

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-127-136

УДК 681.511.42:622.678.5

РЕАЛИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ПЛИС СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ АВТОМАТИКИ И ЗАЩИТ ПОДЪЁМНОЙ УСТАНОВКИ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

IMPLEMENTATION OF THE FPGA-BASED TECHNOLOGICAL AUTOMATION AND PROTECTION SYSTEM OF THE MINE HOIST WITH AC-POWERED ELECTRODRIVE

Островляничик Виктор Юрьевич,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: niaep@kuz.ru

Ostrovlyanchik Victor Yu., D. Sc., Professor

Кубарев Василий Анатольевич,

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: kubarev.sibsiu@list.ru

Kubarev Vasily A., C. Sc., Associate Professor

Корнеев Виктор Александрович,

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: korneev_va@list.ru

Korneev Victor A., C. Sc., Associate Professor

Галлямова Ольга Радиковна,

соискатель, e-mail: 20gao15@mail.ru

Gallyamova Olga R., postgraduate

Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Siberian State Industrial University, 42 Kirova street, Novokuznetsk, 650007, Russian Federation

Аннотация. В настоящей работе предложена реализация системы технологической автоматики и защит подъёмной установки с электроприводом переменного тока на основе ПЛИС. Приведены техническая структура и функциональная схема системы технологической автоматики и защит, приведены примеры реализации отдельных модулей. Рассмотрено применение автоматного программирования и принципа модульности при реализации системы технологической автоматики и защит, построенных на основе микросхем программируемой логики. Показана эффективность подобного подхода. Приведены временные диаграммы модулей.

Abstract. The paper is devoted to an implementation of the FPGA-based technological automation and protection system of the mine hoist. The structure of the technological automation and protection system is proposed. Examples of implementation of some modules are given. The application of automata-based programming and the principle of modularity in the implementation of the technological automation and protection system, built on the basis of programmable logic devices are considered. The effectiveness of this approach is shown. The time diagrams of the modules are given.

Ключевые слова: шахтная подъёмная установка, система технологической автоматики и защит, ПЛИС, автоматное программирование, электропривод, конечный автомат.

Keywords: mine hoist, technological automation and protection system, FPGA, automata-based programming, electric drive, finite state machine.

Введение

В настоящее время на многих шахтных подъёмных установках (ШПУ) применяются релейно-контакторные схемы или схемы автоматики, выполненные на элементах «Логика», а также электромеханические аппараты задания хода АКХ или АЗК-1 в комплекте с указателем глубины сельсинным УГС-3 или колонкой

указателя глубины [1], что уже не просто не соответствует современному развитию науки и техники в данной области, но и не позволяет достаточно безопасно эксплуатировать подъёмную установку. Наиболее тяжёлая ситуация складывается в угольной промышленности, где срок эксплуатации многих подъёмных машин более 20 лет, доходя до 40-50

лет [2].

Длившаяся последние 10-15 лет тенденция к строительству разрезов и ведению открытой добычи угля уже истощает себя и вводимые в настоящее время в эксплуатацию в Кузбассе предприятия будут в основном ориентированы на подземную добычу угля [3]. Потребление угля в мире в последние годы непрерывно увеличивается [4], а текущее состояние подъёмных машин не позволит выйти на требуемый уровень производительности шахты [5], то есть подъёмная машина может стать «узким местом» в работе предприятия, ограничивая производительность шахты в целом.

Системы управления, системы технологической автоматики и защит (СТАЗ) подъёмных машин (ШПМ) требуют срочной модернизации. Такие системы в настоящее время разрабатываются и предлагаются к внедрению как российскими [6, 7], так и иностранными разработчиками [8, 9, 10].

Все перечисленные устройства выполняются на программируемых контроллерах различных производителей, что является избыточным для

подобных систем и приводит к их удорожанию, модернизация эксплуатируемых в настоящее время подъёмов становится экономически неэффективной так как, срок окупаемости при проведении модернизации нередко превышает нормативный.

Кроме того, применение систем с программным управлением на опасных производственных объектах (ОПО) несет ряд опасностей, связанных в частности с внедрением и исполнением вредоносного кода, закичиванием процессора в период исполнения или появлением в исполняемом коде ошибок вызванных тепловым или радиационным воздействием [11, 12]. Системы, реализованные с применением программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), подобных недостатков лишены, что позволяет обеспечить большую безопасность при работе подъёмной машины. Недостатком таких систем можно назвать невозможность оперативного (например, дистанционного по сети) изменения прошивки ПЛИС, в отличие от программы контроллера.

