

Статья опубликована в научно-техническом сборнике «Системы управления и обработки информации». 2013. Вып. 26, с. 128 – 135.

УДК 621.039.564

Ю. Ю. ЯНКИН, А. А. ШАЛЫТО, доктор техн. наук, профессор

## МЕТОД СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДУЛЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Автоматизированный электропривод является неотъемлемой частью систем управления техническими средствами (СУ ТС) кораблей и судов. Системы управления электроприводами, выполненные как аналоговые, цифровые или комбинированные, входят в качестве локальных систем в общую иерархическую структуру автоматизированной СУ ТС [1] (рис. 1). Она содержит объект управления, систему управления, локальные системы 1, 2...n (системы управления электроприводами).

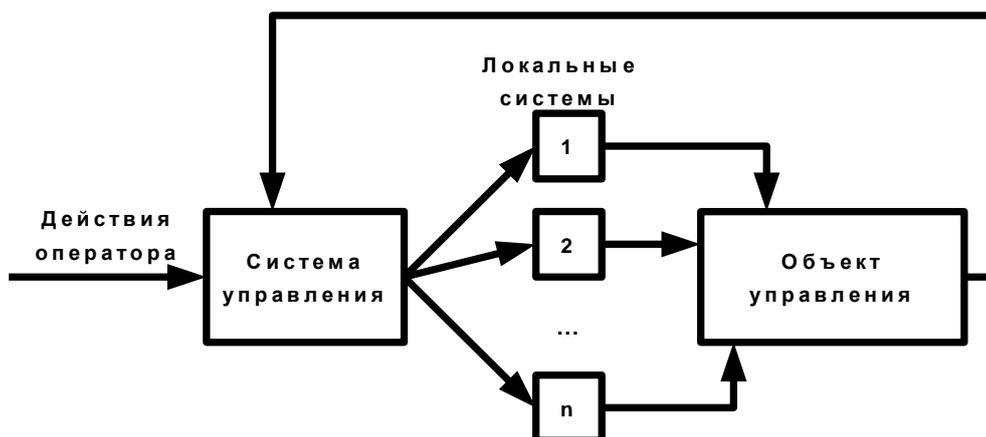


Рис. 1. Общая иерархическая структура СУ ТС

В системах управления и защиты (СУЗ) ядерной энергетической установки (ЯЭУ) локальные системы управления исполнительным механизмом органа воздействия на реактивность (далее ИМ) представляют собой разомкнутые системы регулирования положения. Традиционно такие исполнительные механизмы выполняются на основе специально разработанного шагового двигателя (ШД). Структурная схема такой локальной системы управления приведена на рис. 2.

Она содержит: вторичный источник питания 1 – для питания модулей 4 – 6, источник 2 – для питания силового преобразователя модуля 5, источник 3 – для питания силового преобразователя модуля 6, модуль программного управления (МПУ) 4 – для формирования режимов работы электропривода и уставок токов фаз ШД в соответствии с сигналами, поступающими из системы более высокого уровня, модуль выходных каскадов

(МВК) 5 – для формирования токов фаз ШД в соответствии с уставками, поступающими из модуля программного управления, контроля их достоверности и управления электроприводом в случае отказа модуля программного управления, а модуль подхвата (МПХ) 6 – для контроля токов, формируемых МВК, и удержания шагового двигателя в достигнутом положении при неисправности МВК.

Ранее такие модули создавались на основе аналоговых и цифровых микросхем низкой степени интеграции, для которых отсутствовала возможность программирования. Такая реализация обладает рядом недостатков: любое изменение алгоритма требует доработки печатных плат и электро монтажа модуля, сложность разработки схемы по словесному описанию алгоритма работы, сложность отладки, отсутствие возможности формальной верификации, сложность понимания Заказчиком, габаритные размеры, высокое энергопотребление.

