

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СУШИЛКОЙ ХЛОПКА-СЫРЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Маматова Дилрабо Алишеровна,
доктор технических наук (DSc), профессор,
Ташкентский институт текстильной и легкой
промышленности, ORCID: 0000-0003-0172-2278

Рахмонов Жамшидбек Турдалиевич,
старший преподаватель, Гулистанский
государственный педагогический институт,
ORCID: 0009-0006-2520-188X

Бутовский Петр Михайлович,
Доктор философии по техническим наукам (PhD),
доцент, Ташкентский институт текстильной и
легкой промышленности,
ORCID: 0000-0003-2776-2614

Умаров Хабибулла Рахматуллаевич,
старший преподаватель, Гулистанский
государственный университет,
ORCID: 0009-0009-3303-8535,
e-mail: umarovhr@mail.ru

Аккулова Юлдуз Алимовна,
доцент, Янгиерский филиал Ташкентского химико-
технологического института

Аннотация. В данной работе представлена разработка адаптивной системы управления электрической сушилкой хлопка-сырца на базе микроконтроллера ESP32 с регулировкой мощности через диммер. Построена эмпирическая модель расчёта температуры теплоносителя в зависимости от влажности хлопка и производительности сушильного барабана: $T=16,21 \times W^{0.523} \times P^{0.317}$, где W – начальная влажность хлопка (%), P – производительность (т/ч). Разработана адаптивная система коррекции температуры, работающая по принципу обучения нейронных сетей, которая автоматически компенсирует неучтённые факторы процесса сушки (влажность воздуха, неравномерность загрузки, износ оборудования). Регулирование мощности ТЭНов осуществляется через диммер с управлением по фазовому углу, что обеспечивает плавное изменение температуры и снижение энергопотребления на 15-18% по сравнению с релейным управлением.

Ключевые слова: микроконтроллер, электрической сушилкой хлопка-сырца, влажность хлопка, сушильный барабан, энергопотребление, релейное управление.

Введение. Сушка хлопка-сырца является энергоёмким технологическим процессом, определяющим качество конечного продукта и экономическую эффективность хлопкоочистительного производства. Традиционно в Узбекистане применяются газовые сушильные

установки, однако в последние годы наблюдается тенденция к переходу на электрические сушилки с ТЭНами, что связано с повышением доступности электроэнергии и возможностью более точного регулирования температурного режима.



Ключевой проблемой управления процессом сушки является необходимость учёта множества переменных факторов: начальной влажности хлопка, производительности установки, влажности и температуры окружающего воздуха, неравномерности загрузки, износа оборудования. Традиционные системы управления с фиксированными температурными режимами не могут адаптироваться к изменяющимся условиям, что приводит к перерасходу энергии (при завышенной температуре) или недостаточному качеству сушки (при заниженной температуре).

Материалы и методы. В данной работе предлагается решение этой проблемы путём внедрения адаптивной системы управления, работающей по принципу машинного обучения. Система в процессе работы непрерывно анализирует отклонение фактической влажности на выходе от целевого значения и автоматически корректирует мощность нагрева, постепенно «обучаясь» оптимальному режиму для конкретных условий эксплуатации.

На основе рекомендованных режимов сушки [1] была построена эмпирическая зависимость температуры теплоносителя от начальной влажности хлопка и производительности установки:

$$T_{\text{базовая}} = 16,21 \times W^{0,523} \times P^{0,317} \quad (1)$$

где, W – начальная влажность хлопка-сырца, %; P – производительность сушильной установки, т/ч; $T_{\text{базовая}}$ – расчётная температура теплоносителя, °C.

Таблица 1. Рекомендованные режимы сушки

Исходная влажность хлопка, %	Производительность, т/ч	Температура агента в барабане, °C
11–12	8	100–110
13–14	8	120–130
15–16	8	135–140
17–18	8	145–150
19–20	8	150
11–12	10	110–120

13–14	10	130–140
15–16	10	145–150
17–18	10	155–160
19–24	10	160
11–12	12	120–130
13–14	12	135–145
15–16	12	150–155
17–18	12	160–170
19–24	12	170

Данная формула обеспечивает погрешность не более 3% при определении оптимальной температуры в диапазоне влажности 11–24% и производительности 8–12 т/ч. Однако она не учитывает ряд факторов, которые существенно влияют на процесс сушки в реальных условиях.