Анализ литературы показал, что в последнее

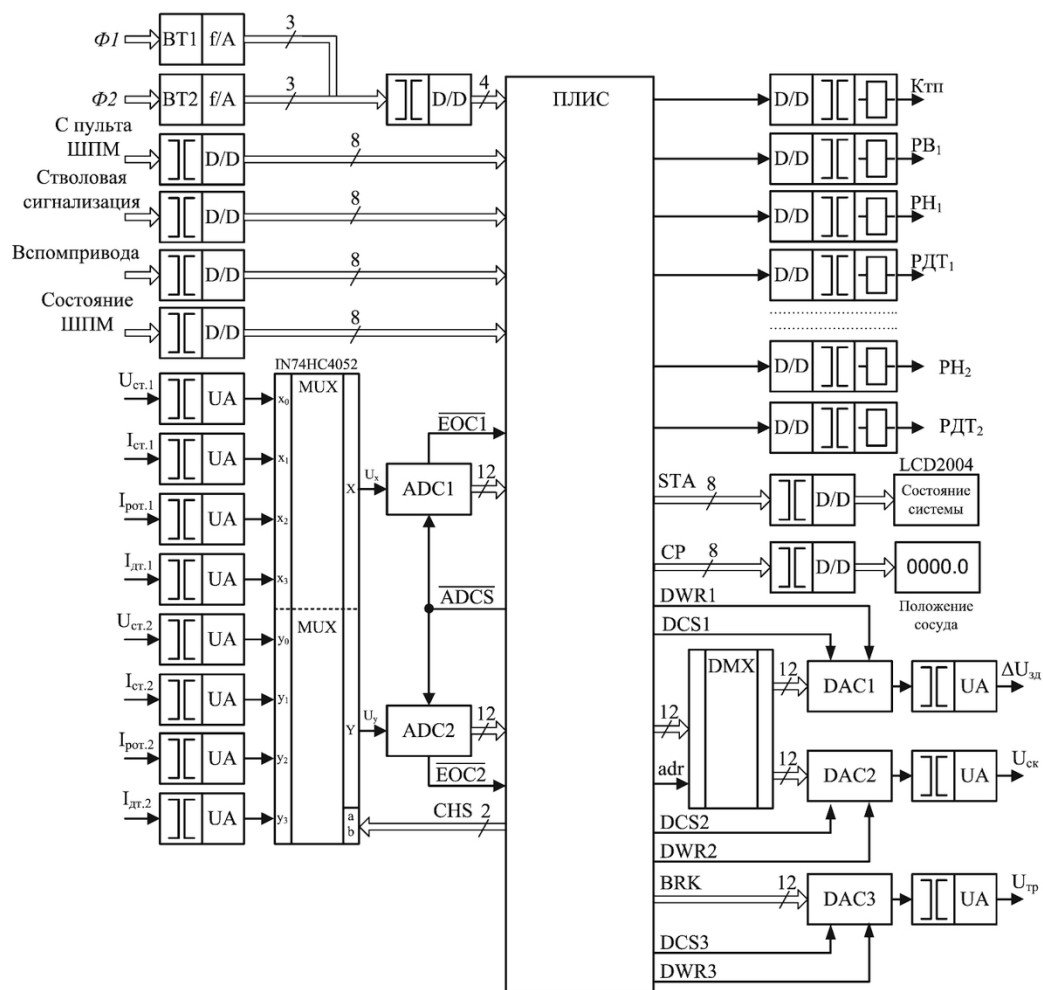


Рис. 1. Блок схема системы технологической автоматики и защит на основе ПЛИС
Fig. 1. Block diagram of the FPGA-based technological automation and protection system

время ПЛИС активно используются для разработки как систем управления приводами [13] так и различных систем сбора данных защит и мониторинга [14].

Аппаратная реализация

На кафедре электротехники, электропривода и промышленной электроники Сибирского государственного индустриального университета совместно с ООО «НИИ АЭМ СибГИУ» на основе ПЛИС разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК), предназначенный для реализации функций аппарата задания и контроля хода, указателя положения подъемного сосуда (указателя глубины) и системы автоматики и защит подъёмной машины. Комплекс построен на базе ПЛИС Cyclone IV E.

Разработанный ПАК реализует основные защиты шахтных подъёмных установок, регламентированные Правилами безопасности в угольных шахтах [15, п. 312] и Правилами безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых [16, п. 456].

Блок-схема системы автоматики и защит подъёмной установки с двухдвигательным приводом, реализованная на базе ПЛИС, приведена на рис. 1

Программно-аппаратный комплекс включает в себя следующие основные элементы:

- ПЛИС Cyclone IV E, на которой реализована логика работы системы автоматики и защит;
- восемь модулей гальванической развязки и нормализации аналоговых сигналов;
- два 12-ти разрядных АЦП AD7892-1 (ADC1, ADC2) с частотой до 500 тысяч выборок в секунду;
- двунаправленный аналоговый мультиплексор IN74HC4052 (MUX);
- модули гальванической развязки дискретных сигналов на основе диодных оптопар на 36 каналов (32 канала для ввода сигналов с внешних устройств и 4 канала для ввода импульсов с инкрементных шифраторов);
- модули гальванической развязки дискретных выходных сигналов на основе диодных оптопар и реле;
- аналоговый 12-разрядный демultipлексор 12FST16292 (DMX);
- три 12-разрядных цифро-аналоговых преобразователя AD5340 (DAC1...DAC3);
- модули гальванической развязки выходных аналоговых сигналов (UA);
- память для хранения конфигурации ПЛИС;
- источники питания. Источник питания логических элементов схемы и источник питания 24В «сухих контактов» входных дискретных сигналов и выходных реле.