Следующим этапом развития было создание модулей на основе микроконтроллеров семейства C167 фирмы *Siemens*, что позволило решить часть проблем. При этом, например, изменение алгоритма работы модуля не всегда требовало доработки печатных плат и электро монтажа. Однако, появились новые недостатки: требуется привлечение специалиста по программированию или освоение разработчиком модуля дополнительной специальности, сложность разработки программы по словесному описанию алгоритма работы, сложность понимания Заказчиком, сложность отладки, отсутствие возможности верификации.

Дальнейшее развитие микроэлектроники привело к появлению средств, позволяющих совместить аппаратную реализацию с программируемостью: программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

Традиционно программирование ПЛИС осуществляется с использованием языков описания аппаратуры (*Verilog, VHDL*), а также создания функциональных схем из библиотечных блоков. Однако, при таком подходе также требуется привлечение специалиста по программированию, соответственно сохраняются недостатки присущие программной реализации.

Модули управления ИМ 4, 5, 6 могут быть построены на основе аналоговых микросхем, цифровых микросхем низкой степени интеграции, цифровых микросхем высокой степени интеграции или микроконтроллеров.

Развитие программного обеспечения привело к появлению средств проектирования, не требующих привлечения программистов к программированию ПЛИС. Примерами таких средств являются пакет *MATLAB-Simulink*, его расширение *Stateflow*, а также пакет фирмы *Altera Quartus II*.

Целями работы при проектировании модулей МПУ, МВК, МПХ являлись: исключение трудоемкого процесса ручного программирования, привлечение специалистов по автоматике и силовым полупроводниковым преобразователям к разработке программного обеспечения, наглядность, простота восприятия, документируемость, модифицируемость программы, повышение степени автоматизации процесса разработки ПО, повышение качества ПО, в частности, за счет возможности обеспечения верификации.

