

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ МНОГОДВИГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Н.Н. Подзоров (ООО «КоСПА»),

М.Г. Бычков (ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ»)

*Рассмотрены последовательность модернизации и полученные результаты для станка-автомата горячего тиснения фольгой, предназначенного для нанесения печати цветной фольгой с поверхности клише на боковую поверхность колпачков (крышек) для емкостей различного назначения.*

*Ключевые слова: многоосевой контроллер управления движением, циклический режим работы, контур позиционирования, системы ЧПУ, мини- и микро-ПЛК.*

В настоящее время электропривод является наиболее распространенным типом привода в различных производственных машинах и механизмах. Для значительной части электроприводов как отдельных установок, так и групп машин, объединенных общим технологическим процессом, характерен циклический график работы. Электроприводы этих машин должны включаться и отключаться в определенной последовательности, осуществляя на каждом участке цикла движение рабочих органов машин с требуемыми ускорениями, скоростями и перемещениями в нужном направлении [1]. В многодвигательном приводе отдельные рабочие органы машины и вспомогательные механизмы приводятся в движение индивидуальными двигателями через свою систему передач. Такой электропривод позволяет получать компактную конструкцию машины, применять автоматическое управление.

### Причины модернизации станков с электрическим приводом

Электропривод, как и любое техническое устройство, имеет свой установленный срок службы и подвергается в процессе эксплуатации износу. В экономической науке принято различать два типа износа. Физический износ в экономическом смысле является утратой первоначальной потребительской стоимости, причинами которого может быть снашивание, ветхость или устаревание. Моральный износ представляет собой потерю экономической эффективности и целесообразности использования фондов до наступления окончания срока их полного физического износа. В то же время начисляемый износ в размере 100% стоимости на объект, еще пригодный для дальнейшей эксплуатации, не может являться причиной его списания на основании полного износа.

Современные электродвигатели и электроприводы на их основе имеют достаточно длительный срок службы, во многих случаях превышающий срок морального износа оборудования, в котором они используются. Например, в ГОСТ Р 51137-98 для регулируемых асинхронных электроприводов объектов энергетики устанавливается срок службы до списания: двигателя — ≥20 лет, остальных составных частей — ≥15 лет. Одним из способов преодоления указанного противоречия может стать модернизация технологических установок. В общем виде концепция, стратегия и механизм ре-

ализации модернизации предприятий промышленности рассмотрены, например в [2].

Для многих предприятий реконструкция, техническое перевооружение, модернизация оборудования — наболевшие проблемы. В ходе перевооружения выполняется разработка и внедрение улучшенной технологии производства, а также оптимизация существующих производств. При этом должны быть достигнуты следующие цели:

- 1) увеличение эффективности существующего оснащения в результате уменьшения расходов на выпуск одной единицы продукции;
- 2) наращивание объемов производства;
- 3) повышение качества производимой продукции (изделий, деталей, оборудования);
- 4) увеличение ассортимента продукции;
- 5) повышение энергетической эффективности производства.

Модернизация автоматизированных систем управления для технологических установок часто имеет специфическую проблему, заключающуюся в том, что приобретаемое совместно с объектом программное обеспечение является «закрытым», что делает невозможным его видоизменение при замене как управляемых им электроприводов, так и самих аппаратных средств автоматизации. Фактически это означает необходимость полной замены аппаратных и программных средств с разработкой собственного программного приложения пользователя, реализующего все необходимые алгоритмы управления оборудованием.

Типовым решением при построении системы согласованного управления многодвигательным электроприводом является распределенная структура, состоящая из ведущего контроллера управления движением на базе мини- и микро-ПЛК, выполняющего функции генератора траектории движения по каждой оси, и требуемого числа подчиненных ему систем управления индивидуальных сервоприводов, обрабатывающих заданные траектории движения. Основные усилия разработчиков современных сервоприводов направлены на улучшение их удельных показателей, быстродействия и точности обработки заданных параметров движения, что достигается как совершенствованием и адаптацией конструкции собственно электродвигателя для конкретных применений (direct drive), так и непрерывным развитием аппаратно-программных микропроцессорных ком-