Входные дискретные сигналы имеют групповую гальваническую развязку до 1000 В группами по восемь сигналов. Групповая развязка позволяет гальванически отвязать друг от друга сигналы с разных точек ввода.

Канал ввода аналогового сигнала включает в себя блок гальванической развязки и нормализации аналогового сигнала, аналоговый мультиплексор и АЦП. Модули гальванической развязки и нормализации аналоговых сигналов выполнены на основе усилителей TL072i и оптопар HCNR200, что позволяет обеспечить высокую линейность сигнала. После нормализаторов сигналы поступают на двунаправленный аналоговый мультиплексор IN74HC4052, особенность которого — одновременное управление параллельными каналами X и Y, что позволяет одновременно опрашивать парные каналы с двигателей.

Для обеспечения максимальной скорости опроса два 12-битных аналогово-цифровых преобразователя AD7892-1 работают в режиме параллельного вывода данных, и подключены по схеме (рис. 2), рекомендованной производителем для подключения АЦП к ПЛИС [17].

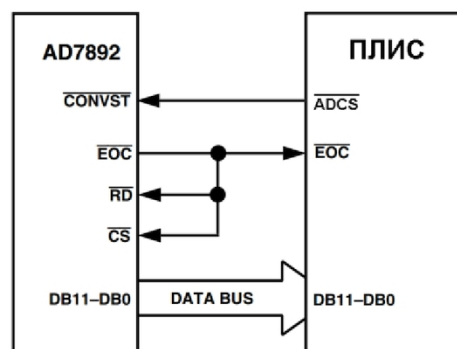


Рис. 2. Схема подключения АЦП AD7892 к ПЛИС
Fig. 2. ADC AD7892 to Gate Array Interface

Выходные сигналы включают в себя:

- дискретные сигналы управления, поступающие через модули гальванической развязки на диодных оптопарах на выходные реле, используемые для коммутации контакторов и силовых реле в цепях управления подъёмной машины;
- две группы 8-битных информационных сигналов STA и CP. Группа сигналов STA используется для отображения состояния системы на панели состояния, а группа сигналов CP для передачи данных на панель цифрового указателя глубины;
- информационные и управляющие аналоговые выходные сигналы, формируемые тремя ЦАП типа AD5340.

Программная реализация

При создании ПАК применялся принцип

5. Модуль цифровой фильтрации аналоговых сигналов — производит цифровую фильтрацию и

