС Элмана

Как видно из схемы (рис. 1), обратные связи (контекстный слой с оператором задержки z^{-1})

обеспечивают РНС динамической памятью. Это позволяет учитывать фон изменения параметров и компенсировать нелинейную усадку полотна. Вектор входных переменных РНС $U(k)$ формируется из координат электропривода и теплового контура, доступных для безынерционного измерения в такте k :

$$U(k) = [\omega(k), \sigma_c(k), P_{ind}(k)]^T,$$

где $\omega(k)$ — угловая скорость приводов; $\sigma_c(k)$ — натяжение полотна, определяемое по току статора электродвигателей; $P_{ind}(k)$ — текущая мощность высокочастотного инвертора. Выходом сети является онлайн-оценка текущей влажности бумаги $\hat{\varphi}(k)$.

Для обеспечения правильной работы алгоритма и ускорения сходимости создается Представительная обучающая выборка создается. Сбор технологических параметров осуществляется из АСУ ТП (DCS) в реальном времени при различных режимах работы машины. Перед подачей на вход сети абсолютные значения параметров подвергаются обязательной процедуре математической нормализации к интервалу $[-1; 1]$ для согласования уровней сигналов с областью определения сигмоидальных функций активации скрытого слоя.

Чтобы избежать эффекта "переобучения", при котором нейронная сеть начинает имитировать случайный информационный шум от датчиков вместо реального физического паттерна, используется метод перекрестной проверки. Исходный массив разделен на три набора данных: обучающий, проверочный и тестовый. Для снижения среднеквадратичной ошибки (MSE) используется обратное распространение ошибки. Для повышения скорости сходимости применяется правило коррекции синаптических весов с учетом момента:

$$\Delta w_{ij}^n(t) = \eta \cdot \delta_j^n \cdot y_i^{(n-1)} + \alpha \cdot \Delta w_{ij}^n(t-1),$$

где η — коэффициент скорости обучения; δ_j^n — ошибка обучения j -го нейрона n -го слоя; $y_i^{(n-1)}$ — выход i -го нейрона предыдущего слоя; α — коэффициент момента. В процессе обучения производится непрерывный мониторинг ошибки, и итеративная коррекция весов прерывается по критерию ранней остановки, что гарантирует сети максимальную обобщающую способность (генерализацию).

Этот способ обучения виртуального датчика является частью полностью интегрированной системы управления электроприводами сушильной секции БДМ. Функциональная схема разработанной безынерционной системы управления показана на рис. 2.

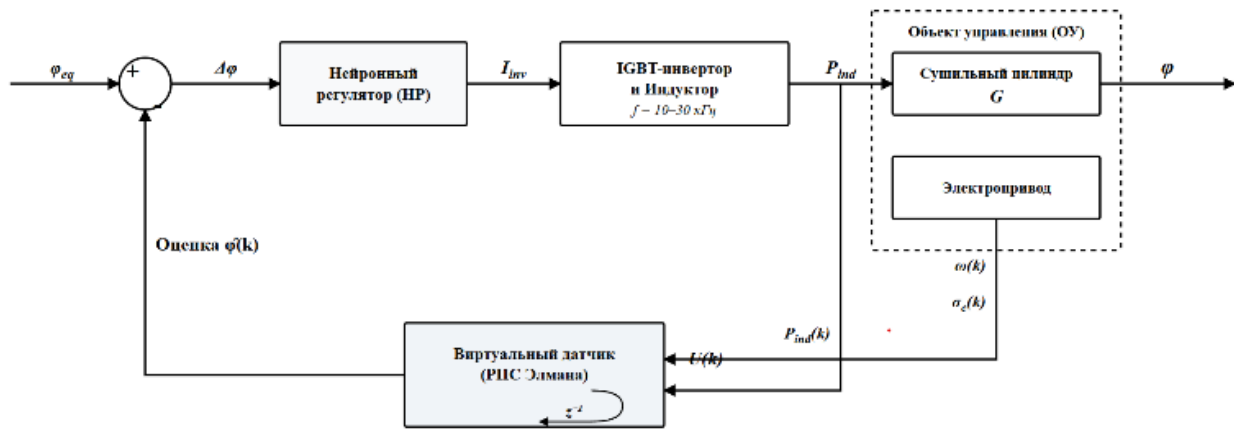


Рис. 2. Функциональная схема системы управления сушильной секции БДМ с использованием индукционного нагрева и нейросетевым наблюдателем

В предлагаемой функциональной схеме (рис. 2) нейронная сеть синтезирует сигнал оценки влажности $\hat{\varphi}(k)$, который мгновенно вставляется в качестве управляющего входа. Когда происходит отклонение, регулятор быстро корректирует ток высокочастотного инвертора IGBT (I_{inv}). Выходная тепловая мощность безынерционного индуктора P_{ind} при этом определяется выражением:

$$P_{ind} = K\sqrt{\rho\mu f} \cdot I_{inv}^2,$$

где K — конструктивный коэффициент; ρ и μ — удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость оболочки цилиндра соответственно; f — частота инвертора (10–30 кГц).

