

ISSN: 2658–5782

Номер 3

2025

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org



Специфика конструкторской проработки прототипа смарт-привода для нетипичных манипуляторов

А.В. Ивачев¹, О.В. Даринцев¹✉, Д.Р. Богданов²

¹ Уфимский университет науки и технологий, Уфа

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

E-mail: darintsevov@uust.ru

В современной промышленной робототехнике ключевую роль в обеспечении непрерывности производства и автоматизации, требуемых характеристик при работе с перемещаемыми объектами играют манипуляторы. Они позволяют заменить человека на монотонных операциях, ускорить производственный процесс и избежать применения дополнительных грузоподъемных устройств. В отличие от традиционных манипуляторов у непрерывных манипуляторов, при их уникальных возможностях, существуют нерешенные проблемы управления. Одной из этих проблем является контроль формы звеньев непрерывного манипулятора, так как форма в итоге определяет его рабочую точку. В настоящей работе рассматривается непрерывный манипулятор, состоящий из звеньев на базе жестких элементов со сферической поверхностью, качение которых друг относительно друга и определяет конечную форму звеньев. Качение элементов осуществляется с помощью приводов посредством изменения длин тросов, проходящих сквозь них. Для корректного (управляемого) функционирования манипулятора необходимо осуществлять управление перемещением тросов с одновременным контролем их натяжений. Кроме того, для поддержки целостности звеньев управление должно быть синхронным для всех приводов тросов. Основной целью работы является разработка эскизного проекта смарт-привода для нетипичных манипуляторов. На первом этапе проведена конструкторская проработка привода, для чего решены следующие задачи: проектирование приводного модуля на базе шагового двигателя с датчиком натяжения и перемещения троса; разработка архитектуры информационной системы; проектирование внутренней структуры программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Разработанная на первом (конструкторском) этапе создания эскизного проекта смарт-привода схема была загружена во внутреннюю флеш-память ПЛИС.

Ключевые слова: смарт-привод, нетипичные манипуляторы, датчик напряжения и перемещения троса, программируемые логические интегральные схемы, шаговые двигатели, тросовое управление

Design development of a Smart Drive for Atypical Manipulators

A.V. Ivachev¹, O.V. Darintsev¹✉, D.R. Bogdanov²

¹ Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

² Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

E-mail: darintsevov@uust.ru

In modern industrial robotics, manipulators play a key role in ensuring uninterrupted production and automation, ensuring the required characteristics when working with movable objects. They make it possible to replace a person in monotonous operations, speed up the production process and avoid the use of additional lifting devices. Unlike traditional manipulators, continuous manipulators, with their unique capabilities, have unresolved control problems. One of them is to control the shape of the links of the continuous manipulator, as it ultimately determines its operating point. In this paper, we consider a continuous manipulator consisting of links based on rigid elements with a spherical surface, the rolling of which relative to each other determines the conical shape of the links. The rolling of the elements is carried out by means of drives by changing the lengths of the cables passing through them. For the correct (controlled) operation of the manipulator, it is necessary to control the movement of cables while simultaneously controlling their tension. In addition, to maintain the integrity of the links, the control must be synchronous for all cable drives. The main purpose of the presented work is to develop a draft design of a smart drive for atypical manipulators. At the first stage of the work, the results of which are presented in this article, a design study of the drive was carried out, for which the following three tasks were solved: designing a drive module based on a stepper motor with a cable tension and displacement sensor; developing an information system architecture; designing the internal structure of a programmable logic integrated circuit (FPGA). The circuit developed at the first (design) stage of creating the sketch design of the smart drive was loaded into the internal flash memory of the FPGA.

Keywords: smart drive, atypical manipulators, cable tension and displacement sensor, FPGAs, stepper motors, cable-driven control

1. Введение

В современной промышленной робототехнике манипуляторы играют ключевую роль в обеспечении непрерывности производства и автоматизации. Они позволяют заменить человека на монотонных операциях, ускорить производственный процесс и избежать применения дополнительных грузоподъемных устройств.

В мире набирают популярность нетипичные манипуляторы, которые отличаются от классических жестких манипуляторов с шарнирными соединениями своей конструкцией или принципами работы. Их конструкция зачастую основана на принципах биомиметики и предназначена для решения задач, где традиционные манипуляторы не эффективны.

Среди всего многообразия манипуляторов, известных на текущий момент, можно выделить три больших класса:

- 1) с жесткими звеньями;
- 2) с использованием звеньев с контролируемой деформацией;
- 3) с использованием звеньев с управляемым изгибом.

Если первые два типа манипуляторов достаточно хорошо известны, то появившийся практически одновременно с ними класс манипуляторов с управляемым изгибом в силу объективных на то время причин не нашел широкого применения. Но в настоящий момент проявляется острая потребность именно в таких манипуляционных механизмах как средстве контроля, диагностики и доставки инструмента в труднодоступные полости сложных механизмов. Интерес проявляется также со стороны теории катастроф как к средству доступа в разрушенные сооружения; медицины (малотравматичное средство доставки); специальной робототехники (обследование подозрительных полостей и работа в загроможденном пространстве) [1]. К классу манипуляторов с жесткими звеньями относятся практически все традиционные промышленные манипуляторы, разработка которых определялась выполняемыми ими технологическими задачами. Такие манипуляторы представляют собой механизмы, состоящие из жестких звеньев, соединенных посредством кинематических пар с угловым или поступательным относительным перемещением [2].

Манипуляторы на основе звеньев с контролируемой деформацией — это такие конструкции, в которых учитывается возможный изгиб звеньев в процессе перемещения. Идея таких манипуляторов состоит в облегчении звеньев за счет снижения их жесткости. В данных манипуляторах учет и контроль возникающих деформаций ведется сложной системой управления [3].

В манипуляторах с управляемым изгибом изгиб звена может быть реализован на основе разных физических принципов и с применением различных материалов, но общим свойством является то, что за счет управляемого изменения пространственной конфигурации отдельных звеньев осуществляется перемещение схвата или рабочего инструмента в пространстве. Существенным отличием также является то, что в отличие от манипуляторов первых двух классов для обеспечения эквивалентного количества степеней свободы таким конструкциям требуется меньшее количество звеньев. К недостаткам подобных технических решений часто относят их малую жесткость, что делает невозможным работу с формообразующим инструментом, значительно снижает вес полезной нагрузки и усложняет управление. Но если рассматривать гибкие манипуляторы как средство доставки различных инструментов обработки (например, покраски) и бесконтактного контроля в труднодоступные внутренние полости агрегатов со сложной пространственной формой каналов, то они идеально подходят для решения подобных задач [1].

