

УДК 681.518

doi:10.18720/SPBPU/2/id-128

А.А. Евсиков¹, В.А. Коковин², А.П. Леонов³, А.Н. Сытин⁴

ОБ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОСТИ И УНИВЕРСАЛЬНОСТИ СЕРВОПРИВОДОВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ



¹Александр Александрович Евсиков, к.т.н., доцент,
Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино",
кафедра АТПИП, Россия, Протвино, Московская область,
Северный пр.9 Тел.: (4967)31-01-95, E-mail: aaa@uni-protvino.ru.



²Валерий Аркадьевич Коковин, к.т.н., доцент,
Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино",
кафедра АТПИП, Россия, Протвино, Московская область,
Северный пр.9.
Тел.: (4967)31-02-34, E-mail: kokovin@uni-protvino.ru.



³Анатолий Петрович Леонов, к.т.н., доцент Государственный
университет "Дубна", Филиал "Протвино", кафедра АТПИП,
Россия, Протвино, Московская область, Северный пр.9.
Тел.: (4967)31-02-34, E-mail: anatoli.leonov@gmail.com



⁴Александр Николаевич Сытин, д.ф.-м.н.,
Государственный университет "Дубна", Филиал "Протвино",
кафедра АТПИП, Россия, Протвино, Московская область,
Северный пр.9, Тел.: (4967)31-0190, E-mail:
alexander.sytin@gmail.com

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы интеллектуализации и универсализации сервоприводов, которые являются ключевым элементом автоматизированных систем управления технологическими процессами и производствами. Проанализированы технические решения, направленные на повышение качества управления движением, на оптимизацию взаимодействия сервопривода с другим оборудованием распределенной

автоматизированной системы. Рассмотрены проблемы кибербезопасности оборудования, методы сетевой защиты оборудования на неконтролируемых участках промышленной сети, физически доступных для злоумышленников.

Ключевые слова: сервопривод, векторное управление, система подчиненного управления, цифровой ПИД-регулятор, настройка на технический оптимум, кибербезопасность.

Введение

В настоящее время происходит обновление основных фондов в таком ключевом и перспективном направлении экономики как автоматизация технологических процессов и производств. Стремительное развитие цифровых технологий способствует внедрению автоматизированных процессов во все области производства [1].

Ключевым элементом автоматизированной системы управления технологическим процессом или производством, определяющим её функциональные возможности, исключая влияние человеческого фактора на производительность и точность обработки изделий или на качество выполнения технологического процесса, является сервопривод переменного тока с векторным (частотным) управлением [2,3].

Интеллектуальность повышает качество управления движением, придает приводу большую гибкость, и за счет оптимизации взаимодействия сервопривода с другими элементами автоматизированной системы управления расширяет её функциональные возможности.

Универсализация является одним из ключевых моментов, который дает инженерам возможность применять сервопривод в широком спектре оборудования, включая научные исследования, промышленность, транспорт и другие сферы деятельности.

Интеллектуализация современных сервоприводов предполагает обеспечение киберзащиты при взаимодействии распределенных технологических подсистем и в системах контроля физического доступа.

Анализ работ по теме исследования

Сервопривод является неотъемлемой частью мехатронных устройств. Мехатронные компоненты (*mechatronic components- MCs*) можно определить как устройства, в которых сочетаются узлы точной механики с электронными вычислительными и управляющими компонентами, интерфейсными и силовыми модулями.

В работе [4] дано понятие *Intelligent Mechatronic Component (IMC)* и сформулированы условия использования таких компонентов в распределенных технологических системах, разработанных на основе

программного обеспечения стандарта IEC 61499 [5] с поддержкой данных и логики управления для реализации функций автоматизации.

Интеллектуализация сервоприводов предполагает использование интеллектуальных методов управления. В работе [6] предлагается интеллектуальный метод управления серводвигателем на основе обучения с подкреплением, который может обучить агента производить рабочий цикл в соответствии с ошибкой сервопривода между текущим состоянием и целевой скоростью или крутящим моментом. В работе [7] предлагается метод минимизации ошибки с помощью интеллектуальной схемы на основе ПИД-регулирования с использованием оптимизированных коэффициентов усиления. Описанный метод использует автоматический поиск правильных значений коэффициента усиления, в отличие от обычного ПИД-регулирования с фиксированным коэффициентом усиления.

В работах [16, 17] рассматриваются вопросы синхронизации работы сервоприводов в распределенных автоматизированных системах.

Универсальность сервоприводов обеспечивается включением таких дополнительных функциональных модулей как комбинированные вычислители на платформе микроконтроллеров и ПЛИС, и набор промышленных интерфейсов (как для локальных сетей, так и для LAN) [8].