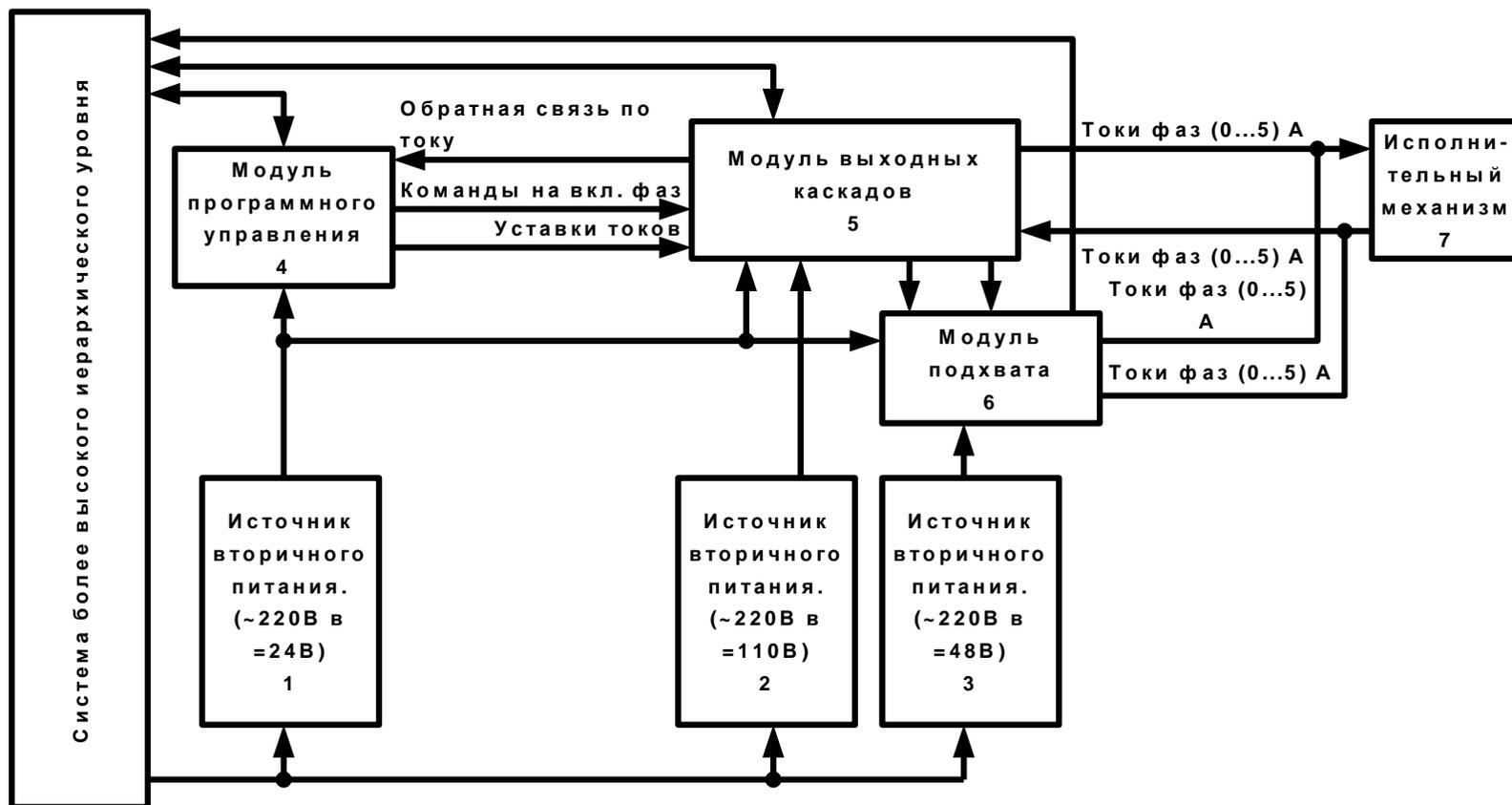


Рис. 2. Структурная схема локальной системы управления ИМ

В работах [2, 3] было предложено распространить автоматное программирование на задачи программирования ПЛИС – представить программное обеспечение модуля в виде системы автоматизированных объектов управления [4, 5], устройство управления в которых представляет собой конечный автомат (управляющая машина состояний), задаваемый в виде графа переходов.

В результате **была разработана технология программирования ПЛИС**, реализованная в модулях программного управления (МПУ), выходных каскадов (МВК), подхвата (МПХ). Вопрос о создании программ управления электроприводом для микроконтроллеров описан в работах [5, 6].

В качестве примера рассмотрим МВК, так как он выполняет наибольшее число разнообразных функций. Этот модуль должен обеспечивать:

- а) выполнение алгоритмов работы системы при управлении шаговым электродвигателем;
- б) возможность ввода 24 дискретных сигналов;
- в) возможность вывода 20 дискретных сигналов;
- г) поддержание тока в четырех обмотках шагового двигателя по уставкам, поступающим из модуля МПУ;
- д) формирование четырёх токов заданной формы при отказе модуля МПУ;
- е) защиту от ЭДС самоиндукции;
- ж) защиту короткого замыкания в нагрузке;
- з) контроль обрыва нагрузки;
- и) контроль величины напряжения питания силового преобразователя.

Модуль содержит два узла: узел функциональный (УФ) и узел усилительный (УУ).

Первый узел (УФ) содержит ПЛИС, гальваническую развязку входных и выходных сигналов, а также преобразователи логических уровней напряжения. Программу ПЛИС можно условно разделить на две части: управляющая машина состояний и регуляторы токов фаз. Узел предназначен для контроля достоверности сигналов, поступающих из МПУ, формирования токов фаз по уставкам, также поступающим из модуля МПУ, управления электроприводом в случае отказа МПУ, формирования сигналов управления силовым преобразователем, а также контроля исправности МВК.

Второй узел (узел УУ) содержит четырехканальный силовой преобразователь, датчики токов фаз с нормированием их характеристик, устройство контроля исправности силового преобразователя и предназначен для усиления сигналов управления силовым преобразователем, формирования сигналов датчиков тока и контроля исправности силового преобразователя. Узел УУ не содержит программируемых микросхем, поэтому ПО узла УФ является также ПО модуля.