Традиционные манипуляторы обычно обладают ограниченным числом степеней свободы, что идеально подходит для структурированных сред, но ведет к трудностям в менее организованных условиях, таких как работы в загроможденных средах функционирования или при обследовании сложных полостей машин и механизмов. С такими задачами хорошо справляются манипуляторы с избыточными степенями свободы, к которым можно отнести змееподобные манипуляторы, построенные на базе большого количества модулей, а также, так называемые в зарубежной литературе, непрерывные манипуляторы. Основное отличие непрерывных манипуляторов состоит в том, что их звенья могут менять кривизну непрерывно вдоль всей своей длины. Такая особенность позволяет манипулятору обходить препятствия не только за счет количества звеньев, но и за счет изгиба самого звена. Учитывая то, что непрерывные манипуляторы не определены в ГОСТ Р 60.0.0.4-2023 как отдельный класс, можно отнести их к нетипичным манипуляторам.

В отличие от традиционных манипуляторов у непрерывных присутствуют проблемы управления. Одной из главных проблем является контроль формы звеньев непрерывного манипулятора, так как именно форма определяет его рабочую точку.

В настоящей работе рассматривается непрерывный манипулятор, состоящий из звеньев на базе жестких элементов со сферической поверхностью, качение которых друг относительно друга и определяет форму звеньев. Качение элементов осуществляется с помощью тросов, проходящих сквозь них, перемещение которых осуществляется с использованием приводов.

Для правильного функционирования манипулятора

необходимо осуществлять управление перемещением тросов с одновременным контролем их натяжений. Кроме того, для поддержки целостности звеньев управление должно быть синхронным для всех приводов тросов.

В настоящее время существуют различные типы приводов роботов, имеющие ряд конструктивных особенностей:

- электродвигатели (простейшие типы — двигатели постоянного и переменного тока), которые предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Для управления такими приводами необходимы датчики обратной связи и контроллер;
- сервоприводы — механизмы, позволяющие устанавливать и фиксировать рабочий орган оборудования в заданных положениях, перемещать его в соответствии с заданной программой. Кроме того, они могут поддерживать необходимый момент на валу при нулевой скорости вращения вала, что используется для удержания исполнительного механизма в одном положении под нагрузкой [4]. Для управления сервоприводом необходимы отдельный контроллер и драйверы;
- шаговые двигатели, которые представляют собой бесщеточное электромеханическое устройство, преобразующее последовательность электрических импульсов, приложенных к его обмоткам возбуждения, в точно определенное пошаговое механическое вращение. Такие двигатели хорошо подходят для системы управления без обратной связи, в которой точное положение вала поддерживается точным количеством импульсов без использования датчика обратной связи [5]. Шаговый двигатель может управляться без драйвера напрямую от микроконтроллера или логической схемы или с драйвером, который управляет обмотками по сигналам от управляющего устройства;
- интеллектуальные приводы, расширяющие возможность управления приводом за счет интеграции сложных алгоритмов. Такие устройства получили функции программируемого логического контроллера, они обладают логикой принятия решения на основе собственных датчиков и прогноза состояния системы. Интеллектуальные приводы способны управлять не только своим исполнительным механизмом, но и оказывать влияние на работу всей системы;
- смарт-приводы — автономные исполнительные механизмы, где в одном корпусе размещены привод, контроллер, датчики и коммуникационные интерфейсы. Встроенные датчики и контроллер обеспечивают управление положением, скоростью и усилием привода, снимая нагрузку на систему управления верхнего уровня.

Проведенный анализ современных разработок в области непрерывных манипуляторов позволил выявить

ряд характерных конструктивных и функциональных особенностей, а также системные проблемы управления.

Гибкий манипулятор с пружинными сегментами [6] представляет собой конструкцию, основанную на пружинах сжатия, которые деформируются при натяжении тросов. Данное решение аналогично биологическому прототипу — хоботу слона. Однако, в данной системе отсутствует контроль натяжения тросов. Усилие определяется косвенно через жесткость пружин и перемещение тросов, что не позволяет произвести точный силомоментный контроль в реальном времени.

Манипулятор *Bendy Arm* [7], разработанный для помощи людям с ограниченными возможностями, демонстрирует другой подход. Конструкция состоит из гибкого основания и дисков, через которые пропущены тросы. Данным манипулятором управляет вручную при помощи джойстика без использования обратной связи, исключительно визуально.

Анализ данных решений выявил общую проблему — отсутствие интегрированной системы автоматического управления, обеспечивающей одновременный контроль кинематических и силовых параметров.

Целью работы является решение проблемы синтеза адаптивной и многосвязной системы управления для непрерывных манипуляторов путем разработки архитектуры смарт-привода с распределенной обработкой данных на уровне программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и экспериментальный анализ ее эффективности.

На первом этапе разработки эскизного проекта смарт-привода, результаты которого представлены в настоящей статье, проведена конструкторская часть работы.

2. Постановка задачи, определение компоновки привода, выбор оборудования и компонентов

Рассмотрим непрерывный манипулятор, состоящий из звеньев на базе жестких элементов со сферической поверхностью, качение которых друг относительно друга и определяет форму звеньев. Качение элементов осуществляется с помощью тросов, проходящих сквозь них, перемещение которых осуществляется с помощью приводов.

Непрерывный манипулятор может состоять из нескольких звеньев, каждым из которых управляет один смарт-привод. Смарт-приводы располагаются в виде модульной конструкции друг над другом и повернуты друг относительно друга на угол $360^\circ/2n$, где n — количество звеньев. На рис. 1 представлена конструкция непрерывного манипулятора.

Каждый смарт-привод состоит из 4-х датчиков натяжения и перемещения троса (ДНПТ) с приводными блоками, отладочной платы-контроллера и основания привода. На рис. 2 представлена компоновка привода.