Обсуждение результатов. Для компенсации неучтённых факторов разработана адаптивная система коррекции, работающая по принципу обучения нейронных сетей. Фактически устанавливаемая температура определяется как:

$$T_{\text{установка}} = T_{\text{базовая}} + \Delta T_{\text{корр}} \quad (2)$$

где, $\Delta T_{\text{корр}}$ – корректирующая добавка, вычисляемая адаптивным алгоритмом.

Алгоритм обновления коррекции после каждого цикла сушки:

$$\Delta T_{\text{корр(новая)}} = \Delta T_{\text{корр(старая)}} - \eta \times K \times (W_{\text{целевая}} - W_{\text{выходная}}) \quad (3)$$

где:

η – скорость обучения, типичное значение 0.2–0.4;

K – коэффициент усиления, показывающий чувствительность процесса (°C/%),

$W_{\text{целевая}}$ – целевая влажность на выходе (обычно 8%);

$W_{\text{выходная}}$ – фактически измеренная влажность на выходе.

Если фактическая влажность выше целевой (недосушили), ошибка отрицательна, и температура автоматически увеличивается на следующем цикле, если фактическая влажность ниже целевой (пересушили), ошибка положительна, и температура уменьшается.



Величина коррекции пропорциональна ошибке – большая ошибка даёт большую коррекцию, система постепенно «запоминает» в значении ΔT все систематические отклонения, характерные для данной установки.

Коэффициент усиления K характеризует чувствительность процесса сушки к изменению температуры. Он показывает, на сколько градусов необходимо изменить температуру, чтобы скорректировать влажность на 1%. Для автоматического определения K используется адаптивный алгоритм:

$$K_{\text{наблюдаем}} = \frac{|\Delta T_{\text{применённая}}|}{|\Delta W|} \quad (4)$$

$$K_{\text{новый}} = 0.95 \times K_{\text{старый}} + 0.05 \times K_{\text{наблюдаем}} \quad (5)$$

где, ΔW – изменение влажности между циклами. Скользящее среднее с коэффициентом 0.95 обеспечивает устойчивость к случайным флюктуациям и постепенную адаптацию к изменению характеристик процесса.

Допустим начальные условия такие: хлопок приходит с влажностью 18%, производительность 10 тонн в час, на выходе должно быть 8%. Скорость обучения выставили $\eta = 0.3$, примем что коэффициент K имеет начальное значение 2.0.

Коррекция $\Delta T_{\text{корр}}$ в начале равна нулю – система ещё ничему не научилась.

Как видно в первом цикле система работала только по базовой формуле – получилось 142°C. Через 8 минут влажность на выходе – получилось 10.2%. Это на 2.2% больше, чем нужно, ошибка составила 2.2%. Дальше по формуле (3) даёт плюс 1.32°C. надо поднять её на 1.32 градуса. Во втором цикле уже установлена температуру 143.2°C (142 + 1.32). Результат влажность 9.1%, но всё равно не досушили на 1.1%. коррекция, теперь уже 0.66 градуса. Общая коррекция стала 1.98°C. К третьему циклу температура выросла до 144°C, и влажность на выходе была уже 8.5% Ошибка всего 0,5%. В чётвёртом цикле получилось 8.2% (чуть не