Анализ современных отечественных сервоприводов

Проанализируем решения задач интеллектуализации и универсализации сервоприводов на примерах отечественных промышленных интегрированных сервоприводов типов СПС [9] на базе синхронного трехфазного двигателя и СПШ [10] на базе гибридного шагового электродвигателя.

Повышение качества управления движением указанных приводов осуществляется за счет использования *систем подчиненного управления* сервоприводами (рис. 1) с реализацией цифрового ПИД- или ПИ-алгоритма в каждом из 3-х контуров управления (момента, скорости, положения) [2, 11, 12].

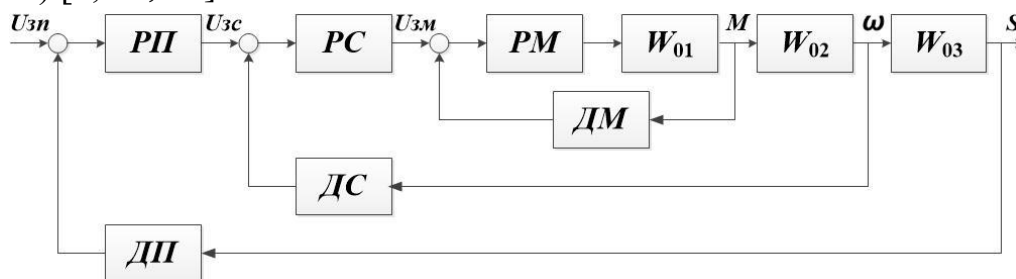


Рис. 1. Структура системы подчиненного управления

РП, РС, РМ – регуляторы позиции (координаты), скорости, момента соответственно; ДП, ДС, ДМ – датчики позиции, скорости, момента соответственно; $U_{ЗП}$, $U_{ЗС}$, $U_{ЗМ}$ – задающие сигналы для контуров позиции, скорости, момента соответственно; W_{01} – объединенная передаточная функция преобразователя частоты (ПЧ) и статорной обмотки двигателя; M – вращающий момент двигателя; W_{02} – передаточная функция двигателя по угловой скорости ω ; W_{03} – передаточная функция кинематической передачи между валом двигателя и объектом управления; S – величина линейного перемещения).

Цифровой ПИД-регулятор [2] описывается следующим математическим выражением

$$Y_{i+1} = (K_p \cdot \varepsilon_i + K_d \cdot \Delta \varepsilon_i / \Delta t_{изм} + K_{И} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{изм}) \cdot 100\% \quad (1)$$

где Y_{i+1} – цифровой код на выходе ПИД-регулятора в течение $(i + 1)$ -го интервала дискретизации; K_p – коэффициент при пропорциональной составляющей; ε_i – ошибка (рассогласование), разность между заданным и текущим значениями регулируемой величины в момент времени t_i , дискрет; K_d – коэффициент при дифференциальной составляющей, с; $\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}$ – разность ошибок двух соседних измерений, дискрет; $\Delta t_{изм} = t_i - t_{i-1}$ – интервал дискретизации, время между соседними измерениями, с; $K_{И}$ – коэффициент при интегральной составляющей, с⁻¹; $\sum_{i=0}^n \varepsilon_i \cdot \Delta t_{изм}$ – накопленная к i -му шагу сумма ошибок (интегральная сумма рассогласований), дискрет.

Методика настройки сервоприводов СПС и СПШ на разные режимы работы представлена авторами в литературе [2], где определение интервала дискретизации $\Delta t_{изм}$ и значений коэффициентов $K_p, K_d, K_{И}$ осуществляется с использованием тестового режима и графического интерфейса, реализованных в системе управления приводом на базе пакета *Мотомастер*© [13].

При настройке возможна реализация двух режимов: технически оптимального по быстродействию переходного процесса или плавного разгона/торможения с заданным ускорением.

Технически оптимальным считается такой переходный процесс, при котором при подаче на вход настраиваемого контура ступенчатого входного воздействия $x(t) = 1(t)$ время t_1 изменения регулируемой величины от 0 до установившегося значения было бы минимально возможным при перерегулировании

$$\sigma = \left[\frac{h_{max} - h(\infty)}{h(\infty)} \right] \cdot 100\% \text{ не превышающим } 4-10\% \text{ (рис. 2).}$$

Такой переходный процесс является компромиссным между процессом более быстрым, но с большим перерегулированием, и процессом с меньшим перерегулированием, но более медленным.