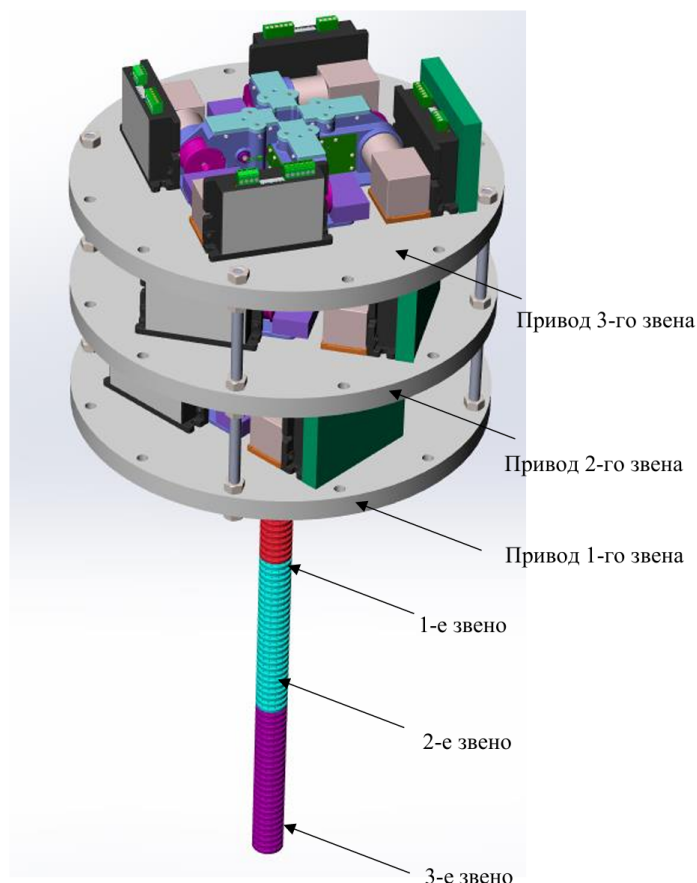


Рис. 1. Конструкция непрерывного манипулятора

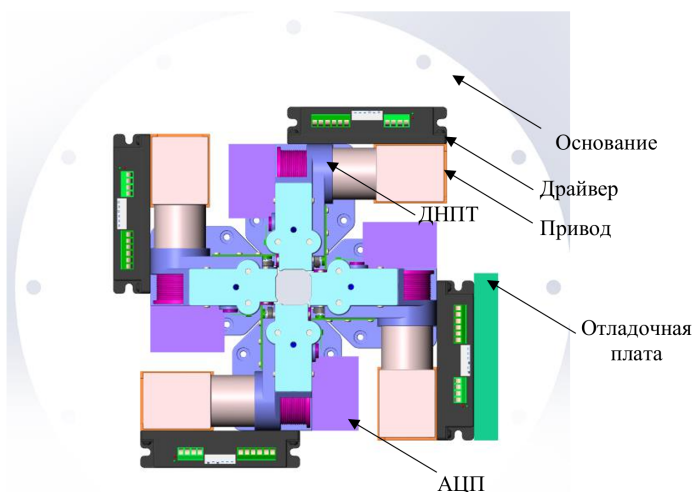


Рис. 2. Компоновка смарт-привода

В каждый ДНПТ с приводным блоком входят:

- комплексированный датчик натяжения и перемещения троса;
- шаговый двигатель;
- драйвер двигателя.

Комплексированный датчик натяжения и перемещения состоит из:

- корпуса;
- валов с магнитами;
- механизма контроля натяжения;
- рояльного колеса;
- крышки;
- тензодатчика;
- платы с двумя энкодерами;
- аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Были взяты шаговые двигатели *STEPPERONLINE 11HS20-0674S-PG27* с планетарным редуктором с соотношением 27:1 [8]. В качестве драйвера использован *STEPPERONLINE DM320T* [9]. Данный драйвер обладает настройкой микрошага, что позволяет увеличить точность и плавность движения двигателя. Возможно деление одного оборота на 400, 800, 1600, 3200, 6400, 12800, 4000 и 8000 микрошагов. Для контроля натяжения используется датчик *DYHW-108* [10]. Он рассчитан на вес до 3 кг. Энкодер представляет собой комплект из микросхемы *AS5048A* — 14-битного датчика углового положения и магнита, установленного на торцах входного и выходного валов ДНПТ. Микросхема считывает угол поворота магнита и состоит из датчика Холла, АЦП и цифрового обработчика сигналов [11]. Для обработки сигнала с тензодатчика использована специализированная плата *CHIPSEA* на базе 24-битного сигма-дельта АЦП *CS1238* [12]. Система управления смарт-приводом реализована на базе отладочной платы *MAX 10 FPGA (10M08S, 144EQFP)* [13]. Для обмена данными между контроллером и компьютером верхнего уровня используется преобразователь USB-UART на базе микросхемы *FT232R* [14].

3. Проектирование датчика натяжения и перемещения троса

Изначально использовался ДНПТ с несимметричным расположением штоков, однако использование двух штоков привело к перекосам и заклиниванию. Поэтому был разработан новый датчик, в котором использовались более жесткие подшипники на валах и цилиндрический тензодатчик вместо балочного из-за своей компактности. При такой модификации усилие от троса передается через центр масс системы, что исключает перекосы, а также полное складывание пружины, которое приводило к соскакиванию витков друг с друга и некорректным результатам. Спроектированный датчик представлен на рис. 3.

В данной версии усилие от троса 9 передается на ролик 16 демпфера 12, затем через пружину передается на толкатель 5, далее, через металлическую пластину 4, передается на датчик 3. Толкатель и демпфер двигаются по двум неподвижным штокам 1 и 2. Так как сила приложена к центру масс демпфера, у данной конструкции отсутствует проблема перекоса и заклинивания подвижных частей.

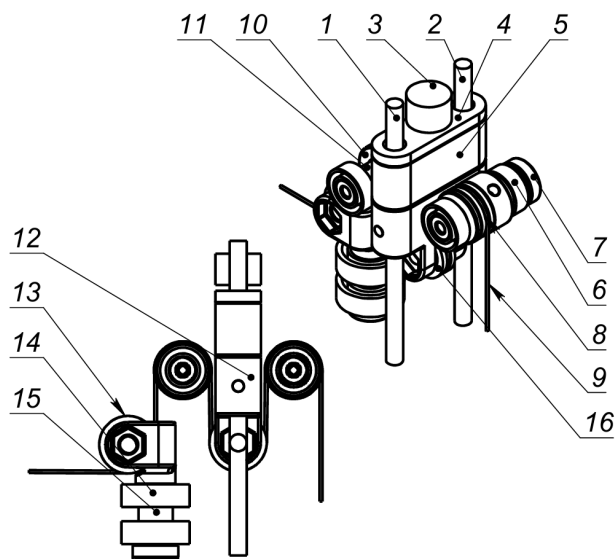


Рис. 3. Новый датчик

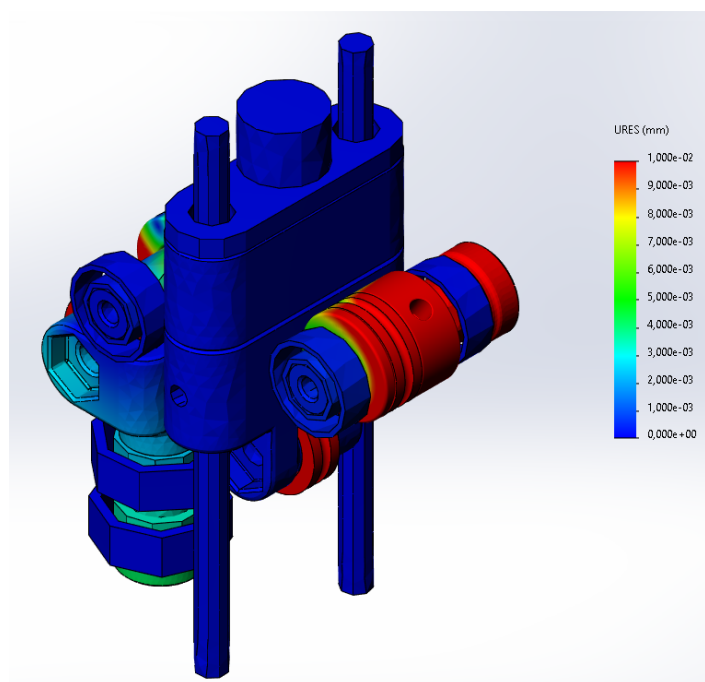


Рис. 4. Эпюра результирующих перемещений нового датчика

Эпюра результирующих перемещений нового датчика представлена на рис. 4. Как видно из данного рисунка, перемещения распределены равномерно по объему демпфера, толкателя и металлической пластины.