2. Модуль вычисления положения и скорости

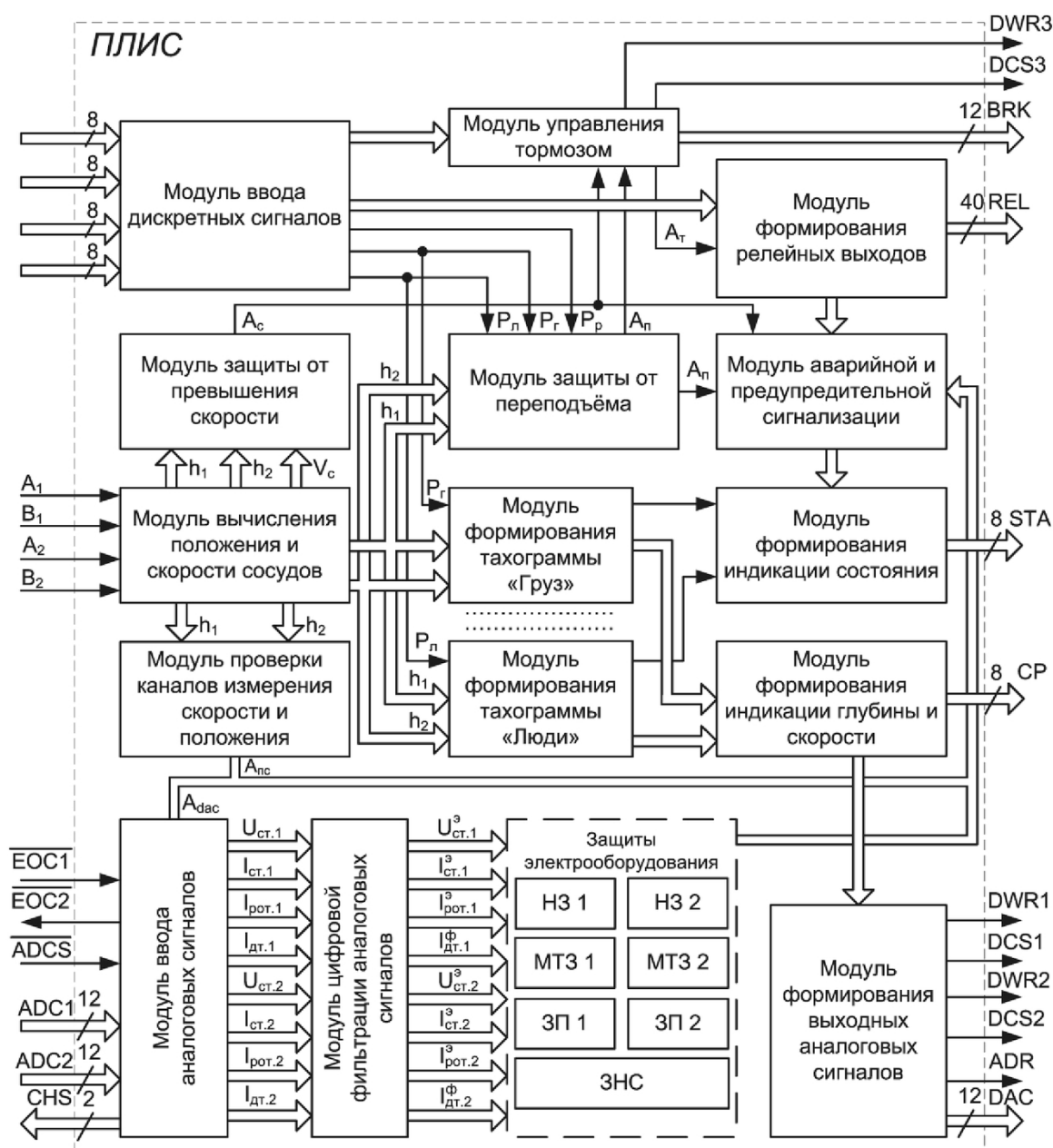


Рис. 3. Основные модули системы технологической автоматики и защит в ПЛИС

Fig. 3. Main blocks of the FPGA-based technological automation and protection system

расчет действующего значения аналоговых сигналов токов и напряжений.

6. Модуль управления тормозом — преобразует цифровой сигнал командоаппарата управления рабочим тормозом ШПМ в значения ЦАП для формирования выходного сигнала ($U_{тр}$) на катушку управления рабочим тормозом КрТР блока управления тормозом (БУТ), а при предохранительном торможении формирует первую ступень торможения, снятием с катушки предохранительного тормоза КрТП напряжения по заданному алгоритму.

7. Модуль формирования релейных выходов — на основе сигналов состояния внутренних модулей формирует слово управления внешними реле с учетом ограничений наложенных режимами работы и аварийными состояниями.

8. Модули формирования тахограмм для режимов работы подъемной машины: «Груз», «Люди» «Ревизия» «Оборудование» (на схеме показаны формователи для двух режимов «Груз» и «Люди»).

10. Модули защиты электрооборудования — реализует основные защиты электрооборудования подъемной машины [15, 16]: нулевая защита (НЗ), максимальная токовая защита (МТЗ), защита от перегрузки (ЗП), защита от несимметричной работы двигателей (ЗНС).

11. Модуль аварийной и предупредительной сигнализации — сравнивает параметры входных величин с определёнными пороговыми значениями и по их значению разрешает или запрещает работу ШПМ.

12. Модуль формирования индикации

состояния — на основании данных с модулей формирует 8-разрядное управляющее слово СТА передаваемое на панель индикации состояния ШПМ.

13. Модуль формирования индикации глубины и скорости — на основании данных с модуля вычисления положения и скорости сосудов и модулей формирования тахограмм формирует 8-разрядное управляющее слово СР передаваемое на ЖК-дисплей для отображения положения сосуда, его скорости и значения защитной тахограммы.

14. Модуль формирования выходных аналоговых сигналов — управляет демультиплексором и двумя 12-ти разрядными цифроаналоговыми преобразователями DAC1 и DAC2. ЦАП DAC1 формирует выходное напряжение $\Delta U_{зд}$, пропорциональное разности между защитной тахограммой и действительной скоростью движения подъёмных сосудов. ЦАП DAC2 формирует значение действительной скорости подъёмного сосуда для передачи в систему регистрации параметров подъёмной машины и на пульт оператора ШПМ.

Пример реализация модулей СТАЗ с применением автоматного подхода

Аппаратное описание выполнено на языке Verilog HDL. При разработке прошивки ПЛИС применён автоматный подход, хорошо зарекомендовавший себя в разработке устройств, в том числе и на основе ПЛИС [18, 19]. Рассмотрим реализацию автоматного подхода на примере работы модуля ввода аналоговых

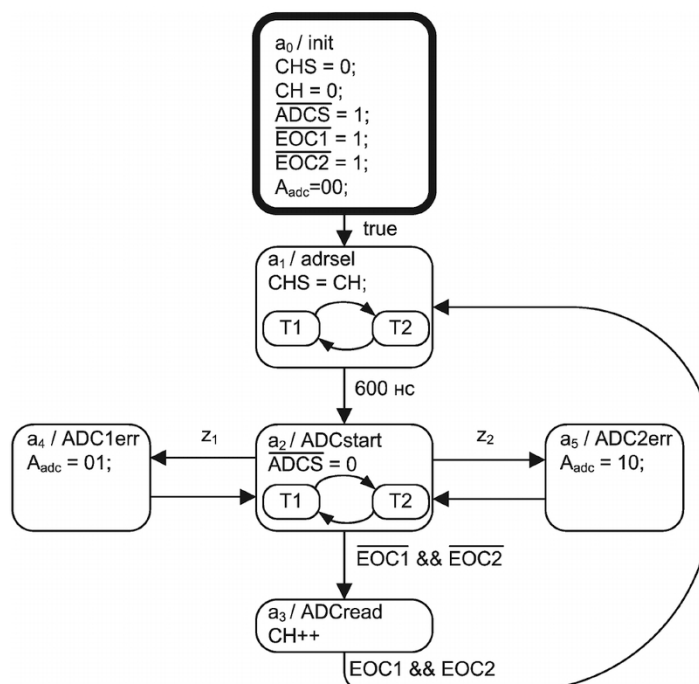


Рис. 4 Диаграмма состояний автомата модуля ввода аналоговых сигналов
Fig. 4. Statechart of the analog input module