досушили), в пятом 7.9% (чуть пересушили). А вот с шестого по десятый цикл уже началась стабильная работа. Коррекция установилась примерно на уровне плюс 2.3 градуса, влажность держится ровно 8.0% с минимальными колебаниями плюс-минус 0.1%. Коэффициент K тоже менялся – он уменьшился с 2.0 до 1.71. Это значит, что система «поняла» реальную чувствительность процесса для этой конкретной сушилки. Для вычисления коэффициента усиления наша система тоже вычисляет его автоматически по формулам (4)–(5). Допустим, между двумя циклами произошло следующее: мы изменили температуру на 1.32 градуса, а влажность на выходе изменилась с 10.2% до 9.1%, то есть на 1.1%. Тогда наблюдаемый коэффициент равен 1.32 делить на 1.1, получается 1.2 градуса на процент. Это означает, что для этой конкретной ситуации нужно менять температуру на 1.2 градуса, чтобы получить изменение влажности на один процент. Примем значение не напрямую, а используем скользящее среднее. Если старое значение K было 2.0, то новое будет: 0.95 умножить на 2.0 плюс 0.05 умножить на 1.2, получается 1.96. Видите, K изменился совсем немного, с 2.0 до 1.96. Изменение параметров можно увидеть в таблице 2.

Таблица 2. Обучение системы за первые 10 циклов.

Цикл	$T_{\text{базовая}}$, °C	$\Delta T_{\text{корр}}$, °C	$T_{\text{установка}}$, °C	$W_{\text{выходная}}$, %	Ошибка, %	Коррекция, °C	K
1	142.0	0.00	142.0	10.2	-2.2	+1.32	2.00
2	142.0	+1.32	143.3	9.1	-1.1	+0.66	1.95
3	142.0	+1.98	144.0	8.5	-0.5	+0.30	1.88
4	142.0	+2.28	144.3	8.2	-0.2	+0.12	1.82
5	142.0	+2.40	144.4	7.9	+0.1	-0.06	1.78
6	142.0	+2.34	144.3	8.0	0.0	0.00	1.76
7	142.0	+2.34	144.3	8.1	+0.1	-0.06	1.74
8	142.0	+2.28	144.3	8.0	0.0	0.00	1.73
9	142.0	+2.28	144.3	8.1	+0.1	-0.06	1.72
10	142.0	+2.22	144.2	8.0	0.0	0.00	1.71

С учетом этих данных нами была разработана система управления регулирование процессом сушки. В основе нашей системы лежит микроконтроллер ESP32 – это такой 32-разрядный чип с двумя ядрами, работающими на частоте 240 МГц. Самое удобное в нём – встроенный WiFi-модуль, который позволяет подключаться к системе прямо со смартфона или компьютера.



Мы построили систему по классической трёхуровневой схеме. Снизу находится уровень датчиков – они измеряют температуру и влажность на входе в сушилку и на выходе из неё. В середине расположен уровень обработки – сам микроконтроллер ESP32, в котором прошиты адаптивные алгоритмы управления. Которые управляют диммером, а он в свою очередь регулирует мощность ТЭНов.

Мы использовали датчика DHT22. Это цифровые датчики, которые измеряют и температуру, и влажность одновременно. Они работают в диапазоне от минус 40 до плюс 80 градусов с погрешностью примерно полградуса, а влажность меряют от 0 до 100 процентов с погрешностью 2-5 процентов. Мы поставили один на входе в барабан, а второй на выходе, чтобы проверить результат сушки. Два датчика температуры DS18B20. Это более точные датчики с погрешностью всего четверть градуса. Эти датчики мы используем для контроля температуры теплоносителя – нужно же точно знать, какая температура внутри барабана.

Ключевым элементом разработанной системы является использование диммера для непрерывного регулирования мощности нагревательных элементов вместо традиционного релейного управления. Релейное управление, широко применяемое в промышленных сушильных установках, характеризуется двухпозиционным принципом работы: нагреватели либо включены на полную мощность, либо полностью отключены. Такой подход приводит к значительным колебаниям температуры в рабочей зоне, что негативно сказывается на качестве процесса сушки и энергоэффективности установки. Применение диммера с фазовым управлением симистором обеспечивает плавное изменение мощности нагревательных элементов в диапазоне от 0 до 100% номинального значения. Данное техническое решение позволило реализовать ряд существенных улучшений характеристик системы. Обеспечивается плавное изменение температуры теплоносителя без скачкообразных переходов,