4. Разработка аппаратной части информационно-управляющей системы управления смарт-привода

Для реализации информационно-управляющего модуля для смарт-привода предлагается следующая структура (рис. 5).

В состав модуля входят:

- контроллер верхнего уровня — персональный компьютер (ПК);

- ПЛИС;
- приводные блоки.

На контроллере верхнего уровня используется специальное ПО, которое будет рассмотрено на следующем (технологическом) этапе разработки эскизного проекта смарт-привода.

На ПЛИС реализована микропроцессорная система, в которую входят генераторы ШИМ сигнала для управления приводами, компонент опроса энкодеров AS5048A, устройства приема данных и сигнала прерывания от АЦП. В самой структуре ПЛИС реализованы модули формирования управляющих сигналов для приводов и автоматы опроса тензодатчиков.

Каждый модуль смарт-привода перед использованием должен быть откалиброван. Для этого был создан стенд для калибровки и исследования приводного модуля.

Рассмотрим информационную часть системы, необходимую для тестирования и калибровки датчика натяжения и перемещения троса, представленную на рис. 6.

Как видно из рисунка, данная система имеет те же компоненты, что и информационно-управляющий модуль всего смарт-привода. В нее входят следующие элементы:

- микропроцессорная система;
- компонент опроса SPI_n ;
- автоматы опроса АЦП;
- счетчик импульсов ШИМ.

В состав микропроцессорной системы входят:

- источник тактовой частоты;
- память для хранения данных и программы;
- *soft*-процессор *Nios II*;
- *UART* порт для программатора;
- порт ввода-вывода *INT_HX* — необходим для приема сигнала прерывания от компонента опроса АЦП;
- порт ввода-вывода *HX_D_IN* — необходим для приема данных с компонента опроса АЦП;
- порт ввода-вывода *LED* — необходим для управления светодиодами;
- таймер — необходим для обеспечения задержек и измерения времени;
- компонент *as5048a_v2_0* — необходим для одновременного опроса нескольких энкодеров;
- порт *UART RS-232* — требуется для обмена данными с компьютером верхнего уровня;
- порт ввода-вывода *EV_GENERATOR* — требуется для программной генерации сигналов *event* в целях отладки;

