

УДК 621.314.57

Островляничик Виктор Юрьевич^{1,2}, д.т.н., профессор, **Кубарев Василий Анатольевич**^{1,2}, к.т.н., доцент, **Богдановская Татьяна Вениаминовна**¹, старший преподаватель, **Игнатенко Оксана Александровна**¹, старший преподаватель, **Чудинов Дмитрий Геннадьевич**^{1,3}, главный специалист отдела управляющих контроллеров, **Галлямова Ольга Радиковна**¹, соискатель, **Толстых Алексей Владимирович**^{1,2}, магистрант.

¹Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

²ООО «НИИ АЭМ СибГИУ», 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

³ООО «ЕвразТехника», 654010, Россия, г. Новокузнецк, пл. Побед, 3

E-mail: kubarev.sibsiu@list.ru

СИСТЕМА ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ПЛИС

Аннотация: В данной работе представлена реализация системы прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе ПЛИС.

Актуальность работы. В настоящее время на различных предприятиях сохранилось и находится в эксплуатации большое количество электроприводов постоянного тока, оснащенных различными типами тиристорных преобразователей, требуют модернизации. Кроме того, имеется значительное количество систем, в которых необходимо использование постоянного тока. Современные тиристорные электроприводы выполняются с использованием программируемых контроллеров.

Цель работы: разработка технической структуры, аппаратной части и архитектуры программного обеспечения системы прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе ПЛИС.

Методы исследования: теория электропривода, теория автоматического управления, теория алгоритмов.

Результаты. Предложена функциональная схема и структура системы прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе ПЛИС. Предложена модульная структура системы, показана реализация отдельных модулей. Разработаны алгоритмы функционирования системы прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе ПЛИС..

Ключевые слова: тиристорный преобразователь, система управления, ПЛИС, электропривод.

Информация о статье: принята 01 февраля 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-33-39

Введение

Несмотря на тенденцию замены электропривода постоянного тока на электроприводы переменного тока, в настоящее время на различных предприятиях находится в эксплуатации достаточно большое количество электроприводов постоянного тока, оснащенных различными типами тиристорных преобразователей. Кроме того, имеется значительное количество систем (выпрямители, возбудители), в которых необходимо использование постоянного тока.

Системы управления преобразователями выполняются на микроконтроллерной или микропроцессорной базе различных производителей. Однако несмотря на неоспоримые достоинства программируемых устройств имеются и известные недостатки при реализации зависимых от жесткого реального времени систем управления [1]: в частности необходимость расчёта и отслеживания соблюдения времени цикла программы микроконтроллера или же

применение нескольких микроконтроллеров, отвечающих отдельно за систему импульсно фазового управления, систему регулирования и систему защит преобразователя. Таким образом, одним из преимуществ применения ПЛИС при реализации систем управления преобразователями является параллельность выполнения и жесткая привязка по времени выполнения.

В последнее время большое развитие получили различные виды программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), в частности, программируемые пользователем вентильные матрицы (ППВМ) или Field Programmable Gate Array (FPGA). Если ранние серии доступных по стоимости ПЛИС относились к типу CPLD и использовались для расширения функций устройств или реализации отдельных время зависимых функций в

Таблица 1. Характеристики ПЛИС EP4CE6E22C8

Тип	Напряжение питания ядра	Логических элементов	Пользовательских выводов	Выводов общего назначения	Бит памяти	9-ти битных умножителей	Блоков ФАПЧ (PLL)	Глобальных тактовых линий
EP4CE6E22C8	1,2V	6272	92	92	276480	30	2	10

преобразователях [2], то современные ПЛИС даже младших серий, содержат до десятков тысяч логических элементов, что позволяет реализовать очень сложные системы при необходимости даже с микропроцессором.

Необходимо отметить, что ведутся активные разработки на базе ПЛИС систем мониторинга и защит [3], управления двигателями [4, 5], систем управления электроприводом [6, 7, 8, 9].