плексов и построенных на их основе структур систем управления. Однако этим не исчерпывается перечень направлений исследований и разработок. Так в [4] выделено 12 тенденций развития систем управления движением. Предполагается, что следующие пять лет тенденция в управлении движением — оцифровывание производственных процессов. Чтобы улучшить качество новых разработок и уменьшить время разработки и затраты, много операций будет осуществляться в цифровых процессах: обучение, адаптация и инновация. Каждая новая концепция в управлении движением начинается с переговоров с текущими клиентами. Как эти продукты и технологии попадают в использование — и их эффективность — определит план действий для будущих разработок. Основываясь на упомянутом выше, можно утверждать, что современные компоненты сервосистем дают все необходимые инструменты для модернизации существующих систем многодвигательных электроприводов технологических установок различного назначения.

**Станок горячего тиснения фольгой и технологические особенности**

Рассмотрим последовательность модернизации и полученные результаты на примере станка-автомата

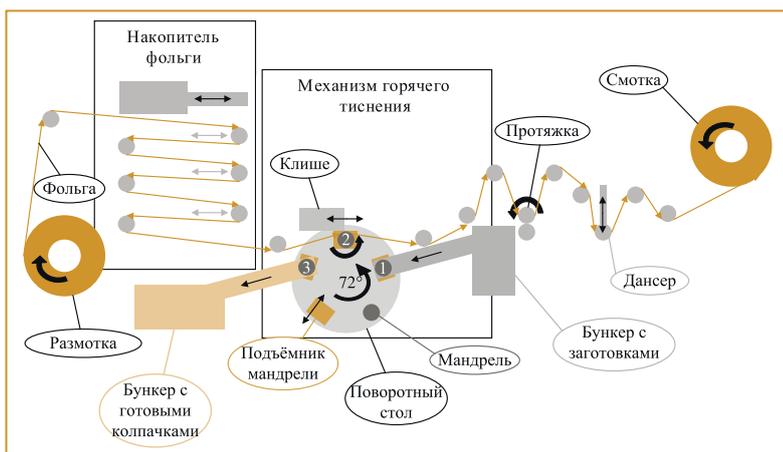


Рис. 1. Упрощенная схема цикла движения одной крышки

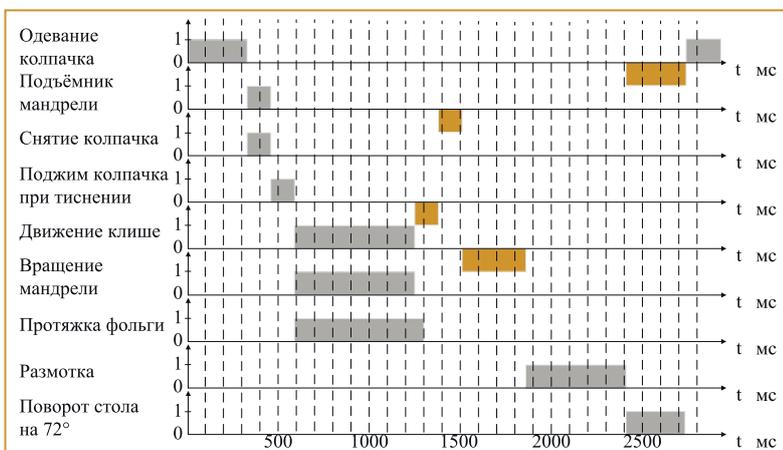


Рис. 2. Циклограмма последовательности срабатывания элементов станка до модернизации

СН-400 горячего тиснения фольгой, предназначенного для нанесения печати с поверхности клише цветной фольгой на боковую поверхность колпачков (крышек) для емкостей различного назначения. Упрощенная кинематическая схема станка показана на рис. 1.