Для правильного опроса АЦП необходимо строго выдерживать временные интервалы и длительности управляющих сигналов. Для управления каналами аналогового ввода разработан автомат, содержащий шесть состояний:

1. Инициализация (a_0) — начальное состояние после инициализации ПЛИС.
 2. Выбор канала (a_1) — на мультиплексор подается адрес канала CHS, запускается вложенный автомат отсчёта времени, формируется выдержка времени 200 нс, требуемая для срабатывания мультиплексора после выбора адреса и появления сигнала с выбранного канала на его выходе.
 3. Запуск АЦП (a_2) — подается сигнал начала преобразования АЦП $\overline{\text{ADCS}}$ и начинается отсчет времени контроля преобразования (2,5 мкс). Время 2,5 мкс выбрано на основании паспортных данных АЦП (сумма времени срабатывания устройства выборки и хранения — 0,4 мкс и времени преобразования АЦП — 1,68 мкс).
 4. Чтение АЦП (a_3) — после появления сигналов $\overline{\text{EOC1}}$ и $\overline{\text{EOC2}}$ значения с выходов АЦП (ADC1, ADC2) записываются во внутренние регистры соответственно назначению считанного сигнала.
 5. Авария ADC1 (a_4), авария ADC2 (a_5) — переход в данные состояния осуществляется, если прошло более 2,5 мкс, а сигналы окончания преобразования $\overline{\text{EOC1}}$ и $\overline{\text{EOC2}}$ не установлены. В состоянии устанавливается код аварии A_{adc} , соответствующий аварийному АЦП.
- Промежуточные переменные z_1 и z_2 , определяются выражениями:

$$z_1 = \begin{cases} 1, \text{ при } (t > 2,5 \text{ мкс}) \wedge \text{ЕОС1} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases};$$

$$z_2 = \begin{cases} 1, \text{ при } (t > 2,5\text{мкс}) \wedge \text{ЕОС2} \\ 0, \text{ иначе} \end{cases}$$

Диаграмма состояний автомата, соответствующая приведенному описанию, приведена на рис. 4.

Временные диаграммы модуля приведены на рис. 5. Параметр `state` — внутренний параметр, указывающий номер состояния в котором находится автомат.

Модуль защиты от несимметричной работы двигателя реализован на основе автомата с шестью состояниями:

1. Инициализация (a_0) — начальное состояние после инициализации ПЛИС.
2. Нормальный режим (a_1) — производится расчет отклонений токов двигателей. При превышении тока на одном из двигателей более чем на 10% тока на другом производится переход в предаварийное состояние a_2 или a_3 для первого или второго двигателя соответственно.
3. Предаварийное состояние двигателя первого (a_2) и второго (a_3) — в данном состоянии запускается автомат таймера, и начинается отсчет времени контроля перегрузки (8 сек). Если несимметрия тока не исчезла, то соответственно происходит переход в аварийные состояния a_3 или a_4 .
4. Перегруз двигателя первого (a_4) и второго (a_5) — устанавливается значение аварий соответствующее перегрузу первого или второго двигателя, выход из состояния возможен только при появлении сигнала сброса защит RESET.

Промежуточные переменны $Z_1 \dots Z_4$ определяются выражениями:

$$z_1 = \begin{cases} 1, & \text{при } dI_1 > 10\% \\ 0, & \text{иначе} \end{cases};$$

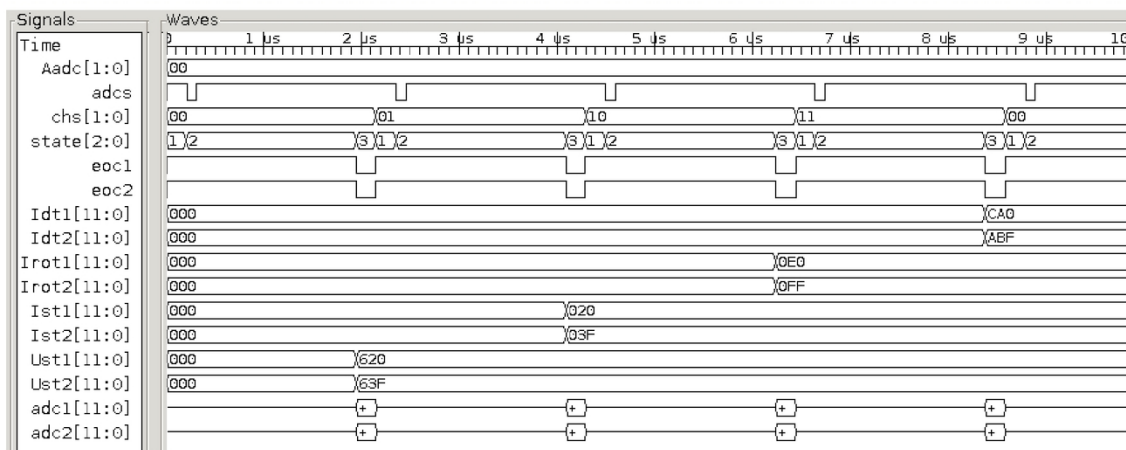


Рис. 5. Временные диаграммы модуля ввода аналоговых сигналов
Fig. 5. Analog input module timing diagram