Для многозонального управления поперечным профилем (CD-управление) распределение мощности по зонам индукции задается через векторно-матричное уравнение пространственного взаимодействия:

$$\Delta Y = G \cdot \Delta U_{inv},$$

где ΔY — вектор изменения влажности; ΔU_{inv} — вектор изменения входной мощности индукционных катушек; G — ленточная матрица объекта, описывающая пространственное распространение тепла.

Таким образом, применение нейросетевого наблюдателя позволяет мгновенно преобразовывать электромеханические параметры привода в оценку влажности, а IGBT-инвертор синхронно трансформирует ток в тепловую мощность. Задержка транспортировки, присущая традиционным сканерам, полностью устранена из системы автоматического управления.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для подтверждения достоверности теоретических положений и оценки эффективности предложенного алгоритма было проведено комплексное имитационное моделирование в программной среде MATLAB с использованием пакетов Simscape Electrical и Deep Learning Toolbox. Разработанная модель включает в себя подсистемы многодвигательного электропривода, виртуального датчика на базе PHC Элмана и массива высокочастотных инверторов индукционного нагрева.

На первом этапе оценивалось качество обучения нейросетевого наблюдателя (Offline Training). Обучение проводилось на нормализованной выборке, состоящей из

1000 экспериментальных массивов данных. На рис. 3 представлены графики сходимости среднеквадратичной ошибки (MSE) на обучающем и валидационном множествах.

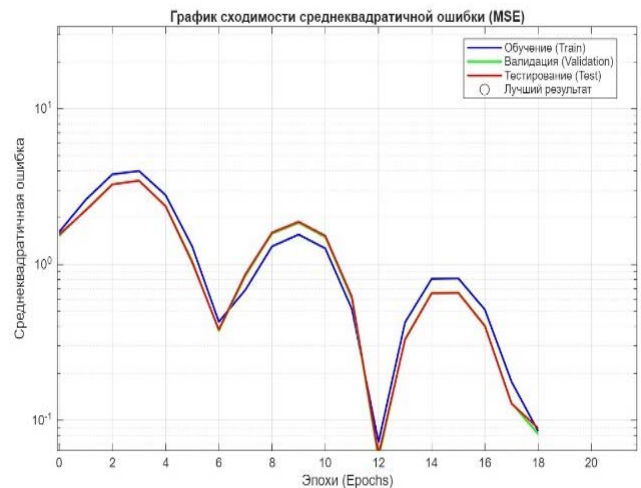


График регрессии: Обучение, Валидация и Тестирование

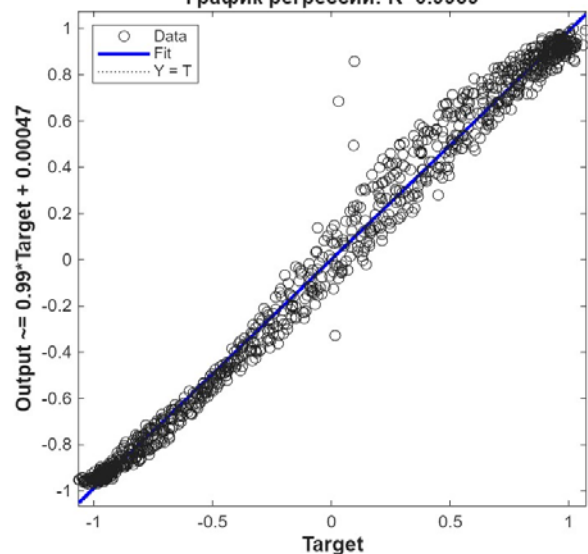


Рис. 3. Функциональная схема системы управления сушильной секции БДМ с использованием индукционного нагрева и нейросетевым наблюдателем

Как видно из графиков (рис. 3), применение алгоритма обратного распространения ошибки с учетом момента (Momentum) обеспечило высокую скорость сходимости. Критерий ранней остановки (early stopping) сработал корректно, предотвратив переобучение сети. Итоговое значение MSE составило менее 10^{-4} , а коэффициент корреляции на графике регрессии превысил 0.99. Это доказывает высокую обобщающую способность синтезированной РНС: виртуальный датчик способен с высокой точностью оценивать влажность бумаги без транспортного запаздывания.

На втором этапе исследовалась динамика замкнутой безынерционной системы управления профилем влажности, где в качестве исполнительного механизма использовалась исключительно система индукционного нагрева. Имитировалось резкое технологическое возмущение (ступенчатое изменение натяжения полотна $\Delta\sigma_c$).

Анализ полученных осциллограмм (рис. 4) демонстрирует уникальные динамические возможности синтезированного комплекса:

- Нейросетевой наблюдатель мгновенно детектирует электромеханическое возмущение по изменениям токов статора

электродвигателей. Синтезированный сигнал оценки влажности немедленно поступает на вход регулятора.

