

УДК 681.5:621.313.8

***Гибадулин Руслан Рашитович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

***Сидоренко Максим Сергеевич,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

***Колесников Евгений Александрович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАТЯЖЕНИЕМ
МАТЕРИАЛА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕРВОПРИВОДОВ**

Аннотация. Рассматривается построение автоматизированной системы стабилизации натяжения непрерывного ленточного материала в технологической линии на основе согласованного управления сервоприводами разматывающего, транспортирующего и наматывающего узлов. Предложена структура двухконтурного регулирования, в которой контур скорости обеспечивает требуемую производительность линии, а контур натяжения формирует корректирующее воздействие на момент или скорость ведомого сервопривода. Учтено изменение радиуса рулона и

момента инерции в процессе перемотки. Сформирован алгоритм работы системы, предусматривающий пуск, установившийся режим, переходные процессы и аварийную остановку. Приведен расчетный пример, демонстрирующий влияние компенсации радиуса рулона на точность поддержания натяжения. Предлагаемый подход может применяться в рулонных, упаковочных, полиграфических, текстильных и других технологических линиях.

Ключевые слова: натяжение материала, сервопривод, автоматизация, технологическая линия, рулонный материал, обратная связь, ПИД-регулятор, мехатронная система.

Annotation: The paper considers an automated system for stabilizing the tension of continuous web material in a technological line by coordinated control of servo drives of unwinding, transport and rewinding units. A two-loop control structure is proposed: the speed loop maintains line productivity, while the tension loop generates a correction for the torque or speed of the controlled servo drive. Variations in roll radius and inertia during rewinding are taken into account. The operating algorithm covers start-up, steady-state operation, transients and emergency stop. A calculation example illustrates the effect of roll-radius compensation on tension accuracy. The approach can be applied to roll-to-roll, packaging, printing, textile and related production lines.

Key words: material tension, servo drive, automation, technological line, web material, feedback, PID controller, mechatronic system.

Рассмотрим участок технологической линии, содержащий разматывающий рулон, ведущий транспортирующий вал и наматывающий рулон. Каждый активный узел оснащается сервоприводом. Базовая линейная скорость материала задается транспортирующим валом, а требуемое натяжение формируется небольшим рассогласованием окружных скоростей соседних приводных элементов.

При установившемся движении связь между моментом на валу рулона и силой натяжения может быть представлена приближенным соотношением $M = F \cdot R + M_c$, где M - электромагнитный момент сервопривода, F - сила натяжения полотна, R - текущий радиус рулона, M_c - приведенный момент сопротивления. Следовательно, при постоянном требуемом натяжении необходимый момент изменяется пропорционально радиусу рулона.

Дополнительной особенностью объекта является изменение приведенного момента инерции. По мере намотки радиус и масса рулона возрастают, поэтому динамические свойства канала управления меняются. При размотке наблюдается обратный процесс. Если регулятор настроен только для одного состояния рулона, качество переходных процессов на других стадиях цикла может ухудшаться.

Задача системы управления формулируется как минимизация ошибки $e_F(t) = F_{\text{зад}} - F_{\text{физм}}$ при одновременном соблюдении ограничений по скорости, ускорению, моменту сервоприводов и допустимому диапазону натяжения материала.

Предлагаемая система включает три сервопривода, датчик натяжения, энкодеры приводов, программируемый логический контроллер и панель оператора. Датчик натяжения устанавливается на измерительном ролике между технологическими секциями. Сигнал поступает в контроллер, где сравнивается с заданием. Регулятор натяжения формирует корректирующее воздействие для ведомого сервопривода. Скоростные контуры сервоприводов реализуются во встроенных приводных контроллерах.

Таблица 1.

Функциональные элементы системы управления натяжением

Элемент	Назначение	Контролируемый параметр
Сервопривод размотчика	Управление выдачей материала	Скорость/момент
Сервопривод ведущего вала	Формирование скорости линии	Линейная скорость
Сервопривод намотчика	Стабилизация натяжения и намотка	Скорость/момент
Датчик натяжения	Измерение силы в полотне	Физм

Энкодеры	Контроль положения и частоты вращения	φ, ω
ПЛК	Координация осей и расчет коррекции	eF, R , задания

Для повышения устойчивости рекомендуется разделить функции регулирования. Ведущий сервопривод работает в режиме стабилизации скорости, определяя производительность линии. Сервопривод намотчика или размотчика получает базовое задание скорости, рассчитанное по линейной скорости полотна и текущему радиусу, а поверх него вводится корректирующая составляющая от регулятора натяжения.