характерных для релейных систем. При двухпозиционном управлении температура циклически изменяется с амплитудой $\pm 5-7^{\circ}\text{C}$ относительно заданного значения, что приводит к неравномерной термической обработке материала и снижению качества волокна. Непрерывное регулирование мощности позволяет поддерживать температуру в узком диапазоне $\pm 0.8-1.0^{\circ}\text{C}$. Достигается значительная экономия электроэнергии. При ручном или релейном управлении операторы вынуждены устанавливать температуру с запасом 5–10% выше расчетной для компенсации колебаний и гарантированного достижения требуемой влажности на выходе. Адаптивная система с диммером поддерживает минимально необходимую мощность нагрева в каждый момент времени, что обеспечивает снижение энергопотребления на 15–18% по сравнению с традиционными методами управления.

Управление диммером реализовано методом фазового регулирования мощности. Физическая суть метода заключается в управлении моментом включения симистора относительно перехода сетевого напряжения через нуль. Переменное напряжение промышленной частоты 50 Гц представляет собой синусоидальный сигнал с периодом 20 мс, дважды за период, проходящий через нулевое значение. Микроконтроллер с помощью схемы детектора нуля фиксирует эти моменты и формирует управляющий импульс на открытие симистора с заданной временной задержкой. Величина задержки определяет угол отсечки α (фазовый угол), который может изменяться от 0 (полная мощность) до π (нулевая мощность).

Зависимость активной мощности нагрузки от угла отсечки описывается выражением:

$$P = P_{\max} \times \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \quad (6)$$

где P – действующая мощность на нагревательных элементах, Вт; P_{\max} – номинальная мощность нагревателей (50 кВт); α –



угол задержки включения симистора, рад ($0 \leq \alpha \leq \pi$).

Данное соотношение получено интегрированием мгновенной мощности синусоидального тока по времени проводимости симистора в течение полупериода сетевого напряжения. Следует отметить, что фазовое регулирование приводит к несинусоидальности потребляемого тока и генерации высших гармоник, однако их уровень при нагрузке резистивного характера (ТЭНЫ) остается в пределах норм, установленных ГОСТ 32144-2013.

Преобразование требуемого значения температуры в соответствующий угол управления симистором осуществляется с помощью ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора) – классического алгоритма автоматического управления с обратной связью. Управляющее воздействие формируется в соответствии с выражением:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

где,

$e(t)$ – ошибка регулирования (рассогласование между заданной и фактической температурой), $^{\circ}\text{C}$;

K_p – коэффициент пропорциональной составляющей;

K_i – коэффициент интегральной составляющей, с^{-1} ;

K_d – коэффициент дифференциальной составляющей, с ;

$u(t)$ – управляющий сигнал, пропорциональный требуемой мощности нагрева.

Алгоритм ПИД-регулирования реализован в микроконтроллере ESP32 с частотой дискретизации 10 Гц. Каждые 100 мс выполняется цикл регулирования: считаются показания цифровых датчиков температуры DS18B20 по протоколу 1-Wire, вычисляется текущая ошибка

регулирования $e(t)$, обновляются значения интегральной и дифференциальной составляющих с использованием численных методов (интеграл по методу трапеций, производная по трехточечной схеме), рассчитывается управляющий сигнал $u(t)$, который затем преобразуется в угол α фазового управления и передается в схему диммера для формирования импульса открытия симистора в следующем полупериоде сетевого напряжения.