Структура программного обеспечения модуля выходных каскадов представлена на рис. 3. Она содержит функциональные блоки програм-

мы: ввод сигналов и защита от дребезга (1), управляющую машину состояний (2), четыре ПИ-регулятора (3.1...3.4), широтно-импульсный модулятор (ШИМ, 4), четыре коммутатора (5.1...5.4) и контроллер АЦП.

Все функциональные блоки программы реализуются с помощью программного комплекса *MATLAB*. По причине сложности комплексного моделирования всех блоков программы, связанного с большим соотношением постоянных времени, создание программы разделяется на два этапа: создание и моделирование управляющей машины состояний; создание и моделирование контура регулирования тока. Блоки программы 1, 2, 5, 6, содержат конечные автоматы, а блоки 3, 4 не содержат конечных автоматов.

Рассмотрим технологию создания блоков, содержащих автоматы.

Первым шагом является разработка перечня и описания входных и выходных переменных и параметров. На этом этапе определяется также их тип и направление (вход или выход). Это описание является неотъемлемой частью модели блока программы и разрабатывается средствами *MATLAB*.

На следующем этапе необходимо получить от Заказчика алгоритм работы модуля в виде словесного описания и временных диаграмм. На основании полученного описания проектируется система графов переходов конечных автоматов средствами *MATLAB-Simulink* и его расширения *Stateflow* [7]. Спроектированный граф переходов моделируется с целью проверки соответствия требуемому алгоритму работы. На рис. 4 представлен фрагмент такого графа переходов.

Второй этап создания программы – синтез контура регулирования тока начинается с разработки средствами *MATLAB-Simulink* модели контура регулирования тока, которая содержит: цифровой ПИ-регулятор, ШИМ, коммутатор, модель объекта управления, модель датчика тока. Силовой преобразователь представляет собой нереверсивный полумостовой преобразователь. Известными из теории автоматического управления методами производится синтез регуляторов тока и производится моделирование контура регулирования тока.

Следующий этап является общим для всех функциональных блоков программы. Из всех блоков ПО, разработанных на предыдущих этапах, средствами *MATLAB* генерируется код на языке *VHDL*. Из полученных функциональных блоков ПО средствами производителя ПЛИС по структурной схеме ПО разрабатывается принципиальная схема. Последний этап – компиляция и загрузка программы в ПЛИС – также производится средствами САПР производителя ПЛИС.

На рис. 5 приведены результаты испытаний опытно-поставочного образца. Испытания проводились в условиях стенда, модули были установлены в штатный прибор, в качестве нагрузки использовались штатный электропривод с нагрузочным устройством, обеспечивающим номинальную нагрузку на валу двигателя. Результаты испытаний совпали с результатами моделирования.