С точки зрения технологии схема станка состоит из: бункера (контейнера) с заготовками, рукава подачи колпачков (крышек) на мандрели (цилиндрическая оправка на которую одевается заготовка) поворотного стола, пневмо-механизма одевания колпачка в позиции 1, механизма тиснения фольги, пневмо-механизма сброса колпачков с нанесенным изображением в бункер готовых изделий. Основная технологическая операция нанесения фольги на заготовку, плотно надетую на мандрель, происходит в позиции 2, когда мандрель поднимается в верхнее состояние (во внешнюю сторону от центра стола), и состоит в синхронном повороте данной мандрели по часовой стрелке на 360° и соответствующем горизонтальном перемещении слева направо клише с наносимым рисунком. Затем мандрель опускается, теряя контакт с клише. После чего клише перемещается справа налево, возвращаясь в исходную позицию. Поворотный стол своим вращением против часовой стрелки на 72° перемещает мандрель с готовым колпачком в позицию 3 его сброса в бункер (контейнер) готовых изделий. Одновременно новая мандрель с заготовкой из промежуточной позиции 1 попадает в рабочую позицию 2, после чего основная технологическая операция повторяется.

В полном технологическом цикле станка присутствует ряд вспомогательных операций, к которым относятся: поддержание натяжения и перемотка фольги, надевание и сдвиг колпачка с мандрели, поддержание температуры клише, контроль надевания/снятия колпачка, позиционирование колпачка при тиснении сложного рисунка и т.д. Одной из основных вспомогательных функций является поддержание натяжения фольги с заданным усилием на всем промежутке тиснения и ее перемотка во время технологического цикла. Новая фольга сматывается с бобины размотки на заданную длину и запасается для одного цикла тиснения на пневматическом накопителе фольги. Затем во время цикла тиснения пневматические элементы сжимаются за счет технологической операции нанесения фольги, описанной ранее. Отработанная фольгированная пленка выравнивается протяжкой синхронно с циклом тиснения, так как фольга не должна провисать во время этого цикла. После протяжки она запасается пневматическим дансером (пневматическим механизмом поступательного действия) для равномерной подачи на смотку. Максимальный ход

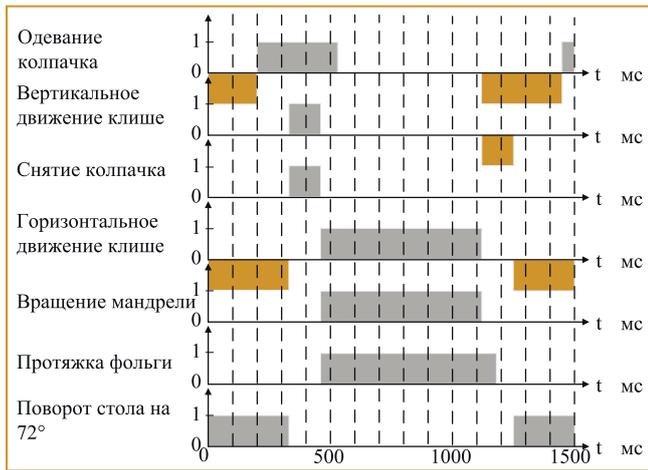


Рис. 3 Циклограмма последовательности срабатывания элементов станка после модернизации

дансера в 1,5...2 раза больше длины фольги, применяемой в цикле движения, что предотвращает его выход в крайнее максимальное положение.

**Исследования конструкции и алгоритма работы**

В результате предварительных исследований конструкции и алгоритма работы существующего оборудования станка было установлено, что механическая составляющая станка позволяет развить большую производительность при некоторых доработках узла основной технологической операции. Электрическая часть морально устарела, а также производитель оборудования «закрыл» доступ к изменению параметров привода и системы управления, поэтому алгоритм до модернизации изменению не подлежит, так как к нему нет доступа. При модернизации придется заменять электрическую часть на «открытую» для персонала, производящего модернизацию.

Последовательность срабатывания основных элементов станка до модернизации представлена на рис. 2. Циклограмма построена с учетом максимального быстродействия станка. На циклограмме не указана ось смотки, так как она всегда находится во включенном состоянии. Нулевое состояние элемента соответствует его бездействию, положительное (единица) соответствует положительному движению механизма, а отрицательное (минус единица) соответствует обратному движению механизма. Таким образом, можно увидеть, какой элемент срабатывает в определенный момент времени, и что следует после его выполнения.