Такое построение позволяет избежать ситуации, когда два независимых регулятора одновременно пытаются изменять одну и ту же технологическую величину. Координация осей осуществляется на уровне ПЛК или контроллера движения. При наличии высокоскоростной промышленной сети задания и фактические значения передаются циклически.

Линейная скорость поверхности рулона определяется выражением $v = \omega R$. Поэтому при изменении радиуса R для сохранения постоянной скорости полотна угловая скорость должна изменяться обратно пропорционально радиусу: $\omega_{\text{зад}} = v_{\text{зад}} / R$.

Текущий радиус может определяться непосредственным датчиком расстояния либо вычисляться по длине намотанного материала. Для рулона с начальным радиусом R_0 и толщиной материала h приближенная зависимость имеет вид $R = \sqrt{(R_0^2 + hL/\pi)}$, где L - накопленная длина материала. В практической системе оценку целесообразно корректировать по данным энкодеров и дискретным измерениям диаметра.

Контур натяжения может быть реализован ПИД-регулятором: $u_F(t) = K_p \cdot e_F(t) + K_i \int e_F(t) dt + K_d \cdot de_F(t)/dt$. Выход u_F интерпретируется как поправка к заданию момента либо скорости сервопривода. Для защиты от насыщения интегральной составляющей необходимо использовать anti-windup и ограничение управляющего сигнала.

При работе с эластичным материалом изменение натяжения связано также с относительным удлинением участка полотна. В упрощенном виде $F=EA \cdot \Delta l/l$, где E - модуль упругости, A - площадь поперечного сечения, l - длина свободного участка. Это объясняет, почему даже небольшое рассогласование скоростей приводов может создавать заметное изменение силы натяжения.

Перед запуском оператор задает технологическую скорость, требуемое натяжение и допустимые пределы. Контроллер проверяет готовность сервоприводов, исправность датчика натяжения, состояние защитных цепей и наличие материала. После подтверждения готовности выполняется предварительное натяжение на малой скорости.

Разгон производится по согласованным S-образным профилям. Ведущая ось формирует скорость линии, а ведомые оси получают синхронизированные задания с учетом текущих радиусов. После выхода в рабочий диапазон активируется замкнутый контур натяжения. Резкое включение регулятора при нулевой скорости нецелесообразно, поскольку статическое трение и люфты могут вызвать бросок управляющего воздействия.

В установившемся режиме ПЛК циклически считывает Физм, рассчитывает ошибку, обновляет оценку радиуса, формирует поправку и контролирует ограничения. При изменении задания скорости используется упреждающая компенсация: базовые угловые скорости осей пересчитываются до того, как ошибка натяжения станет значительной.

При превышении допустимого натяжения сначала ограничивается момент ведомой оси и инициируется управляемое замедление. При обрыве материала, отказе датчика или аварии привода выполняется согласованная остановка. Общие требования безопасности автоматических линий должны учитываться при проектировании аппаратных блокировок и аварийных цепей [2].

Для оценки принципа работы рассмотрим расчетную, а не экспериментальную модель намоточного узла. Заданное натяжение $F_{\text{зад}}=120$

Н. Радиус рулона изменяется от 0,10 до 0,25 м, линейная скорость материала составляет 1,5 м/с. Момент сопротивления для упрощения не учитывается.

Таблица 2.

Расчет изменения задания сервопривода при росте радиуса рулона

R, м	$\omega_{зад}$, рад/с	М для F=120 Н, Н·м	n, об/мин
0,10	15,00	12,0	143,2
0,15	10,00	18,0	95,5
0,20	7,50	24,0	71,6
0,25	6,00	30,0	57,3

Расчет показывает, что при увеличении радиуса в 2,5 раза требуемая угловая скорость намотчика уменьшается с 15 до 6 рад/с, тогда как момент, необходимый для формирования того же натяжения, возрастает с 12 до 30 Н·м. Следовательно, использование постоянного задания скорости или момента без учета радиуса принципиально не обеспечивает одинакового режима на протяжении всего цикла.