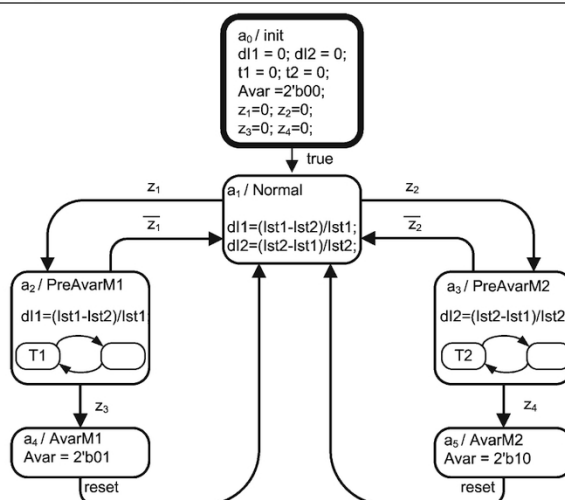


Рис. 6. Диаграмма состояний модуля защиты от несимметричной работы двигателей
Fig. 6. Statechart of the asymmetric protection module

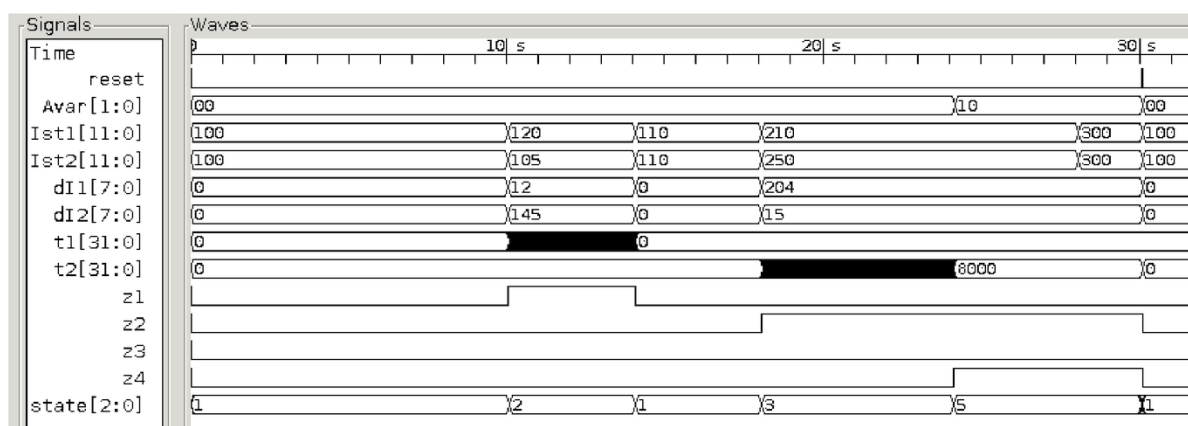


Рис. 7. Временные диаграммы модуля защиты от несимметричной работы двигателей
Fig. 7. Asymmetric protection module timing diagram

$$z_2 = \begin{cases} 1, & \text{при } dI_2 > 10\% \\ 0, & \text{иначе} \end{cases};$$

$$z_3 = \begin{cases} 1, & \text{при } t_1 > 8 \text{ с} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}; \quad z_4 = \begin{cases} 1, & \text{при } t_2 > 8 \text{ с} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Диаграмма состояний автомата модуля защиты от несимметричной работы двигателей приведена на рис. 6.

Временные диаграммы работы модуля защиты от несимметричной работы двигателей приведены на рис. 7.

Заключение

В статье предложена реализация системы технологической автоматики и защит подъемной машины на основе ПЛИС с применением при

разработке архитектуры принципа модульности и автоматного подхода. Это позволяет при необходимости добавлять или удалять модули, изменяя структуру и функциональность системы автоматики и защит. Важным моментом является то, что изменение конфигурации системы автоматики, то есть добавление или удаление какого-либо модуля, не повлияет на другие модули, так как каждый из них оперирует только своими входными и выходными переменными.

Предлагаемый подход к разработке аппаратного описания ПЛИС с использованием принципа модульности и парадигмы автоматного программирования позволяет с минимальными трудозатратами реализовать систему технологической автоматики и защит на основе программируемой логики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бежок В. Р. Руководство по ревизии наладке и испытанию шахтных подъемных установок / Бежок В. Р. и др. — 2-е издание, перераб. и доп. — М.: Недра, 1982. — 391 с.: ил.
2. Ерофеев Г. С., Завгородний В. И. Проблемы безопасности шахтных подъемов Кузбасса [Текст] // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-

топливной отраслях: Труды Третьей Всероссийской научно-практической конференции. — Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2006 г. — с. 7-11.