Анализ циклограммы показал, что для сокращения времени цикла требуется произвести изменения в механике станка и алгоритме работы. В механике требуется уйти от подъема мандрели, жестко закрепив ее на столе, но при этом нужно обеспечить вертикальный ход клише (установив шарико-винтовую пару). Таким образом, когда контакт клише и мандрели разорвется, стол может свободно вращаться, пока поднятое клише выходит в исходную позицию.

В алгоритме срабатывания элементов часть движений можно выполнять параллельно, а не последовательно. Параллельное выполнение действий уменьшает общее время выполнения одного цикла.

Циклограмма последовательности срабатывания элементов при параллельном выполнении действий показана на рис. 3. Время выполнения действий на циклограмме оставлено прежним (максимальная производительность станка до модернизации). Сравнение циклограмм рис. 2 и 3 показывает, что время выполнения одного цикла при последовательном выполнении составляет 2700 мс, а при параллельном — 1250 мс. Следовательно даже при сохранении неизменными значений времени выполнения отдельных операций производительность станка может быть увеличена в 2,16 раза.

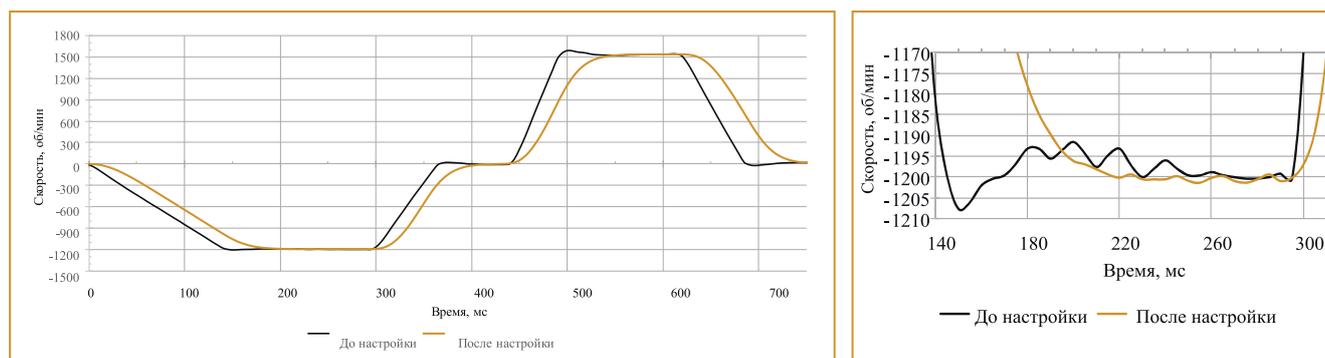
Помимо оптимизации рабочего цикла, при модернизации было установлено современное сервоприводное оборудование, что потенциально должно улучшить показатели производительности в еще большей степени.

В качестве основной цели модернизации было задано повышение производительности с 26 изделий в минуту до 40...50 изделий. Если использовать полученные теоретические оценки, то производительность можно увеличить до  $2,16 \cdot 26 = 56$  изделий в минуту.

**Контроллер управления движением**

При подборе электрических компонентов для модернизации принято решение реализовывать систему управления станка на контроллере управления движением, имеющим для связи с сервоприводами канал специализированного цифрового интерфейса Mechatrolink II. Такое решение позволяет получить высокую скорость обмена и помехозащищенность данных. Контроллер программируется на языке программирования, соответствующем МЭК 61131-3 (IEC 61131-3) или стандарту PLCopen.