Введение расчетной компенсации радиуса переносит основную часть изменения управляющего воздействия в канал упреждения. Контур обратной связи в этом случае компенсирует главным образом погрешность модели, трение, упругие колебания и внешние возмущения. Такой принцип снижает требуемую амплитуду коррекции и позволяет выбирать более умеренные коэффициенты регулятора.

Для практической реализации целесообразно применять сервоприводы с цифровыми энкодерами и возможностью работы в режимах регулирования скорости и момента. Мощность двигателя выбирается по максимальным значениям момента, скорости и ускорения с учетом инерции рулона. Особое внимание следует уделять перегрузочной способности привода на разгоне и торможении.

Датчик натяжения должен обладать диапазоном измерения, соответствующим свойствам материала, и достаточной полосой пропускания. Слишком медленный измерительный канал ухудшает подавление возмущений, а избыточное усиление высокочастотной составляющей

приводит к реакции привода на шум. Поэтому в измерительном тракте применяется цифровая фильтрация, причем ее постоянная времени согласуется с динамикой механической системы.

Сервоприводы позволяют программно изменять ограничения момента и ускорения для различных рецептов продукции. Это особенно важно для линий, работающих с материалами различной толщины и жесткости. Рецепт может содержать $F_{зад}$, рабочую скорость, допустимое ускорение, начальный диаметр рулона, толщину материала и параметры регулятора.

Основным результатом внедрения автоматизированного регулирования является снижение колебаний натяжения при изменении скорости линии и диаметра рулона. Для рулонных процессов это связано с уменьшением складкообразования, продольного растяжения и дефектов намотки. В системах перемотки учет изменяющегося диаметра традиционно рассматривается как существенный фактор повышения точности регулирования [3].

Преимущество сервоприводной схемы заключается также в возможности диагностики. Контроллер получает данные о токе, моменте, скорости и положении каждой оси. Сопоставление этих величин с сигналом датчика натяжения позволяет выявлять проскальзывание, заклинивание роликов, неверную оценку радиуса и деградацию механических узлов.

Предложенная архитектура применима не только к намотке. Аналогичный принцип может использоваться между двумя технологическими секциями, например печатной и сушильной, когда требуется стабилизировать натяжение полотна при независимом управлении скоростями секций. В этом случае вместо радиусной компенсации основной задачей становится синхронизация линейных скоростей.

В основу положено разделение функций: ведущая ось формирует линейную скорость, а ведомая ось корректирует скорость или момент по сигналу обратной связи натяжения.

Показана необходимость учета переменного радиуса рулона. Расчетный пример демонстрирует, что при сохранении постоянной линейной скорости рост радиуса требует одновременного снижения угловой скорости и увеличения момента сервопривода. Поэтому компенсация радиуса должна входить в базовый алгоритм управления, а замкнутый регулятор использоваться для устранения остаточной ошибки и возмущений.

Предлагаемый подход объединяет средства мехатроники и автоматизации технологических процессов: сервоприводы, датчики, ПЛК, алгоритмы координации осей и обратную связь. Дальнейшее развитие работы может быть связано с адаптивной настройкой регулятора при изменении момента инерции, оцениванием натяжения по модели при отказе датчика и экспериментальной проверкой алгоритма на лабораторном стенде.

Использованные источники:

1. Development of PLC-based Tension Control System // Chinese Journal of Aeronautics. 2007. Vol. 20, No. 3. P. 266–271.
2. ГОСТ 12.2.119-88. Система стандартов безопасности труда. Линии автоматические роторные и роторно-конвейерные. Общие требования безопасности.
3. Устройство для автоматического регулирования натяжения полосы при перемотке: авторское свидетельство СССР № 1599141.
4. ГОСТ 27879-88. Линии автоматические роторные и роторно-конвейерные. Общие технические требования.
5. ГОСТ 14334-87. Линии автоматические роторные и роторно-конвейерные. Термины и определения.
6. Каунг Пьей Аунг. Автоматическая система стабилизации тягового фактора двухприводного ленточного конвейера // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. 2018. № 4.
7. Устройство для регулирования натяжения ленточного материала: патент РФ № 2536488.

8. Устройство для регулирования натяжения ленточного материала при намотке в рулон: авторское свидетельство СССР № 1004237.