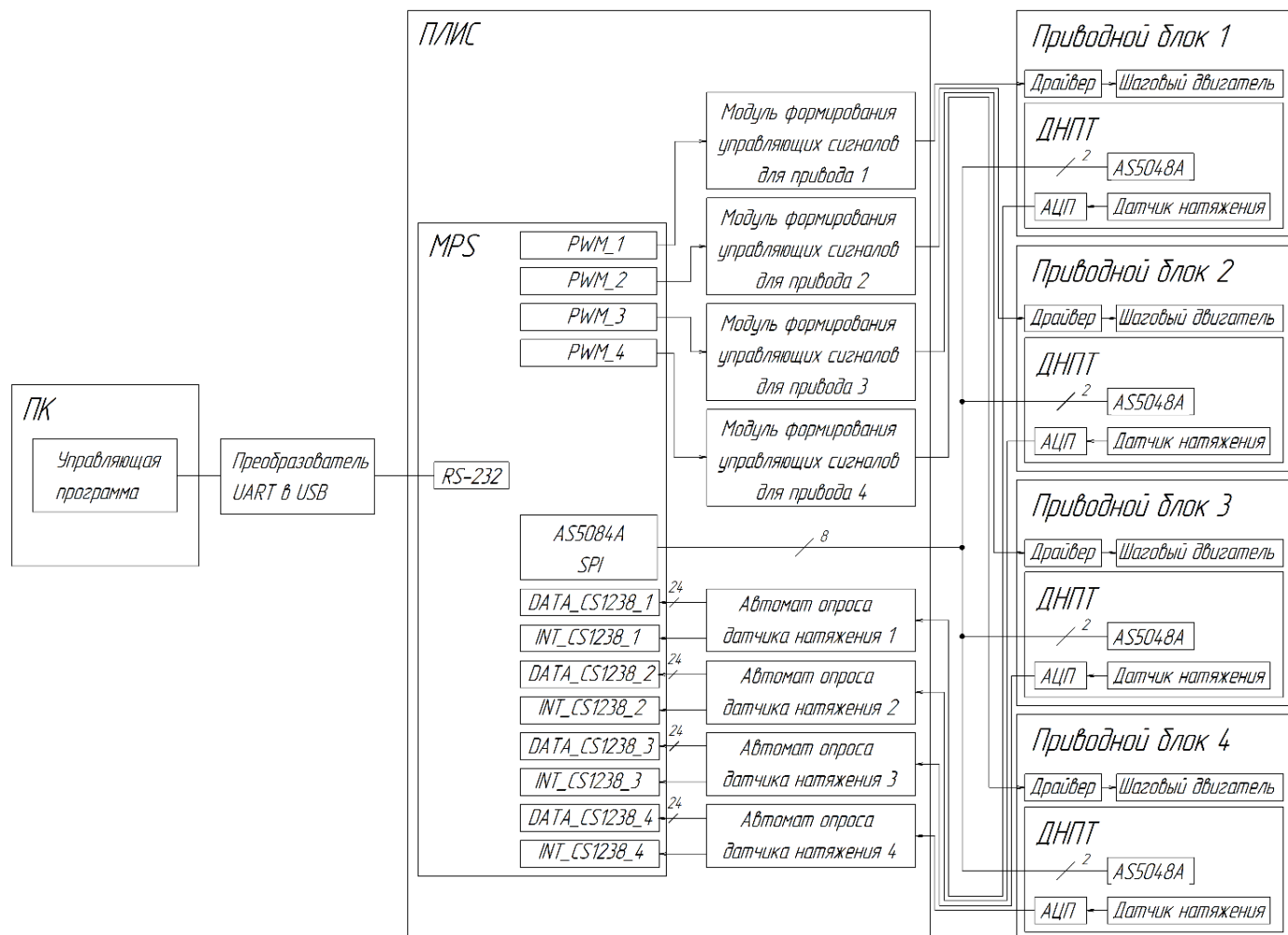


Рис. 5. Структура информационно-управляющего модуля смарт-привода

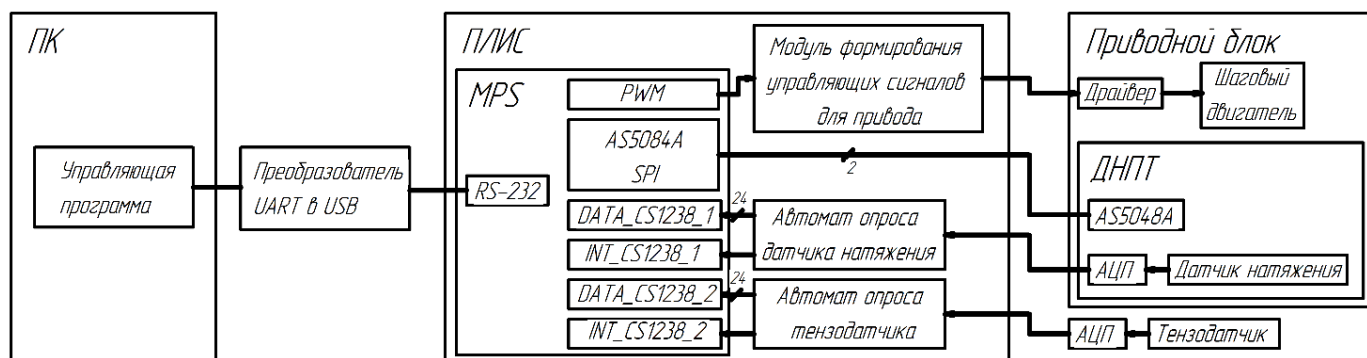


Рис. 6. Блок схема информационно-управляющего модуля для тестирования и калибровки датчиков

- компонент *avalon_pwm_0*, который генерирует ШИМ сигнал с управляемой частотой и периодом для управления шаговым двигателем;
- порт ввода-вывода *PWM_CNT* — необходим для задания количества импульсов счетчику импульсов ШИМа;
- порт ввода-вывода *DIR* — необходим для выбора направления вращения двигателя;
- порт ввода-вывода *DRIVER_EN* — необходим для разрешения работы драйвера;
- порт ввода-вывода *CNT_CLR* — необходим для сброса счетчика импульсов;
- порт ввода-вывода *PULSE* — необходим для программной генерации ШИМ сигнала;
- порт ввода-вывода *START_CNT* — необходим для отправки сигнала запуска счетчика импульсов;
- порт ввода-вывода *MODE_CNT* — сигнал смены режима счетчика (счетный/сквозной);
- порт ввода-вывода *CNT_END* — необходим для приема сигнала от счетчика об окончании счета.

Микропроцессорная система согласует работу всех компонентов, следует заданной программе и управляет работой всего модуля.

В качестве компонента опроса энкодеров было предложено использовать *SPI_n* [15] (рис. 7).

Особенностью компонента является общая управляющая схема для реализации алгоритма работы интерфейса *SPI*, многоканальная шина *SPI* для параллельного подключения датчиков и регистровый файл для синхронной записи полученных с датчиков данных. Размер