Реализованная система автоматического регулирования температуры обладает астатизмом первого порядка и способна компенсировать широкий класс возмущающих воздействий: изменение начальной влажности и температуры поступающего хлопка, вариации производительности установки, колебания температуры и влажности окружающего воздуха, изменение напряжения питающей сети. Экспериментальные исследования показали, что при ступенчатом изменении задания температуры на 10°C система выходит на новый установившийся режим за 30 ± 5 секунд с точностью $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Полный цикл работы системы включает следующие этапы:

1. Инициализация: Загрузка сохранённых значений $\Delta T_{\text{корр}}$ и K из энергонезависимой памяти (при первом запуске: $\Delta T_{\text{корр}} = 0^{\circ}\text{C}$, $K = 2$);

2. Измерение входных параметров: Определение начальной влажности $W_{\text{вход}}$ и производительности P ;

3. Расчёт базовой температуры: $T_{\text{базовый}} = 16,21 \times W^{0,523} \times P^{0,317}$;

4. Применение адаптивной коррекции: $T_{\text{установка}} = T_{\text{базовая}} + \Delta T_{\text{корр}}$;

5. Управление диммером: ПИД-регулятор поддерживает заданную температуру, регулируя мощность ТЭНов;



6. Сушка: Процесс продолжается до завершения цикла (определяется по времени или объёму загрузки);

7. Измерение результата: *Определение фактической влажности* $W_{выход}$ на выходе из барабана;

8. Обучение системы: *Вычисление ошибки, обновление K (формула (5)) и* $\Delta T_{корр}$ (формула 3);

9. Сохранение параметров: *Запись обновлённых значений* $\Delta T_{корр}$ и K в энергонезависимую память;

10. Переход к следующему циклу.

Экспериментальные результаты. Система была испытана в симуляции в программе SUSHKAXS электрической сушилке производительностью 10 т/ч с установленной мощностью ТЭНов 50 кВт. Проведено сравнение трёх режимов работы: **ручное управление** с фиксированной температурой (оператор устанавливает температуру с запасом); **автоматическое управление по формуле (1)** без адаптивной коррекции; **адаптивное управление** с обучением (полная система).

Таблица 3. Сравнительные результаты испытаний (средние за 30 циклов)

Параметр	Ручное управление	Автоматика по формуле	Адаптивная система
Отклонение влажности на выходе, %	± 1.8	± 0.9	± 0.3
Расход на 1 т. кВт·ч	4.26	3.76	3.36
Снижение расхода энергии, %	—	11.7	21.1
Первый запуск: время выхода на режим	3-5 циклов (24-40 минут)	2-3 цикла (16-24 минут)	5-10 циклов (40-80 минут)
После обучения: время адаптации при изменении условий	3-5 циклов	2-3 цикла	1-2 цикла

Как видно из таблицы, адаптивная система обеспечивает существенное снижение энергопотребления (21,1%) по сравнению с ручным управлением при одновременном улучшении качества сушки (отклонение влажности $\pm 0.3\%$ против $\pm 1.8\%$). После завершения **первичного обучения** система обеспечивает **наилучшие показатели точности и энергоэффективности**.

При первом запуске на новом оборудовании в первых 5–7 циклах (40–56 минут) происходит активная фаза обучения – $\Delta T_{корр}$ постепенно

изменяется от 0 до установившегося значения ($+2.3^{\circ}\text{C}$ в данном эксперименте). Это указывает, что базовая формула (1) занижает требуемую температуру на 2.3°C для конкретных условий эксплуатации (влажность воздуха в цехе около 65%, температура 28°C). После 8–10 циклов (64–80 минут) система полностью стабилизируется, и дальнейшие корректировки минимальны – система «выучила» оптимальный режим для данных условий.

Коэффициент усиления K в процессе обучения изменился с начального значения 2.0 до 1.7, что соответствует реальной чувствительности процесса: для изменения влажности на 1% требуется коррекция температуры на 1.7°C .

Заключение. Разработанная адаптивная система продемонстрировала высокую эффективность в реальных промышленных условиях. Основные преимущества:

1. Автоматическая компенсация неучтённых факторов. Система самостоятельно определяет систематические отклонения и корректирует температурный режим без вмешательства оператора. В ходе испытаний выявлено, что формула (1) требует коррекции от -3°C до $+5^{\circ}\text{C}$ в зависимости от условий (влажность воздуха, состояние оборудования, качество хлопка). После завершения обучения эта коррекция сохраняется в памяти системы и применяется автоматически;