Параметрами, характеризующими качество управления, являются (рис. 2):

- *время переходного процесса* $T_{рег}$, с.; характеризует быстродействие системы и определяется как интервал времени от начала переходного процесса до момента, когда отклонение выходной величины от ее установившегося значения становится не более $\pm 5\%$;

- *максимальное перерегулирование* σ определяет наибольший «выбег» выходной величины от установившегося значения в переходном процессе, вычисляется относительно установившегося значения в %

$$\sigma = \left[\frac{h_{max} - h(\infty)}{h(\infty)} \right] \cdot 100\%;$$

- *статическая ошибка* $\varepsilon_{уст}(t)$; определяет точность регулирования выходной величины

$$\varepsilon_{уст}(t) = h(t) - h(\infty) \text{ при } t \geq T_{рег}$$

- время t_1 нарастания регулируемой величины до установившегося значения $h(\infty)$,

для ПИД – регулятора скорости определяет величину ускорения при разгоне;

- число перерегулирований N в интервале $0 \leq t \leq T_{рег}$, определяется как число выбросов, при которых кривая $h(t)$ располагается ниже значения $h(\infty)$, при настройке ПИД-регулятора на технический оптимум величина $N = 1$.

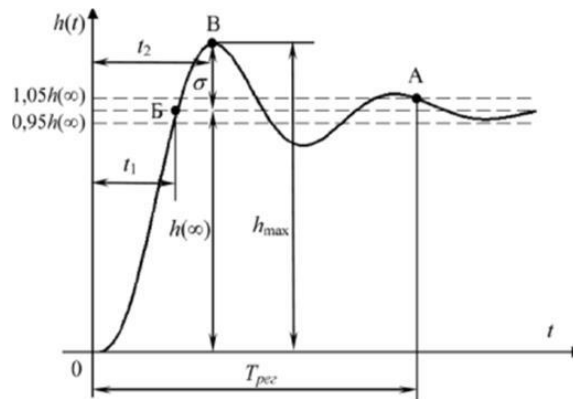


Рис. 2. К настройке переходного процесса на технический оптимум

Если разгон с максимальным ускорением недопустим, то при настройке используем «Режим плавного разгона/торможения» с ограничением ускорения и анализом указанных выше показателей качества регулирования.

Практическую реализацию достаточно сложных алгоритмов управления движением без использования контроллера верхнего уровня позволяют реализовывать входящие в состав сервоприводов сервоусилители (преобразователи частоты ПЧ) [14, 15].

Большую гибкость приводу и расширение его функциональных возможностей за счет оптимизации взаимодействия сервопривода с другими элементами автоматизируемого технологического комплекса обеспечивают: встроенный в систему управления приводом программируемый логический контроллер (ПЛК); CAN-интерфейс; цифровые порты ввода/вывода с оптической развязкой, обладающие возможностью сетевого взаимодействия, управления по сети удаленными приводами; технологический интерфейс *USB*, с помощью которого можно выполнять настройку параметров привода, анализировать его работу и управлять в ручном режиме; интерфейс *Step/Dir* для задания позиции вала двигателя; аналоговый интерфейс $\pm 10\text{В}$ для задания скорости двигателя.

ПЛК предназначен для выполнения прикладных программ, разработанных пользователем для управления движением в конкретном автоматизируемом технологическом процессе без использования контроллера верхнего уровня. Разработка программ для встроенного ПЛК осуществляется на языке *SML (Servo Motor Language)*, специально разработанном компанией ЗАО «Сервотехника» для рассматриваемых сервоприводов [13]. Разработка и отладка прикладных программ выполняется в текстовом редакторе программы *Мотомастер©*, установленной в системе управления сервоприводом.

CAN-интерфейс предоставляет полный доступ ко всем ресурсам привода и позволяет управлять любым из параметров. Предназначен для реализации протокола управления удаленными сервоприводами по шине CAN в режиме реального времени [16], обеспечения скорости передачи данных от 20 кб/с до 1 Мб/с, синхронизации работы большой группы СПС (до 128 приводов). Встроенный интерпретатор G-кодов позволяет нескольким приводам выполнять контурное движение по сложной траектории без системы управления верхнего уровня. При этом программа хранится в энергонезависимой памяти системы управления приводом и может запускаться при включении автоматически. Пульт ручного управления со штурвалом может подключаться и управлять непосредственно системой приводов по шине CAN.

Последняя генерация сервопривода СПС-25 может оснащаться современным интерфейсом *EtherCAT*, который обязателен при создании высокотехнологичного оборудования. Использование технологии *EtherCAT* даёт возможность добиться производительности недостижимой для устройств, использующих классические шинные системы. Преимущества *EtherCAT* это высокая пропускная способность - процесс обмена данными с 1000 распределенных цифровых входов / выходов занимает около 30 мкс. Данные для и от 1000 сервосетей могут обновляться со скоростью до 10 кГц. *EtherCAT* может быть использован

так же с медленным временем цикла, если нагрузка слишком высока на вашем компьютере.