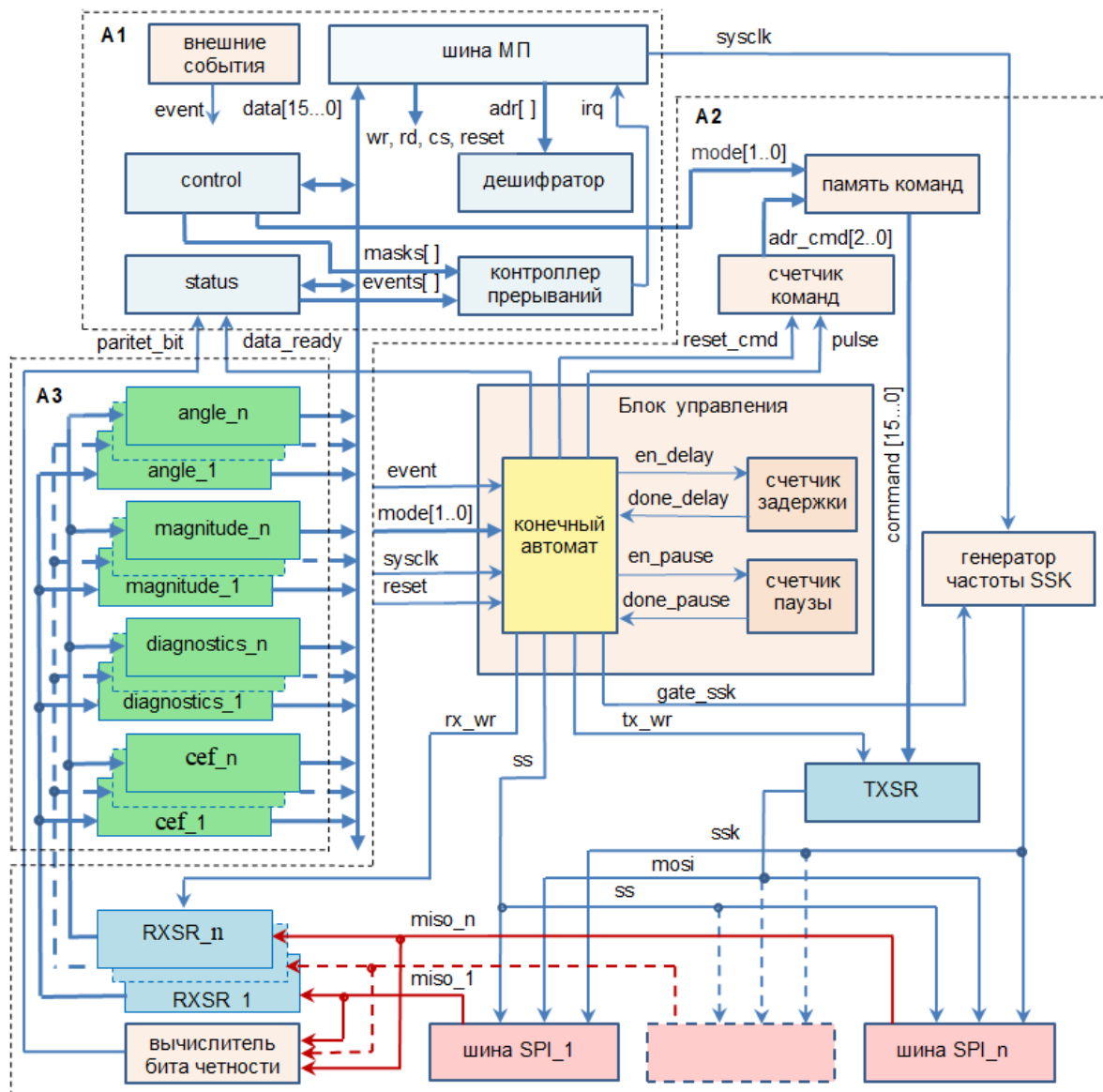


Рис. 7. Структура компонента *SPI_n*

Таблица 1. Адресное пространство компонента *SPI_n*

Адреса расположения данных	Наименование данных	Комментарий
<i>base+0</i>	<i>VERSION</i>	номер версии компонента <i>x"0201"</i>
<i>base+1</i>	<i>time_reg</i>	номер текущего опроса компонента
<i>base+2</i>	<i>status_reg</i>	регистр <i>"status"</i>
<i>base+3</i>	<i>control_reg</i>	регистр <i>"control"</i>
<i>base+4</i>	<i>agc_reg(1)</i>	регистр <i>"AGC"</i> датчика 1
<i>base+5</i>	<i>magnit_reg(1)</i>	регистр <i>"magnitude"</i> датчика 1
<i>base+6</i>	<i>angle_reg(1)</i>	регистр <i>"angle"</i> датчика 1
<i>base+7</i>	<i>cef_reg(1)</i>	регистр <i>"CEF"</i> датчика 1
-----	-----	-----
<i>base+4*N+0</i>	<i>agc_reg(N)</i>	регистр <i>"AGC"</i> датчика <i>N</i>
<i>base+4*N+1</i>	<i>magnit_reg(N)</i>	регистр <i>"magnitude"</i> датчика <i>N</i>
<i>base+4*N+2</i>	<i>angle_reg(N)</i>	регистр <i>"angle"</i> датчика <i>N</i>
<i>base+4*N+3</i>	<i>cef_reg(N)</i>	регистр <i>"CEF"</i> датчика <i>N</i>

регистрового файла определяется количеством опрашиваемых датчиков, которое задается в виде параметра, и автоматически вычисляется при его компиляции в пакете проектирования ПЛИС. В структуре компонента можно выделить 3-и функциональные части *A1–A3*. Модуль *A1* реализует интерфейс между компонентом и процессорной шиной и состоит из дешифратора адресов, регистра управления *control*, регистра состояния *status* и контроллера прерываний. С помощью дешифратора адресов реализуется доступ к внутренним регистрам компонента для записи и считывания данных. Разрядность шины адресов, которые на нее поступают, автоматически масштабируется в зависимости от количества датчиков, опрашиваемых с помощью компонента.

Регистр управления *control* задает режим работы компонента и маску для событий, по которым формируется сигнал прерывания. Режим работы компонента определяет набор данных с датчиков, который будет считываться в текущем опросе. В регистре состояния *status* фиксируются различные события во время работы схемы, одним из которых является конец текущего опроса датчиков. На эти события контроллер прерываний вырабатывает сигнал прерывания для процессора, если для них установлены разрешения в регистре управления *control*. Модуль *A2* осуществляет опрос датчиков по стандарту *SPI* и управление записью принятых данных в регистровый файл (модуль *A3*). Опрос датчиков инициируется по событию *event* (сигнал синхронизации опроса всех датчиков в системе управления), а последовательность команд опроса датчиков определяется режимом работы компонента, который задан в регистре контроля *control*, и хранится в памяти команд. В блоке «вычислитель бита четности» вычисляется бит четности при приеме данных для всего пакета и если он равен «1», то весь принятый пакет данных считается недостоверным. Адресное пространство компонента представлено в табл. 1.

Для работы с ПЛИС была использована программа *Intel Quartus Prime Lite 18.1* [16].

На рис. 8 представлен компонент опроса АЦП. Ком-

понент состоит из:

- делителя входной частоты (*Counter_CLKT*);
- схем выделения переднего и заднего фронтов (формирование сигналов *CLK_HX_F*, *CNT_CC_24_F*, *EN_F*);
- конечного автомата (*SensorRead_SM*);
- счетчика импульсов (*CycleCounter*);
- сдвигового регистра приема (*RXSR*);
- сдвигового регистра отправки (*SROUT*);
- блока с константой (*Const*);
- блока сравнения (*CMP*).

Конечный автомат (КА) управляет работой всей схемы. Его внутренняя структура представлена на рис. 9. В табл. 2 приведены состояния данного конечного автомата.

АЦП *CHIPSEA CS1238* готов к передаче при логическом нуле на выводе для передачи данных (*DOUT*), поэтому в начальном состоянии (*Init*) ожидается ноль на этом выводе и сигнал запуска *EV*. Получив эти сигналы, конечный автомат переходит состояние *CLK*, откуда по сигналу *CLK_T* переходит в состояние *T1*. В *T1* происходит сброс счетчика импульсов *CycleCounter*, по следующему сигналу *CLK_T* происходит переход в *T2*,

Таблица 2. Конечные состояния конечного автомата *SensorRead_SM*

Сигнал	Состояние КА					
	<i>Init</i>	<i>CLK</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>
<i>CLK_HX</i>	0	0	0	1	0	0
<i>CNT_24_EN</i>	0	0	0	1	1	0
<i>RX_WR</i>	0	0	0	0	0	1
<i>IRQ</i>	0	0	0	0	0	1
<i>CNT_24_RESET</i>	0	0	1	0	0	0