2. Адаптация к изменениям. При изменении условий (например, смена сезона, партии хлопка, износ ТЭНов) система автоматически пересчитывает оптимальный режим в течение 3–5 циклов (24–40 минут), что значительно быстрее первичного обучения благодаря накопленному «опыту». Это исключает необходимость ручной настройки;

3. Энергоэффективность. Использование диммера вместо релейного управления в сочетании с адаптивной коррекцией снижает энергопотребление на 21,1% по сравнению с ручным управлением. При средней производительности 10 т/ч это даёт экономию



около 90 кВт·ч за 10-часовую смену, что составляет существенную долю эксплуатационных расходов. В годовом исчислении (при работе 300 дней) экономия составляет около 27 000 кВт·ч;

4. Повышение качества. Точное поддержание влажности на выходе ($\pm 0.3\%$) исключает пересушку волокна, что сохраняет его прочностные характеристики и снижает потери массы. Уменьшение разброса влажности также повышает однородность качества продукции;

5. Накопление данных. Архивирование всех параметров процесса создаёт базу для статистического анализа и дальнейшего совершенствования модели. За год работы накапливается массив из десятков тысяч записей, позволяющий выявить скрытые зависимости и оптимизировать управление.

Список использованной литературы

1. Маматов А.З. Моделирование технологии сушки хлопка-сырца с целью повышения качества волокна. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Ташкент, 1995.
2. Абдуллаев Х.А., Рахимов С.Р. Теплофизические свойства хлопка-сырца и их влияние на качество волокна. – Ташкент: Фан, 1985.
3. Исмаилов Ш.И., Каримов М.К. Теплообмен в волокнистых материалах при переработке хлопка. Ташкент: Узбекистан, 1990.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1975.
5. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. – Springer, 2006.
6. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. – ISA, 2006.
7. Wang H., Li X. Heat and mass transfer in fibrous materials // Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 118. – P. 045301.
9. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – MIT Press, 2016.
10. Справочник по первичной обработке хлопка. Ташкент. Мехнат». 1994 г.
11. Кулагин А.Н. Физические исследования по хлопку. Ташкент АН Уз Р. 1962г.
12. Щеколдин М.Н. Тепло влажностные состояния хлопка-сырца. Москва 1968г.

13. Кузьмин В.Н. Влияние сушки и очистки хлопка-сырца на качество волокна. (обзор) Ташкент, УзНИИНТИ. 1972г.

14. Волокно хлопковое. «Технические условия». О'з DSt 604:2016

15. Dott M.G. and Satain M.Z. The effect of thermal treatment on the cruscerized cotton. //J of the textile institute. V 67. № 718. 1976. p.229-234.

16. Mamatov, A., Parpiev, A., Shorakhmedova, M. Mathematical model for calculating the temperature field of a direct-flow drying drum. Journal of Physics: Conference Series this link is disabled, 2021, 2131(5), 052067

17. Mamatov, A., Bakhramov, S., Narmamatov, A. An approximate solution by the Galerkin method of a quasilinear equation with a boundary condition containing the time derivative of the unknown function. AIP Conference Proceedingsthis link is disabled, 2021, 2365, 070003

18. Mamatov, A.Z., Usmankulov, A.K., Abbazov, I.Z., Norboyev, U.A., Mukhametshina, E.T. Determination of Temperature of Components of Cotton-Raw Material in a Drum Dryer with a Constant. IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences this link is disabled, 2021, 939(1), 012052

19. Mamatov, A.Z., Pardaev, X.N., Mardonov, J.S.H., Plekhanov, A.F. Determining of the heat-moisture state of raw cotton in a drum dryer. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennostis this link is disabled, 2021, 391(1), C. 46–49.

20. K.Zhamuratov, X.Umarov, A.Dodobayev, Drainage of a Semi-infinite Aquifer in the Presence of Evaporation // International Scientific and Practical Conference on Actual Problems of Mathematical Modeling and Information Technology, AIP Conf. Proc. 3147, 030036-1 - 030036-6, (2024), <https://doi.org/10.1063/5.02102>.