Для отображения в реальном времени всех динамически изменяемых параметров привода (токов, напряжений, скорости, позиции и т. д.) в программе *Мотомастер*© реализован *графический интерфейс*, который эффективно используется при исследованиях и адаптации сервопривода к конкретному автоматизируемому процессу, при настройке и анализе прикладных программ.

Используемая структура сервоприводов СПС и СПШ позволяет реализовать следующие функциональные возможности (режимы работы):

- управление позицией рабочего органа с функцией плавного разгона и торможения;
- управление скоростью рабочего органа с функцией плавного разгона и торможения;
- управление моментом двигателя;
- отработку программ управления движением, разработанных пользователем без применения внешних контроллеров (с использованием ПЛК):

- управление режимами движения привода с изменением скорости и ускорения;

- выход в нулевую позицию;

- аварийный останов привода в случае выхода из рабочей зоны;

- включение/выключение внешнего оборудования по определенным событиям (по аналогии с обработкой прерываний);

- синхронизацию работы группы приводов, объединенных в локальную сеть с целью совместного позиционирования [17], в том числе, с помощью шины CAN;

- функцию электронного редуктора;

- тестовый режим, с помощью которого можно установить стандартные функции задания для привода (ступенька, синус) и проанализировать качество переходных процессов (качество управления), то есть в этом режиме осуществляется настройка привода на использование в конкретном оборудовании, обеспечивается его универсальность.

Сервопривод СПС обеспечивает высокую плавность хода на малых оборотах двигателя (5% на 3 об/мин), обладает широким диапазоном регулирования скорости (от 1:1000 до 1:12000 в зависимости от разрешения энкодера) и имеет высокие динамические характеристики (частота обсчета контура скорости до 5 кГц).

Использование в сервоприводе СПШ бесшагового (векторного) управление на основе адаптированного специально для шаговых

двигателей алгоритма позволяет исключить такой серьезный недостаток шаговых приводов, как пропуск шагов.

Универсальность анализируемых приводов определяется их техническими возможностями (наличие различных интерфейсов, тестового режима, графического интерфейса; встроенного ПЛК, программируемого на языке *SML* и др.), которые позволяют осуществить их настройку на любой из рассмотренных выше режимов работы.

Методика настройки сервоприводов СПС и СПШ на разные режимы работы представлена авторами в литературе [2]. Результат настройки по данной методике цифрового ПИД-регулятора контура скорости сервопривода СПС 25 представлен на рис. 3 при заданных значениях частоты вращения $n = 500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ и максимальном ускорении, равном 100 об/с^2 . Обеспечено перерегулирование $\sigma = 6.8\%$, время переходного процесса $t_{\text{пн}} < 30 \text{ мс}$, статическая ошибка $\epsilon_{\text{уст}} \leq 2\%$, число перерегулирований $N=1$.