Прикладное программное обеспечение контроллера состоит из примерно 20 разнообразных программ, описывающих: работу электроавтоматики, передачу данных между панелью оператора и контроллером или модулями входов/выходов, поддержание натяжения фольги, тиснения фольги на колпачок, работу пневматических элементов и т.д. Они распределены между шестью задачами. При этом каждая задача имеет свой номер приоритета и заданное время для циклического выполнения находящихся в ней программ. Время выполнения задается в диапазоне 1...5000 мс. Самые приоритетные задачи связаны с движением, так как в технологическом процессе очень важно точное перемещение. Цикл передачи данных с сервоприводами по Mechatrolink II выбран в соответствии с рекомендациями производителя контроллеров и для семи осей составляет 1 мс. Наименее приоритетные задачи — передача данных между панелью оператора и контроллером. Панель оператора и модули дискретного (и/или аналогово-



а) Вращение вала двигателя клише

б) Выход на установившуюся скорость в рабочем цикле

Рис. 4. Тахограмма скорости вращения вала двигателя до и после настройки

Таблица 1

Параметр	До настройки	После настройки
Расчетный момент инерции на валу двигателя, % от номинального	100	90
Пропорциональный коэффициент контура скорости, Гц	40,0	239,9
Интегральный коэффициент контура скорости, мс	20,00	2,65
Пропорциональный коэффициент контура позиции, 1/с	40,0	359,8

го) ввода/вывода подключены к контроллеру через Modbus TCP и Ethernet/IP.

### Настройка электрического привода на механику станка

При конфигурации оборудования в контроллере параметры всех устройств устанавливаются по умолчанию. Отладке алгоритма управления предшествует настройка сервоприводов в соответствии с механикой станка: настроить электронный редуктор, настроить контур скорости и позиции.

Электронный редуктор — это программное передаточное число между импульсами датчика обратной связи двигателя и реальным перемещением рабочего органа. Предназначен для упрощения программирования, так как позволяет пользователю работать в конечных единицах перемещения рабочего органа. Задается в сервопривод и представляется как числитель и знаменатель. После настройки электронного редуктора произведены контрольные движения и замер перемещений для проверки адекватности рассчитанных параметров.

Настройка контура скорости состоит в получении требуемого качества переходных процессов за счет изменения параметров контура регулирования. На рис. 4 в качестве примера приведены тахограммы скорости вращения вала двигателя клише, а в табл. 1 — значения параметров регуляторов до и после настройки на механику станка.

Таблица 2

Привод	Режим работы
Поворотный стол	Позиционирование
Размотка	Удержание момента
Смотка	Удержание момента
Протяжка	Позиционирование
Горизонтальное движение клише	Позиционирование. Ведущая ось для мандрели
Мандрель	Позиционирование. Ведомая ось от горизонтального движения клише
Вертикальное перемещение клише	Позиционирование

Задание установившейся скорости во время настройки установлено в соответствии со скоростями при максимальной производительности до модернизации. Во время настройки контуров скорости и позиции на сервопривод задавалось одинаковое задание: разгон до 1200 об/мин, тиснение фольги на крышку и торможение, после чего возврат в исходную точку. Разгон перед тиснением более плавный, так как в это время производится синхронизация по позиции клише и мандрели, а торможение и возврат на исходную позицию производится с максимальным ускорением и торможением.

Основное требование к настройке сервоприводов, участвующих в процессе тиснения фольги, — перерегулирование не должно превышать 0,2% от заданной величины, так как тиснение фольги происходит на установившейся скорости, где важна точность поддержания скорости и синхронность позиции между мандрелью и клише. Этому требованию не удовлетворяет тахограмма до настройки (рис. 4, б).

Увеличение в 6 раз пропорционального коэффициента усиления контура скорости и уменьшение интегрального коэффициента в 7,5 раза позволили получить монотонный характер переходного процесса после настройки (рис. 4, б)

Помимо настройки сервопривода была включена функция разгона по S-образной траектории, что замедлило разгон и торможение серводвигателя суммарно на 20 мс (на разгон 10 мс и на торможение 10 мс), но зато уменьшило удары в передаточных механизмах между валом двигателя и рабочим органом. В результате настройки требуемое для тиснения условие выполняется быстрее, но при этом время от разгона до полного торможения осталось практически неизменным, что дает выигрыш в производительности.

Остальные сервоприводы настроены по аналогии. Отличием в выполнении настройки являлась роль привода в технологическом процессе (табл. 2).