- Регулятор безынерционно корректирует ток высокочастотного IGBT-инвертора (I_{inv}). Благодаря тому, что тепловая мощность (P_{ind}) генерируется непосредственно в поверхностном слое цилиндра за счет токов Фуко, тепловая инерция в системе практически отсутствует.
- Время переходного процесса сокращается до миллисекунд. Динамическая просадка влажности мгновенно компенсируется всплеском индукционной мощности, после чего система выходит на новый установившийся режим без перерегулирования.

Таким образом, результаты моделирования достоверно подтверждают, что интеграция искусственных нейронных сетей с силовыми IGBT-преобразователями индукционного нагрева позволяет создать абсолютно безынерционный контур управления. Данное техническое решение обеспечивает жесткую синхронизацию термодинамических и электромеханических процессов, надежно предотвращая обрывы бумажного полотна при высокоскоростных режимах работы БДМ.

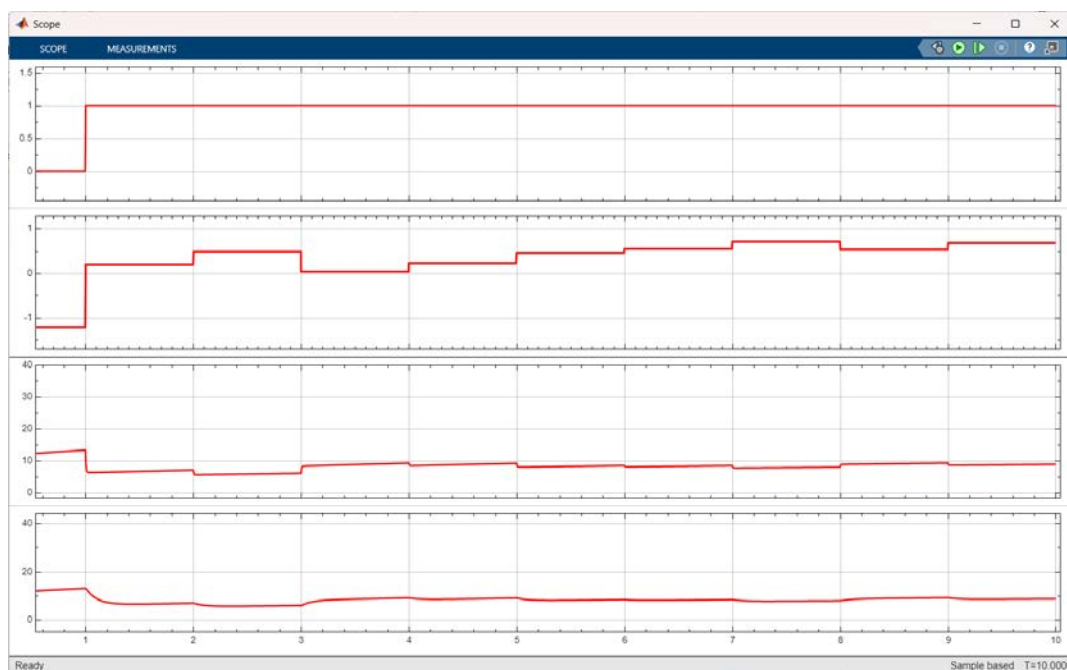


Рис. 4. Переходная характеристика интеллектуальной системы управления влажностью при ступенчатом изменении задания. Сверху вниз: 1) Ступенчатое изменение задания; 2) Оценка влажности нейросетевым наблюдателем; 3) Управляющее воздействие инвертора IGBT; 4) Фактическая влажность бумажного полотна.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье решена задача радикального повышения быстродействия системы управления влажностью в сушильной секции БДМ путем перехода от пароконденсатных систем к индукционному нагреву на базе IGBT-инверторов. Для устранения транспортного запаздывания от физических сканеров качества синтезирован интеллектуальный виртуальный датчик на основе рекуррентной нейросети (РНС) Элмана. Результаты моделирования подтверждают, что

обученная РНС ($MSE < 10^{-4}$) способна мгновенно и с высокой точностью оценивать текущую влажность полотна по электромеханическим координатам привода (токи статора, скорость, натяжение).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов. 3-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 576 с.
- [2] Cheng J., Chen D., Chen G. Modeling and compensation for dead-time effect in high power // Energies. 2020.

- [3] Белов А. М., Белов М. П. Применение нейронных сетей в системе управления электроприводами сушильных секций в бумагоделательной машине // Сборник докладов XXVIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2025), 28–30 мая 2025 г. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025.
- [4] Фляте Д.М. Свойства бумаги. М.: Лесн. промышленность, 2012. 680 с.
- [5] Александров А.В., Алашкевич Ю.Д. Оборудование ЦБП. Ч.2. Бумагоделательные машины. Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2018. 98 с.
- [6] Иванов С.Н. Технология бумаги. Изд-во: Инфра-Инженерия, 2022. 696 с.
- [7] Справочник по автоматизации целлюлозно-бумажных предприятий / Э.В. Цешковский, Н.С. Пиргач, Г.Д. Ерашкин и др. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1999. 368 с