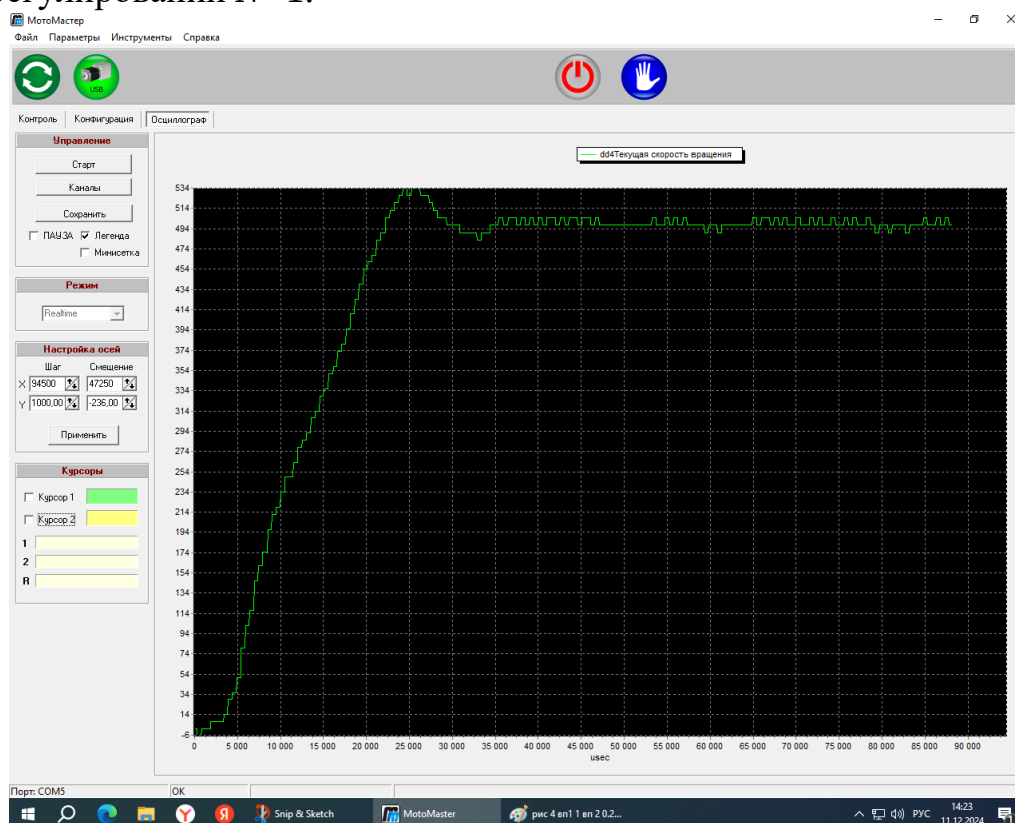


Рис. 3. К настройке переходного процесса в контуре скорости сервопривода СПС 25

Кибербезопасность работы распределенных сервоприводов

При организации киберзащиты систем контроля физического доступа к производственному оборудованию основное внимание уделяется проблеме предоставления или блокировке доступа. Чаще всего для

удаленной аутентификации персонала используется коммуникационный интерфейс RS-485, а для удаленной конфигурации и контроля параметров сервоприводов используется CAN-интерфейс. Данный выбор интерфейсов в первую очередь связан с небольшими затратами на реализацию системы контроля доступа и конфигурирования. Кроме того, возможность интерфейсов объединять различное оборудование в единый сегмент, позволяет использовать один управляющий контроллер. Но есть и отрицательные стороны данного решения. При большой протяженности коммуникационной сети с распределенным оборудованием (свыше 1200 метров, если используются несколько сегментов RS-485) всегда может возникнуть вероятность появления отдельных неконтролируемых участков физически доступных для злоумышленников. В этом случае приходится решать задачу контроля доступа методом усложнения программ, что не всегда реализуемо с учетом корпоративного программного обеспечения для промышленного оборудования.

В работе [18] предложена концепция защиты данных, передаваемых по отдельным, неконтролируемым участкам промышленной сети, физически доступных для злоумышленников. Основная идея заключается в замене специально выделенных сегментов сети, имеющих неконтролируемый доступ (открытый для злоумышленника), на сегменты PNS (Protected Network Segment), которые защищены аппаратными средствами на платформе FPGA. Универсальность таких сегментов заключается в возможности встраивания их в сеть на основе различных интерфейсов. Важная особенность таких решений заключается в том, что работа алгоритма и всего сегмента не зависит от протокола передачи данных. Предложенный алгоритм шифрования в PNS каждого бита передаваемого байта данных позволяет получить большую защиту, чем при блочном шифровании.

На основании результатов работы [18], была сформулирована и проработана структура HSM (Hardware Security Module) модуля. HSM модули работают, как правило, в достаточно жестких промышленных условиях. Это определяет выбор стандарта как на уровне электрических сигналов, так и при кодировании передачи данных на сигнальном уровне. Основным стандартом, определяющим идеологию HSM, является IEEE Standard 1355 [19]. Для увеличения надежности передаваемых данных используется две дифференциальных пары (в отличие от RS-485): D – линия для передачи данных и S – линия для передачи строга. D и S линии образуют DS-link. Дополнительная линия стробирования данных позволяет организовать самосинхронизацию данных и дает возможность произвольно менять скорость передачи, даже в пределах одного сообщения. Это дает дополнительное преимущество при защите передаваемых данных.

В статье [18] предлагаются результаты исследования разработанного HSM модуля на платформе FPGA (рис.4). Основой вычислительного ядра модуля является FPGA семейства Cyclone 10 LP фирмы INTEL, интегрированная в мини-плату TEI0003-03 [20]. Там же расположены 8 MByte SDRAM, 8 MByte Flash, USB port. Для испытаний модуля HSM_DNS была разработана печатная плата, для которой определены следующие требования:

- Печатная плата разработана в form factor PC/104, что позволит при необходимости подключить модуль к дополнительному контроллеру по шине PC/104.
- Для соединения мини-платы TEI0003-03 с “материнской” предусмотрены два ряда разъемов с цанговыми контактами.