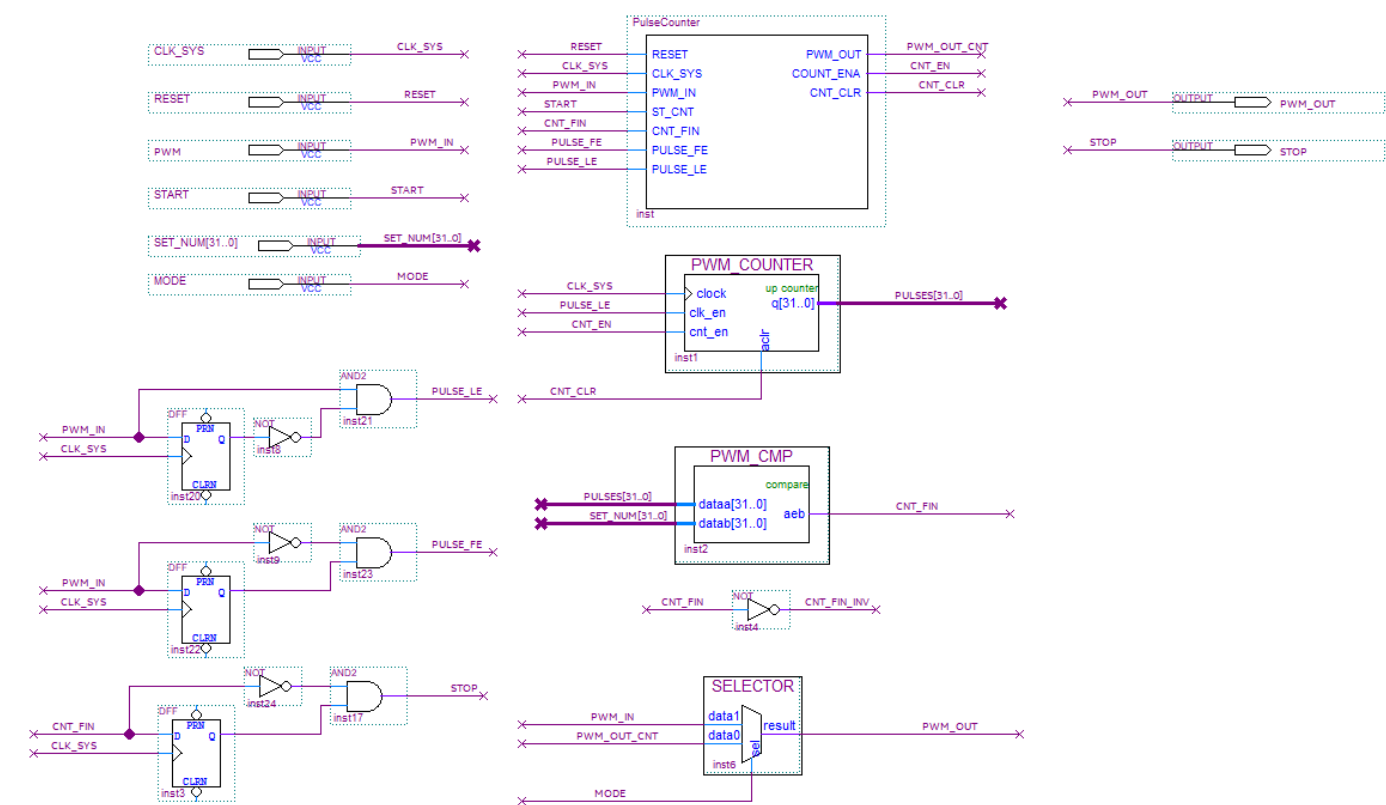


Рис. 10. Счетчик импульсов ШИМ

Когда приходит сигнал запуска ST_CNT , автомат переходит в состояние 5, отдает сигнал на очистку счетчика, ждет заднего фронта импульса ШИМ, если приходит задний фронт и не появляется сигнал об окончании счета, автомат переходит в состояние 2, где ожидает переднего фронта ШИМа, по переднему фронту происходит переход в состояние 3. В состоянии 3 сигнал об окончании отчета приводит к переходу автомата в состояние 4, а затем в начальное. При отсутствии сигнала об окончании счета автомат по низкому уровню сигнала ШИМ переходит в состояние 2. Цикл повторяется.

Счетчик $PWM_COUNTER$ отсчитывает число передних фронтов ШИМа, затем передает это число на компаратор. Компаратор считывает количество импульсов с 32-битной шины, идущей от микропроцессорной системы. Дойдя до некоторого числа импульсов, компаратор отдает сигнал CNT_FIN , по которому автомат перекрывает ШИМ.

На рис. 12 представлен результат симуляции компонента.

Было задано 10 импульсов, компонент выдал 10 импульсов. При получении сигнала $RESET$ счет прекращается. При переключении сигнала $MODE$ происходит переключение режима на сквозной.

Команды задаются на персональном компьютере в специальной управляющей программе. Команды из программы через интерфейс USB попадают на преобразователь USB в $UART$ и далее на компонент $RS-232$ микропроцессорной системы ПЛИС, происходит обработка и выполнение программы. К микропроцессорной системе подключен компонент $AS5048A\ SPI$, который контролирует работу двух датчиков перемещения троса. Компонент PWM отвечает за генерацию ШИМ сигнала, который в модуле формирования преобразуется в управляющий сигнал для драйвера, драйвер отдает сигналы на шаговый двигатель. На компоненты INT_CS1238 приходит сигнал о готовности данных на автомате опроса. $DATA_CS1238$ — шины данных автоматов. Автоматы опрашиваются через АЦП тензодатчик и датчик натяжения троса.

Таблица 3. Конечные состояния автомата *PulseCounter*

Сигнал	Состояние КА				
	State1	State5	State2	State3	State4
PWM_OUT	0	0	PWM_IN	PWM_IN	0
$COUNT_ENA$	0	0	1	1	0
CNT_CLR	1	1	0	0	1

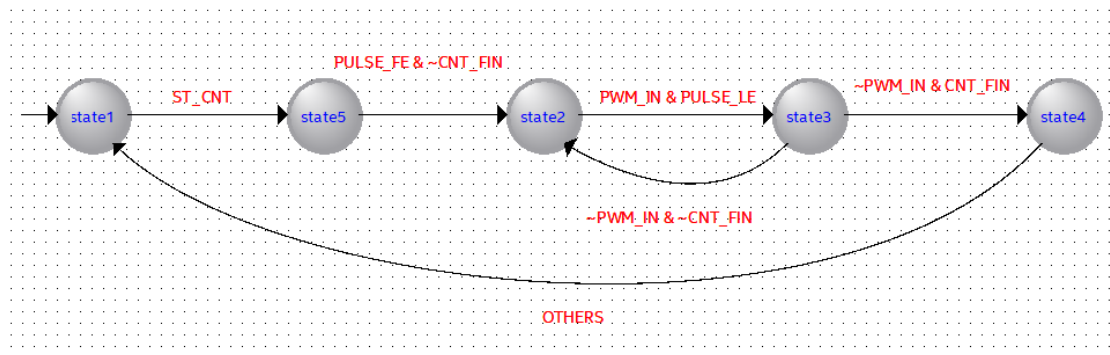
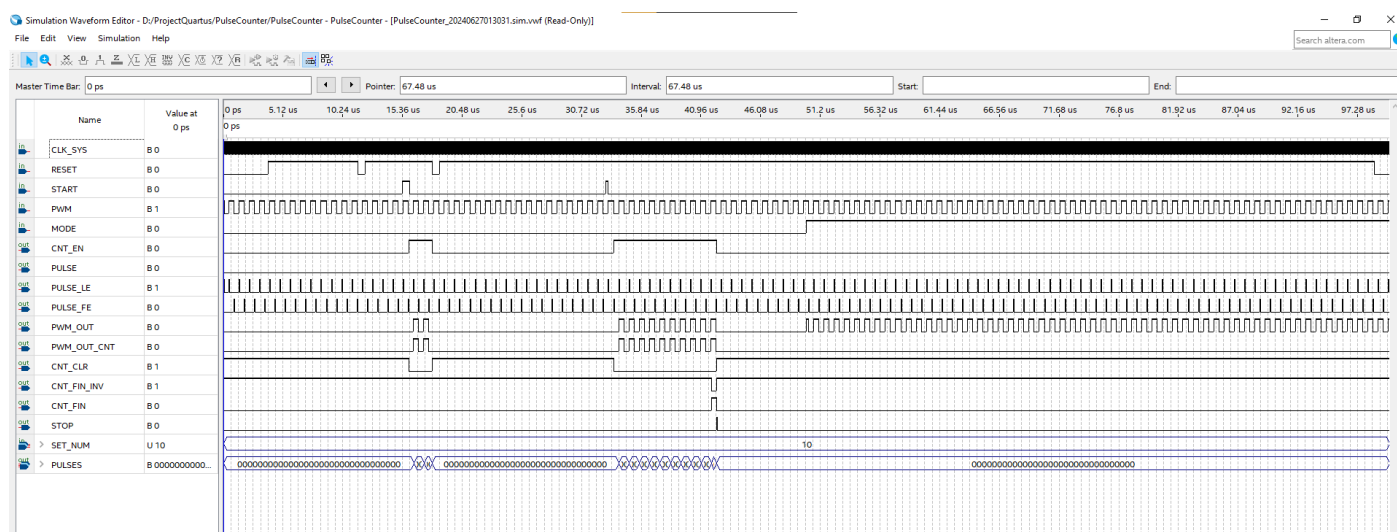
Рис. 11. Структура конечного автомата *PulseCounter*