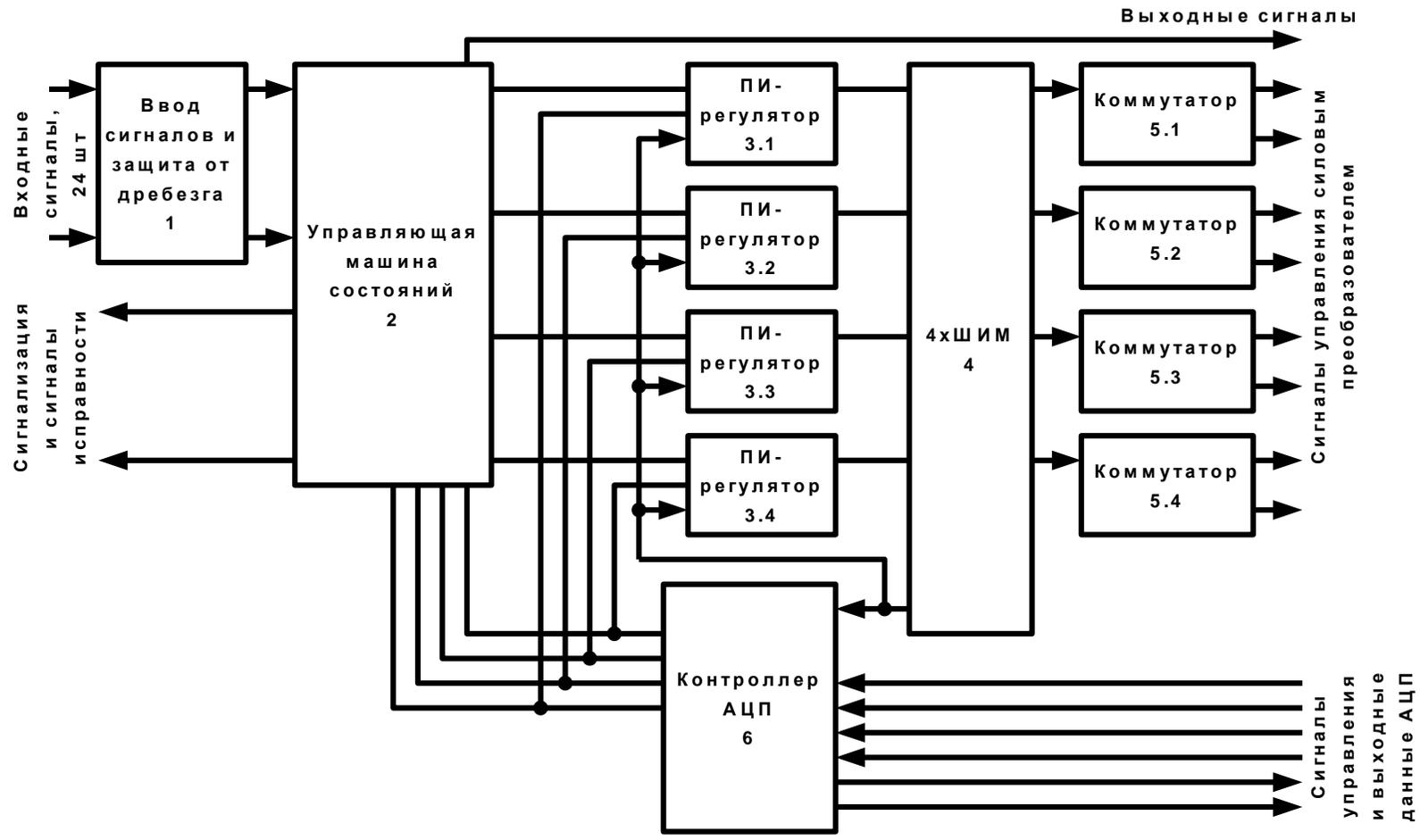


Рис. 3. Структура программного обеспечения модуля

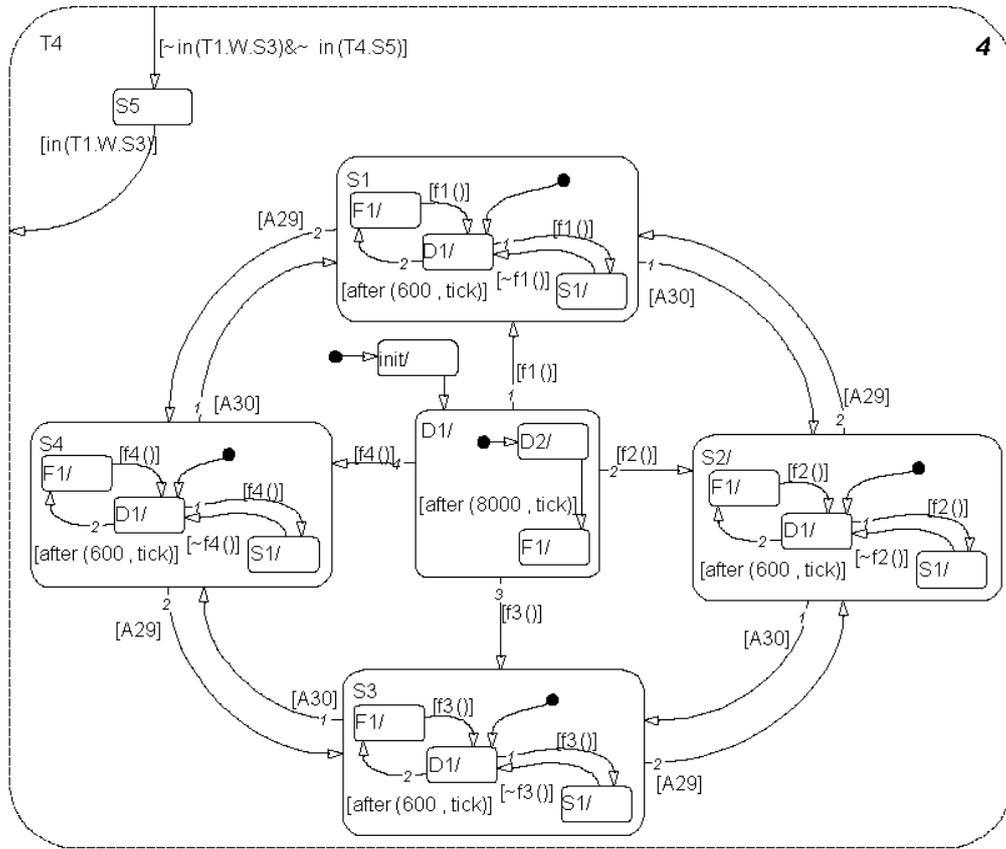


Рис. 4. Фрагмент системы графов переходов конечных автоматов модуля МК

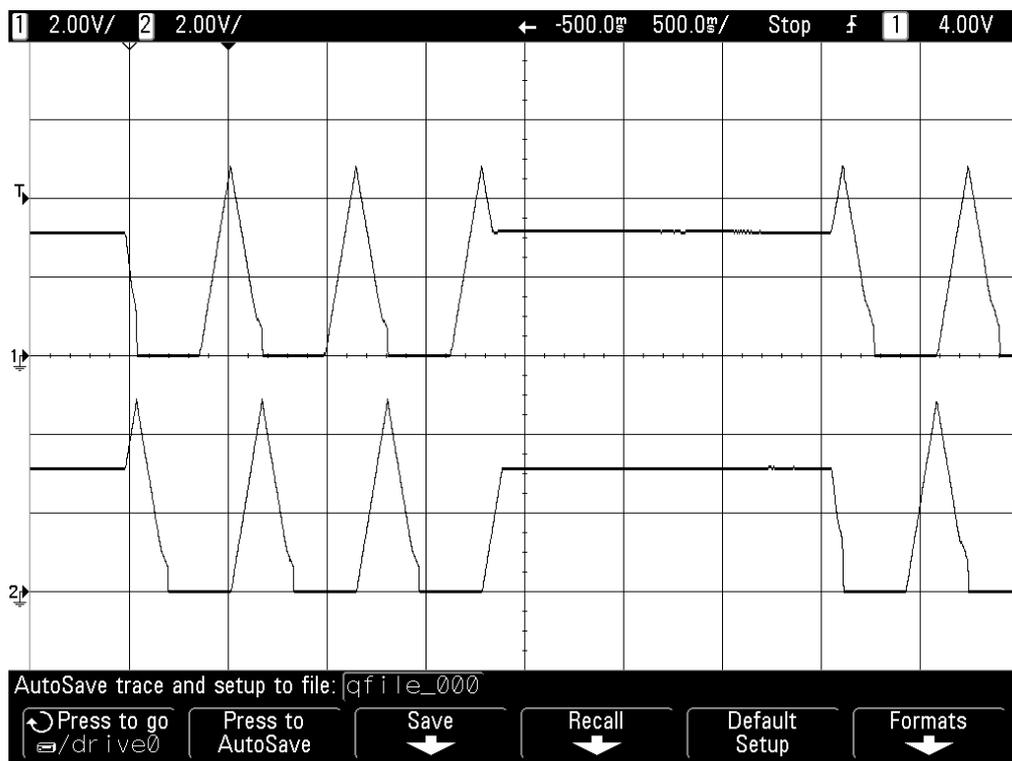


Рис. 5. Результаты испытаний опытно-поставочного образца

Два образца системы управления и защиты, в которой применены модули, созданные с использованием приведенной технологии, прошли межведомственные испытания и отгружены заказчику. Опытно поставочный образец еще одной системы, другого типа, находится на этапе предварительных испытаний. На основании результатов комплексной отладки трех и межведомственных испытаний двух систем можно сказать, что внесение изменений в ПО на этапе комплексной отладки происходит достаточно просто, а по результатам МВИ не возникло необходимости вносить изменения в ПО модулей. Также следует отметить положительный отзыв заказчика – представитель *ОКБМ им. Африкантова*, член межведомственной комиссии, отметил основные достоинства новых модулей по сравнению с предыдущими реализациями: простоту изменения алгоритмов работы и выходных параметров модулей и реализованную впервые возможность проведения диагностики исполнительного механизма без дополнительного оборудования и извлечения модулей из прибора.