3. Клишин, В.И. Расширение минерально-сырьевой базы кузнецкого угольного бассейна [Электронный ресурс] / В.И. Клишин, С.В. Шаклеин, М.В. Писаренко // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России. Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция, 2014 г. — с. 37-42 — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22875161>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

4. Писаренко, М.В. Производство и потребление угля в мире [Электронный ресурс] // В сборнике: Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности. Сборник трудов XV международной научно-практической конференции, 2013 г. — с. 236-241. — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22640482>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

5. Писаренко М. В. Состояние и основные направления развития угольной отрасли Кузбасса [Электронный ресурс] // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: Изд-во МГТУ. — №1, 2010 г. с. 374 -378. — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15567636>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

6. Система управления и комплексной защиты шахтной подъемной установки [Электронный ресурс] / А. Кашич [и др.] // Современные технологии автоматизации. Рубрика «Добывающая промышленность», 2005 г., №2. — Режим доступа: <http://www.cta.ru/cms/f/342652.pdf>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

7. Программируемый аппарат задания, контроля движения и технологических защит подъемной установки (ПАЗК) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://niiaem.ru/index.php/serijnoe-pr-vo/pazk>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

8. Микропроцессорная система контроля, защиты и управления шахтной подъемной машины [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://hez.com.ua/production/asu_shpm. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

9. Аппарат защиты и контроля движения шахтной подъемной установки (АЗКД) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ooo-yuer.com/azkd>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

10. G. H. Lou, C. Chen, «Design of the Intelligent Control System for Mine Hoist», Applied Mechanics and Materials, Vols. 427-429, pp. 957-960, 2013. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.427-429.957

11. Надеждин Ю. Безопасность АСУ ТП критически важных объектов [Электронный ресурс] / Ю. Надеждин // Системы безопасности, 2014 г. №2. — Режим доступа: <http://www.secuteck.ru/articles2/security-director/bezopasnost-asu-tp-kriticheski-vazhnyh-obektov>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

12. Safety of mine hoists controlled by programmable systems (RF-421) [Электронный ресурс] / Joseph-Jean Paques, Louis Germain. — Режим доступа: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/RF-421.pdf>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

13. A Single Chip FPGA-Based Solution for Controlling of Multi-Unit PMSM Motor with Time-Division Multiplexing Scheme [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/282970580>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.08.011>

14. FPGA Based Monitoring and Protection System for Industrial drive Application [Электронный ресурс] / Shekhar Bhawal и [д. р.]. — Режим доступа: https://www.ee.iitb.ac.in/npec/Papers/Program/NPEC_2015_paper_90.pdf. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

15. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 ноября 2013 г. N 550. Зарегистрирован Минюстом России 31 декабря 2013 г., рег. № 30961) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499060050>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 10.04.2017 г.

16. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 декабря 2013 г. N 599) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://base.garant.ru/70691622/>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 10.04.2017 г.

17. AD7892 LC²MOS Single Supply 12-Bit 600 kSPS ADC. Datasheet. — Analog Devices Inc., 2000. — Режим доступа: <http://catalog.gaw.ru/index.php?page=document&id=20374>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

18. Автоматное программирование ПЛИС в задачах управления электроприводом [Электронный ресурс] / Ю. Ю. Янкин, А. А. Шалыто // Информационно-управляющие системы. — №1, 2011 г. — с. 50-56. — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15647299>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

19. Разработка резервированного блока управления электроприводом на основе автоматного подхода [Электронный ресурс] / Ю. Ю. Янкин, А. А. Шалыто // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — №6(94), 2014 г. — Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22626044>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.05.2017 г.