Рис. 12. Функциональная симуляция счетчика ШИМ

5. Заключение

Разработанная на первом (конструкторском) этапе создания эскизного проекта смарт-привода схема была загружена во внутреннюю флеш-память ПЛИС. Для взаимодействия персонального компьютера верхнего уровня с синтезированной схемой системы управления смарт-привода необходимо на втором (технологическом) этапе разработать программное обеспечение, при помощи которого будет реализовываться не только управление приводом, но и корректно выполняться функция калибровки ДПНТ.

Список литературы / References

- [1] Богданов ДР, Даринцев ОВ. Конструктивные особенности манипуляторов с управляемым изгибом. *Современные проблемы науки и образования*. 2013;6:210. Bogdanov DR, Darintsev OV. Design features of manipulators with the controlled bend. *Modern problems of science and education*. 2013;6:210. (in Russian) EDN: RVCQVR
- [2] Юревич ЕИ. *Основы робототехники*. СПб.: БХВ-Петербург; 2010. 368 с. Yurevich EI. *Fundamentals of Robotics*. St.Petersburg: BHV-Petersburg; 2010. 368 p. (in Russian)
- [3] Solis JFP, Navarro GS, Linares RC. Modeling and Tip Position Control of a Flexible Link Robot: Experimental Results. *Computacion y Sistemas*. 2009;12(4):421–435. <https://www.cys.cic.ipn.mx/ojs/index.php/CyS/article/view/1213/1305>
- [4] VEDA MC. Серводвигатели. [online] <https://drives.ru/stati/servodvigateli-princip-raboty> (Дата обращения 22.09.2025). VEDA MC. Servomotors. [online] <https://drives.ru/stati/servodvigateli-princip-raboty> (Accessed 22.09.2025).
- [5] CNC-DESIGN. Шаговые двигатели – конструкция, принцип работы и применение. [online] <http://cnc-design.ru/shagovye-dvigateli-konstrukciya-princip-raboty-i-primenenie.html> (Дата обращения 22.09.2025). CNC-DESIGN. Stepper motors – design, operating principle and application. [online] <http://cnc-design.ru/shagovye-dvigateli-konstrukciya-princip-raboty-i-primenenie.html> (Accessed 22.09.2025).
- [6] Yang J, Peña-Pitarch E, Potratz J, Beck S. Synthesis and analysis of a flexible elephant trunk robot. *Advanced Robotics*. 2006;20(6):631–659. DOI: 10.1163/156855306777361631
- [7] Coulson R, Robinson M, Kirkpatrick M, Berg DR. Design and Preliminary Testing of a Continuum Assistive Robotic Manipulator. *Robotics*. 2019;8(4):84. DOI: 10.3390/robotics8040084
- [8] StepperOnline. Nema 11 Stepper Motor Bipolar L=51mm 0.67A w/ Gear Ratio 100:1 Planetary Gearbox. [online] <https://www.omc-stepperonline.com/nema-11-stepper-motor-bipolar-l-51mm-w-gear-ratio-100-1-planetary-gearbox-11hs20-0674spg100?srltid=AfmB0ooBIQTDYwVTJZp5GNVdvNwmBesf8y9V3MNcljKwYfSgEGL7JsA> (Accessed 01.03.2025).
- [9] Digital Stepper Driver DM320T. User Manual. [online] <https://www.omc-stepperonline.com/download/DM320T.pdf> (Accessed 22.09.2025).
- [10] Amazon. DYHW-108 Micro Button Load Cell Small Compression Force Sensor Tension Testing 8mm External Diameter 3kg 5kg 10kg 20kg 50kg 100kg (3kg Range). [online] <https://www.amazon.com/DYHW-108-Compression-Tension-External-Diameter/dp/B0C1NF3NVM?th=1> (Accessed 22.09.2025).

- [11] AMS. Ams AS5048A High-Resolution Position Sensor. [online] <https://look.ams-osram.com/m/287d7ad97d1ca22e/original/AS5048-DS000298.pdf> (Accessed 22.09.2025).
- [12] CHIPSEA. High-precision ADCs. CS1238. <https://en.chipsea.com/product/details/?id=1156&pid=77> (Accessed 22.09.2025).
- [13] Intel. Intel® MAX® 10 FPGA Device Datasheet. [online] https://cdrdv2-public.intel.com/666319/m10_datasheet-683794-666319.pdf (Accessed 22.09.2025).
- [14] FTDI Chip. FT232R USB UART IC Datasheet. [online] https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS_FT232R.pdf (Accessed 22.09.25).
- [15] Богданов ДР, УФИЦ РАН. Программа для моделирования и синтеза специализированного цифрового компонента ПЛИС опроса датчика магнитного энкодера AS5048A, версия 2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617721. 2024.
Bogdanov DR, UFRC RAS. Program for modeling and synthesizing a specialized digital FPGA component for polling the AS5048A magnetic encoder sensor, version 2. Certificate of state registration of the computer program No. 2024617721. 2024. (in Russian) EDN: BSJRWM
- [16] Intel. Intel® Quartus® Prime Lite Edition Design Software Version 18.1 for Windows. [online] <https://www.intel.com/content/www/us/en/software-kit/665990/intel-quartus-prime-lite-edition-design-software-version-18-1-for-windows.html> (Accessed 22.09.2025).

Сведения об авторах / Information about the Authors

Ивачев Артем Владимирович

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Artem V. Ivachev

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

artemkryakovski@yandex.ru

ORCID: 0009-0001-2130-2417

Даринцев Олег Владимирович

доктор тех. наук, профессор

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Oleg V. Darintsev

Sc.D. (Engineering), Prof.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

darintsevov@uust.ru

ORCID: 0000-0003-0246-1997

Богданов Динар Рафаэлевич

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Dinar R. Bogdanov

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

dr_bog@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4481-7103