С использованием приведенной технологии был создан ряд модулей управления электроприводами: модуль *БУИР-2*, предназначенный для управления электроприводом имитатора руля и входит в состав специальных средств контроля, модуль *МСУ МК*, представляющий собой макетный образец унифицированного модуля следящего управления

электроприводом на основе синхронных электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов, модули *БУМ ШД*, *МПУЗ*, *МВК-ПКЗ*, *МПУ4*, *МВК-ПК4*, *МПХ2*, *МУКГ*, предназначенные для управления исполнительным механизмом органа воздействия на реактивность.

Модули *БУИР-2*, *МУКГ*, *МСУ МК* в настоящее время находятся на этапе регулировочно-наладочных работ.

Модуль *БУМ ШД* разработан на основе микросхемы семейства *Cyclone I* фирмы *Altera* с емкостью 12 000 логических элементов, модули *МПУЗ*, *МВК-ПКЗ* – на основе микросхем семейства *Cyclone II* с емкостью 5 000 логических элементов, модули *БУИР-2*, *МПУ4*, *МВК-ПК4*, *МПХ2*, *МУКГ*, *МСУ МК* – на основе микросхем семейства *Cyclone III* с емкостью 16 000 логических элементов.

## Выводы

Применение модельно-ориентированной технологии автоматного программирования ПЛИС позволило исключить процесс ручного программирования, привлечь специалистов по автоматике и силовым полупроводниковым преобразователям к разработке программного обеспечения.

Автоматные программы по сравнению с традиционными наглядны, доступны для интуитивного понимания, хорошо документируются, легко модернизируются даже человеком, который не принимал участия в их разработке.