**Результаты модернизации и дальнейшие исследования**

В результате модернизации удалось увеличить производительность станка до 50 изделий в минуту, соответствующих требуемым показателям качества тиснения. Производительность увеличена за счет реализации нового оптимального алгоритма управления сервоприводами и электроавтоматикой станка в соответствии с циклограммой (рис. 3). Максимальная производительность станка (с ухудшением качества продукции) составила 100 крышек в минуту. При такой производительности существенное влияние на готовый продукт оказывает: качество мандрелей, зацепление мандрели и привода ее вращения, динамика системы накопления фольги и т. д.

Дальнейшими исследованиями модернизированной системы многодвигательных электроприводов станка будут анализ возможности повышения производительности до 80...100 изделий в минуту при сохранении требуемого качества тиснения, что соот-

ветствует производительности аналогичных современных станков, имеющихся на рынке. Для этого будет построена имитационная компьютерная модель механизма горячего тиснения с учетом имеющихся в нем упругостей и зазоров, на которой будут выявлены причины, вызывающие ухудшение качества тиснения фольгой, и исследованы способы их устранения. Такой подход позволит минимизировать время простоя станка и оптимизировать проведение опытов с уже модернизированным оборудованием.

**Список литературы**

1. *Зимин Е.Н.* Автоматическое управление электроприводами. - 1979, 320 с.
2. *Трофимов О.В., Ефимычев Ю.И., Ефимычев А.Ю., Шипилов А.Г.* Модернизация предприятий промышленности: концепция, стратегии и механизм реализации // Креативная экономика. 2011. № 11.
3. *Jaster M.* 12 Current Trends in Motion Control // Power Transmission Engineering. March. 2018. www.powertransmission.com

*Подзорov Никита Николаевич – главный специалист по приводной технике ООО «КоСПА»,  
Бычков Михаил Григорьевич – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ».  
Контактный телефон (915) 170-30-34.*

**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КОНЦЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БАЛЛИСТИЧНЫХ РАКЕТНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ (БРТТ)**

**О.Г. Тюрин (ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова), А.Е. Голубев (АО «НИИПМ»),  
О.А. Корнелюк, Д.Ю. Незнахин (Фирма «Пластик Энтерпрайз»)**

*Описана модернизация технологического процесса изготовления изделий из БРТТ путем внедрения современных робототехнических комплексов на всех производственных фазах концевых операций, что позволяет объединить отдельные операции в поточно-механизированную линию, вывести персонал из опасных зон, повысить качество изделий, увеличить производительность.*

*Ключевые слова: робототехнический комплекс, механическая обработка, контроль геометрических размеров, бронирование.*

Ракетные заряды из БРТТ получают методом проходного прессования с последующим доведением до заданной формы механической обработкой и бронированием. Многообразие форм зарядов вызывает необходимость проведения разнообразных операций от простой торцовки на необходимую длину до получения изделий сложных форм с различными конусами, выточками, уступами и т. д. [1, 2]. Процесс механической обработки также осложняется особенностями высокоэнергетических материалов, в первую очередь высокой пожароопасностью данной операции, требующей специальных мер защиты.

Сотрудниками фирмы «Пластик Энтерпрайз» совместно с АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» выполнена работа по модернизации технологического процесса изготовления изделий из БРТТ путем внедрения современных робототехнических комплексов на всех производственных фазах концевых операций, что позволяет объединить отдельные операции в поточно-механи-

зированную линию, вывести персонал из опасных зон, повысить качество изделий, увеличить производительность. Модернизированное производство включает взаимосвязанный набор отдельных комплексов: механической обработки, контроля геометрических размеров, лакирования, бронирования изделий, вклеивания втулок.

**Робототехнический комплекс механической обработки изделий из БРТТ**

Ракетные заряды из БРТТ имеют сложную форму, поэтому после проходного прессования проводится специальная механическая обработка заготовок для придания им необходимой конфигурации и размеров. Структурная схема комплекса механической обработки приведена на рис. 1.

Робототехнический комплекс включает два токарных станка с ЧПУ, робот-манипулятор, шлюзовые транспортные системы для загрузки и выгрузки обрабатываемых изделий, систему сбора и удаления