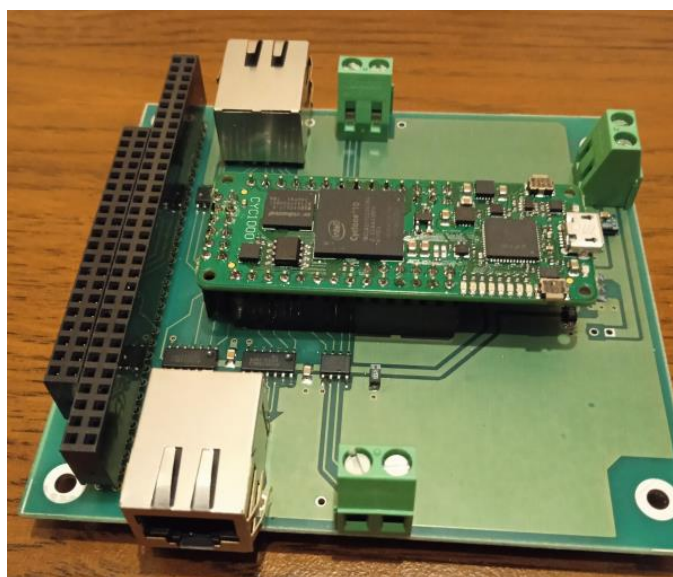


Рис. 4. HSM модуль для защиты неконтролируемых сегментов сети

Применение устройства может быть эффективно при сетевом взаимодействии промышленного оборудования, в частности сервоприводных устройств, и защите неконтролируемых участков коммуникационной сети для системы контроля доступа.

Обсуждение и выводы

Проведенный анализ показывает, что структура отечественных сервоприводов СПШ и СПС соответствует принципам интеллектуальности и универсальности, определяющим развитие современных приводных систем. Причем повышение интеллектуальности сервоприводов повышает возможности их универсализации. Каждый из указанных сервоприводов представляет собой комплект синхронного двигателя и сервоусилителя,

обеспечивающего подчиненное регулирование по току, скорости и позиции с использованием ПИ- и ПИД- регуляторов и реализацию алгоритма *векторного управления* двигателем. Такой подход позволяет реализовать управление с высокими показателями качества: диапазон регулирования скорости более 10000 при настраиваемой величине перерегулирования $\sigma \leq 10\%$, широкая полоса пропускания, определяемая наибольшей частотой дискретизации $f_{\text{диск}} = 5 \text{ кГц}$. Наличие встроенного ПЛК значительно расширяет функциональные возможности сервопривода.

Для использования сервоприводов в распределенных системах управления в их структуру введен CAN-интерфейс, обеспечивающий синхронизацию работы большой группы СПС-приводов (до 128 приводов на базе промышленной шины CAN); реализован режим работы «*master-slave*»;

Также предусмотрена возможность обработки внешних событий с использованием интерфейса цифрового входа/выхода с оптической развязкой. Сервоприводы с такой структурой используются, например, в гибких производственных модулях, робото-технологических комплексах в машиностроении [20].

Универсализация рассматриваемых сервоприводов (их адаптация к конкретному автоматизируемому объекту) достигается: возможностью использования различных механических модулей перемещения; совершенными средствами настройки с использованием графического интерфейса, реализуемого в программе *Мотомастер*©; встроенным ПЛК, программируемым на языке *SML* с разработкой и отладкой программ в текстовом редакторе *Мотомастер*©.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Яровой Е.А. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) // Перспективы науки, 2021, №3. – С. 170-172.
- [2] Евсиков А.А., В.А. Коковин, А.П. Леонов. Об особенностях структуры и настройки отечественных сервоприводов с векторным управлением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, №3 (341), 2020. – С. 122-130.
- [3] Азизов А.А., Байбиков И.Ф., В.Н. Козловский В.Н., Стариков А.В. Дискретная математическая модель системы векторного управления электродвигателем переменного тока // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Вып. 12, 2024. – С. 648 – 653.
- [4] С. Pang, V. Vyatkin, "IEC 61499 Function Block Implementation of Intelligent Mechatronic Component", *8th IEEE Conference on Industrial Informatics (INDIN 2010)*, pp. 1124-1129.