При использовании предлагаемой технологии процесс программирования ПЛИС существенно формализован, что уменьшает число ошибок и облегчает его применение, а также возможно использование методов формальной верификации.

## Список литературы

1. **Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г.** Управление электроприводами: учебное пособие для вузов. Л.: Энергоиздат. 1982.
2. **Янкин Ю. Ю., Шалыто А. А.** Автоматное программирование ПЛИС в задачах управления электроприводом // *Информационно-управляющие системы*. 2011. №1, с. 50 – 56.
3. **Янкин Ю. Ю., Шалыто А. А.** Применение автоматного подхода при программировании модулей управления шаговыми двигателями, выполненных на основе ПЛИС // *Системы управления и обработки информации*. 2011. Вып. 22, с. 92 – 103
4. **Harel D.** Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems // *Science of Computer Programming*. 1987. Vol 8, pp. 231 – 274.
5. **Поликарпова Н. И., Шалыто А. А.** Автоматное программирование. СПб.: Питер, 2010.

6. **Козаченко В. Ф.** Эффективный метод программной реализации дискретных управляющих автоматов во встроенных системах управления // Электропривод и автоматика. URL: [http://www.motorcontrol.ru/publications/state\\_machine.pdf](http://www.motorcontrol.ru/publications/state_machine.pdf) (дата обращения 25.10.2010).
7. **Basic Workflow for Building a Stateflow Chart** / R2010b MathWorks Documentation. URL: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/stateflow/gs/bqnmvk8.html> (дата обращения 26.10.2010).