REFERENCES

1. Bezhok V. R. Rukovodstvo po revizii naladke i ispytaniyu shakhtnykh podemnykh ustanovok [Manual on audit of commissioning and testing of mine hoisting installations]. 2-e izdanie, pererab. i dop. M.: Nedra, 1982. 391 p.
2. Erofeev G. S., Zavgorodniy V. I. Problemy bezopasnosti shakhtnykh podemov Kuzbassa [The Problems of Mine Safety in The Kuzbass]. Avtomatizirovanny elektropriwod i promyshlennaya elektronika v metallurgicheskoy i gorno-toplivnoy otraslyakh: Trudy Tretey Vserossiyskoy nauchno prakticheskoy konferentsii [In the collection: Automated Electric Drive and Industrial Electronics in Metallurgy and Mining: Proceedings of the Third All-Russian Scientific and Practical Conference]. Novokuznetsk: SibSIU, 2006. pp. 7-11.
3. Klishin, V.I. Rasshirenie mineralno-syrevoy bazy kuznetskogo ugolnogo basseyna [Expansion of the mineral resources base of the Kuznetsk coal basin]. V sbornike: Perspektivy innovatsionnogo razvitiya ugolnykh regionov Rossii. Sbornik trudov IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya [In the collection: Perspectives of innovative development of the coal regions of Russia. Proceedings IV International Scientific and Practical Conference]. 2014 pp. 37-42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22875161> (accessed: 30.05.2017).
4. Pisarenko, M.V. Proizvodstvo i potreblenie uglya v mire [Production and consumption of coal in the world]. V sbornike: Energeticheskaya bezopasnost Rossii. Novye podkhody k razvitiyu ugolnoy promyshlennosti. Cbornik trudov XV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [In the collection: Energy security of Russia. New approaches to the development of the coal industry. Collection of Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference]. 2013. pp. 236-241. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22640482> (accessed: 30.05.2017).
5. Pisarenko M. V. Sostoyanie i osnovnye napravleniya razvitiya ugolnoy otrasli Kuzbassa [State and main directions of development of the coal industry of the Kuzbass]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. Moscow: MGGU. 2010, No 1. pp. 374-378. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15567636> (accessed: 30.05.2017).
6. Kashchich A. Sistema upravleniya i kompleksnoy zashchity shakhtnoy podemnoy ustanovki [Control and complex protection system of the mine hoist]. Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii [Contemporary Technologies in Automation]. 2005, No 2. pp. 26-34. URL: <http://www.cta.ru/cms/f/342652.pdf> (accessed: 30.05.2017).
7. Programmiruemyy apparat zadaniya, kontrolya dvizheniya i tekhnologicheskikh zashchit podemnoy ustanovki (PAZK) [Programmable device for speed reference, monitoring and technological protection of the mine hoist (PAZK)]. URL: <http://niiaem.ru/index.php/serijnoe-pr-vo/pazk> (accessed: 30.05.2017).
8. Mikroprotessornaya sistema kontrolya, zashchity i upravleniya shakhtnoy podemnoy mashiny [Microprocessor control system for protection and management of mine hoist]. URL: http://hez.com.ua/production/asu_shpm (accessed: 30.05.2017).
9. Apparat zashchity i kontrolya dvizheniya shakhtnoy podemnoy ustanovki (AZKD) [Device for the protection and control of the mine hoist (AZKD)]. URL: <http://ooo-yuep.com/azkd> (accessed: 30.05.2017).
10. G. H. Lou, C. Chen. Design of the Intelligent Control System for Mine Hoist. Applied Mechanics and Materials, Vols. 427-429, pp. 957-960, 2013. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.427-429.957 (accessed: 30.05.2017).
11. Nadezhdin Yu. Bezopasnost ASU TP kriticheski vazhnykh obektov [Safety of Automated Process Control Systems for Critical Facilities]. Sistemy bezopasnosti [Security and Safety]. 2014, No 2. URL: <http://www.secuteck.ru/articles2/security-director/bezopasnost-asu-tp-kriticheski-vazhnykh-obektov> (accessed: 30.05.2017).
12. Joseph-Jean Paques, Louis Germain. Safety of mine hoists controlled by programmable systems (RF-421). URL: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/RF-421.pdf> (accessed: 30.05.2017).
13. A Single Chip FPGA-Based Solution for Controlling of Multi-Unit PMSM Motor with Time-Division Multiplexing Scheme. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.08.011> (accessed: 30.05.2017).
14. Shekhar Bhawal. FPGA Based Monitoring and Protection System for Industrial drive Application. URL: https://www.ee.iitb.ac.in/npec/Papers/Program/NPEC_2015_paper_90.pdf (accessed: 30.05.2017).
15. Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugolnykh

shakhtakh» [Federal rules and regulations in the field of industrial safety "Safety Rules in Coal Mines"] (utv. prikazom Federalnoy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru ot 19 noyabrya 2013 g. N 550. Zaregistririvan Minyustom Rossii 31 dekabrya 2013 g., reg. № 30961) URL: <http://docs.cntd.ru/document/499060050> (accessed: 30.05.2017).

16. Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gornykh rabot i pererabotke tverdykh poleznykh iskopaemykh» [Federal rules and regulations in the field of industrial safety "Safety rules for mining and processing of solid minerals"] (utv. prikazom Federalnoy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru ot 11 dekabrya 2013 g. N 599) URL: <http://base.garant.ru/70691622/> (accessed: 30.05.2017).

17. AD7892 LC²MOS Single Supply 12-Bit 600 kSPS ADC. Datasheet. — Analog Devices Inc., 2000. URL: <http://catalog.gaw.ru/index.php?page=document&id=20374> (accessed: 30.05.2017).

18. Yankin Yu. Yu., Shalyto A. A. Avtomatnoe programmirovaniye PLIS v zadachakh upravleniya elektroprivodom [A Method of Finite-State Machine Realization in Electric Motor Drives Control]. Informatsionno-upravlyaiushchie sistemy [Information and Control Systems]. 2011, No1. pp. 50-56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15647299> (accessed: 30.05.2017).

19. Yankin Yu. Yu., Shalyto A. A. Razrabotka rezervirovannogo bloka upravleniya elektroprivodom na osnove avtomatnogo podkhoda [Redundant Electric Motor Drive Control Unit Design Using Automata-Based Approach]. Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2014, No 6(94). pp. 146-152. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22626044> (accessed: 30.05.2017).

Поступило в редакцию 28.07.2017

Received 28.07.2017