- [5] International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture / International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2005. – 245 p.
- [6] Gao D, Wang S, Yang Y, Zhang H, Chen H, Mei X, Chen S, Qiu J. An Intelligent Control Method for Servo Motor Based on Reinforcement Learning. *Algorithms*. 2024; 17(1):14. <https://doi.org/10.3390/a17010014>.
- [7] M. Y. Coskun and M. Itik, "Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system", *ISA Transactions*, V. 139, 2023, pp. 484-498, doi: 10.1016/j.isatra.2023.04.005.
- [8] V. A. Kokovin, V. I. Diagilev, S. U. Uvaysov and S. S. Uvaysova, "Intelligent Power Electronic Converter For Wired and Wireless Distributed Applications," *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Prague, Czech Republic, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED.2019.8798455.
- [9] Сервоприводы отечественного производства СПС. Электрон. дан. – Режим доступа: https://www.servotechnica.ru/doc/index.pl?id_brand=11 (дата обращения: 31.03.2025).
- [10] Сервоприводы отечественного производства СПШ. Электрон. дан. – режим доступа: https://www.servotechnica.ru/doc/index.pl?id_brand=10 (дата обращения: 31.03.2025).
- [11] Байбиков И.Ф., Стариков А.В. Повышение быстродействия следящих электроприводов прецизионных станков с синхронными исполнительными двигателями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, Вып. 2, 2025. – С. 51 – 59.
- [12] Туркин И.И., Мин Хеин. Совершенствование систем управление электроприводами на основе принципов подчиненного регулирования и самоорганизации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2016, №3. – С. 86-92.
- [13] Интегрированный сервопривод СПШ10. Язык программирования, версия 4.2. – ЗАО «Сервотехника». Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1193.pdf> (дата обращения: 31.03.2025).
- [14] Сулейманов А.А. Методика расчета преобразователя частоты на базе синхронного электродвигателя // Будущее науки – 2021. Сборник научных статей 9-й Международной молодежной научной конференции. – Курск: Юго-западный государственный университет, 2021. – Том 6, С.148-152.
- [15] Стельмашук С.В. Комбинированное управление следящего электропривода с компенсацией ошибки по ускорению // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Т. 17, 2024, №7. – С. 75-82.

- [16] Ахмад З., Мартинов Г.М. Управление серводвигателями типа СПШ на базе микроконтроллера ARDUINO и с использованием протокола CAN // Материалы XVI Всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ-2023)». – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2023. – С. 33-41.
- [17] Ибатуллин А.А., Гебель Е.С., Гудинов В.Н. К вопросу управления серводвигателями автоматической сварочной установки, предназначенной для сварки крупногабаритных ёмкостей ракет-носителей // Омский научный вестник, 2019. – №3, С. 38-45.
- [18] V. A. Kokovin, A. A. Evsikov, A. N. Sytin, V. V. Skvortsov and S. U. Uvaysov, "Development and Research of a Hardware Security Module to Control and Protect Access to Industrial Equipment," *2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED63331.2024.10741050.
- [19] "IEEE Standard for Heterogeneous Interconnect (HIC) (Low-Cost Low-Latency Scalable Serial Interconnect for Parallel System Construction)", *IEEE Standard 1355 – 1995 IEEE*, June 1996.
- [20] TEI0003-03-QFCR4A Trenz Electronic FPGA module with Intel Cyclone 10 LP FPGA. Электрон. дан. – Режим доступа: <https://wiki.trenz-electronic.de/display/PD/TEI0003+Resources> (дата обращения: 31.03.2025).

A.A. Evsikov, V.A. Kokovin, A.P. Leonov, A.N. Sytin

ON THE INTELLECTUALITY AND VERSATILITY OF SERVO DRIVES FOR INDUSTRIAL EQUIPMENT CONTROL SYSTEMS

State University "Dubna", Branch "Protvino", Russia

Abstract

The article considers the issues of intellectualization and universalization of servo drives, which are a key element of automated control systems for technological processes and production. Technical solutions aimed at improving the quality of motion control, optimizing the interaction of the servo drive with other equipment of the distributed automated system are analyzed. The problems of equipment cybersecurity, methods of network protection of equipment in uncontrolled areas of the industrial network, physically accessible to intruders are considered.

Key words: servo drive, vector control, slave control system, digital PID controller, tuning to technical optimum, cybersecurity.

REFERENCES

- [1] Yarovoj E.A. Avtomatizatsiya i upravlenie tekhnologicheskimi processami i proizvodstvami (po otraslyam) // *Perspektivy nauki*, 2021, №3. – pp. 170-172. (rus.)
- [2] Evsikov A.A., V.A. Kokovin, A.P. Leonov. Ob osobennostyah struktury i nastrojki otechestvennyh servoprivodov s vektornym upravleniem // *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, №3 (341), 2020. – pp. 122-130. (rus.)
- [3] Azizov A.A., Bajbikov I.F., V.N. Kozlovskij V.N., Starikov A.V. Diskretnaya matematicheskaya model' sistemy vektornogo upravleniya elektrodvigatelem peremennogo toka // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, Vyp. 12, 2024. – pp. 648 – 653. (rus.)
- [4] C. Pang, V. Vyatkin, "IEC 61499 Function Block Implementation of Intelligent Mechatronic Component", *8th IEEE Conference on Industrial Informatics (INDIN 2010)*, pp. 1124-1129.
- [5] International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture / International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2005. – 245 p.
- [6] Gao D, Wang S, Yang Y, Zhang H, Chen H, Mei X, Chen S, Qiu J. An Intelligent Control Method for Servo Motor Based on Reinforcement Learning. *Algorithms*. 2024; 17(1):14. <https://doi.org/10.3390/a17010014>.
- [7] M. Y. Coskun and M. Itik, "Intelligent PID control of an industrial electro-hydraulic system", *ISA Transactions*, V. 139, 2023, pp. 484-498, doi: 10.1016/j.isatra.2023.04.005.
- [8] V. A. Kokovin, V. I. Diagilev, S. U. Uvaysov and S. S. Uvaysova, "Intelligent Power Electronic Converter For Wired and Wireless Distributed Applications," *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Prague, Czech Republic, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED.2019.8798455.
- [9] Servoprivody otechestvennogo proizvodstva SPS. Elektron. dan. – Rezhim dostupa: https://www.servotechnica.ru/doc/index.pl?id_brand=11 (data obrashcheniya: 31.03.2025).
- [10] Servoprivody otechestvennogo proizvodstva SPSH. Elektron. dan. – rezhim dostupa: https://www.servotechnica.ru/doc/index.pl?id_brand=10 (data obrashcheniya: 31.03.2025).
- [11] Bajbikov I.F., Starikov A.V. Povyshenie bystrodejstviya sledyashchih elektroprivodov precizionnyh stankov s sinhronnymi ispolnitel'nymi dvigatelyami // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, Vyp. 2, 2025. – pp. 51 – 59.

- [12] Turkin I.I., Min Hein. Sovershenstvovanie sistem upravlenie elektroprivodami na osnove principov podchinennogo regulirovaniya i samoorganizacii // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya, 2016, №3. – pp. 86-92.
- [13] Integrirovannyj servoprivod SPSH10. YAzyk programmirovaniya, versiya 4.2. – ZAO «Servotekhnika». Elektron. dan. – Rezhim dostupa: <https://www.servotechnica.ru/files/doc/documents/file-1193.pdf> (data obrashcheniya: 31.03.2025).
- [14] Sulejmanov A.A. Metodika rascheta preobrazovatelya chastoty na baze sinhronnogo elektrodvigatelya // Budushchee nauki – 2021. Sbornik nauchnyh statej 9-j Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii. – Kursk: YUgo-zapadnyj gosudarstvennyj universitet, 2021. – Tom 6, pp.148-152.
- [15] Stel'mashchuk S.V. Kombinirovannoe upravlenie sledyashchego elektroprivoda s kompensaciej oshibki po uskoreniyu // Izvestiya SPbGETU «LETI», T. 17, 2024, №7. – pp. 75-82.
- [16] Ahmad Z., Martinov G.M. Upravlenie servodvigatelyami tipa SPSH na baze mikrokontrollera ARDUINO i s ispol'zovaniem protokola CAN // Materialy XVI Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Mashinostroenie: tradicii i innovacii (MTI-2023)». – M.: FGBOU VO «MGU «STANKIN», 2023. – pp. 33-41.
- [17] Ibatullin A.A., Gebel' E.S., Gudinov V.N. K voprosu upravleniya servodvigatelyami avtomaticheskoy svarочноj ustanovki, prednaznachЕННОj dlya svarki krupnogabaritnyh yomkostej raket-nositelej // Omskij nauchnyj vestnik, 2019. – №3, pp. 38-45.
- [18] V. A. Kokovin, A. A. Evsikov, A. N. Sytin, V. V. Skvortsov and S. U. Uvaysov, "Development and Research of a Hardware Security Module to Control and Protect Access to Industrial Equipment," *2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*, Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/SED63331.2024.10741050.
- [19] "IEEE Standard for Heterogeneous Interconnect (HIC) (Low-Cost Low-Latency Scalable Serial Interconnect for Parallel System Construction)", *IEEE Standard 1355 – 1995 IEEE*, June 1996.
- [20] TEI0003-03-QFCR4A Trenz Electronic FPGA module with Intel Cyclone 10 LP FPGA. Электрон. дан. – Режим доступа: <https://wiki.trenz-electronic.de/display/PD/TEI0003+Resources> (дата обращения: 31.03.2025).