Авторами была разработана система прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе программируемой логической интегральной схемы. В качестве основы для выполнения проекта была выбрана ПЛИС типа Cyclone IV E EP4CE6E22C8. Разработка проводилась в среде, расширяемой фирмой Intel Quartus Lite 17.0. Основные характеристики, используемой в проекте ПЛИС приведены в таблице [10].

Аппаратная реализация

На основе требований, предъявляемых к системе управления, разработан состав аппаратной части системы. В состав аппаратной системы прямого цифрового управления тиристорным преобразователем, построенной на основе ПЛИС Intel Cyclone IV E, входят следующие основные элементы:

- ПЛИС Intel Cyclone IV E, на которой реализована логика работы системы;

- восемь модулей гальванической развязки и нормализации аналоговых сигналов;
- восемь 12-битных АЦП MCP3201 с последовательным интерфейсом SPI [11];
- гальваническая развязка дискретных сигналов на основе диодных оптопар на 16 каналов (8 каналов дискретного ввода с внешних устройств, 4 канала для ввода импульсов с инкрементного шифратора, 4 канала для подключения клавиатуры);
- ЖК-дисплей 2 строки по 16 символов со встроенным преобразователем интерфейса SPI Digole Serial [12];
- модули гальванической развязки выходных дискретных сигналов и импульсных сигналов на тиристоры;
- память для хранения конфигурации ПЛИС;
- источники питания. Источник питания логических элементов схемы и «сухих контактов» входных и выходных дискретных сигналов.

Блок-схема системы прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе ПЛИС приведена на рис. 1.

С учётом аппаратной части разработана модульная структура системы управления, в составе системы были выделены следующие блоки (модули):

1. Модуль вычисления скорости (МВС) преобразовывает входные значения с инкрементного шифратора в цифровую нормализованную величину скорости.
2. Модуль работы с АЦП и ввода аналоговых сигналов формирует необходимые сигналы для работы с АЦП по интерфейсу SPI, производит фильтрацию и расчет значений токов и напряжений.
3. Модуль ввода дискретных сигналов (Модуль DI) производит цифровую фильтрацию считываемых дискретных сигналов, устраняя дрейбзг и ложные срабатывания из-за помех.
4. Модуль опроса клавиатуры формирует последовательность сканирующих импульсов для опроса клавиатуры.
5. Система автоматического регулирования скорости (САРС). САРС реализована в виде двухконтурной системы с обратными связями по току и скорости (по току и напряжению двигателя) [13].
6. Датчик запирания вентилей (ДЗВ), используя значения напряжений с тиристоров формирует сигнал о состоянии тиристоров, разрешая переключения мостов.
7. Логическое переключающее устройство (ЛПУ), выполненное по сканирующему типу, управляет переключением мостов в зависимости от задания и состояния тиристоров моста.

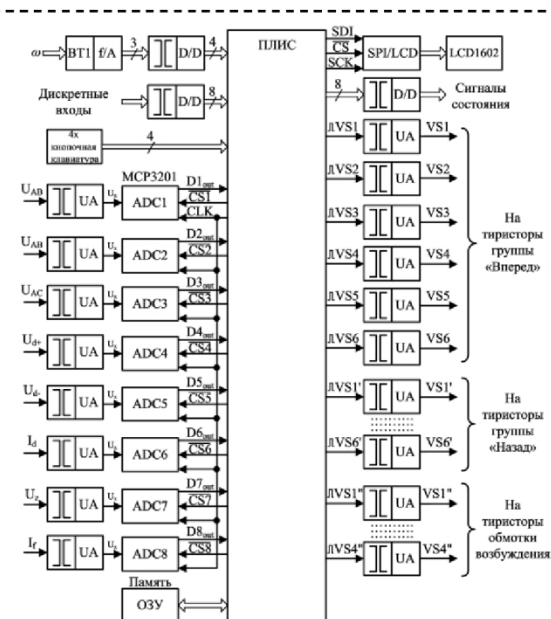
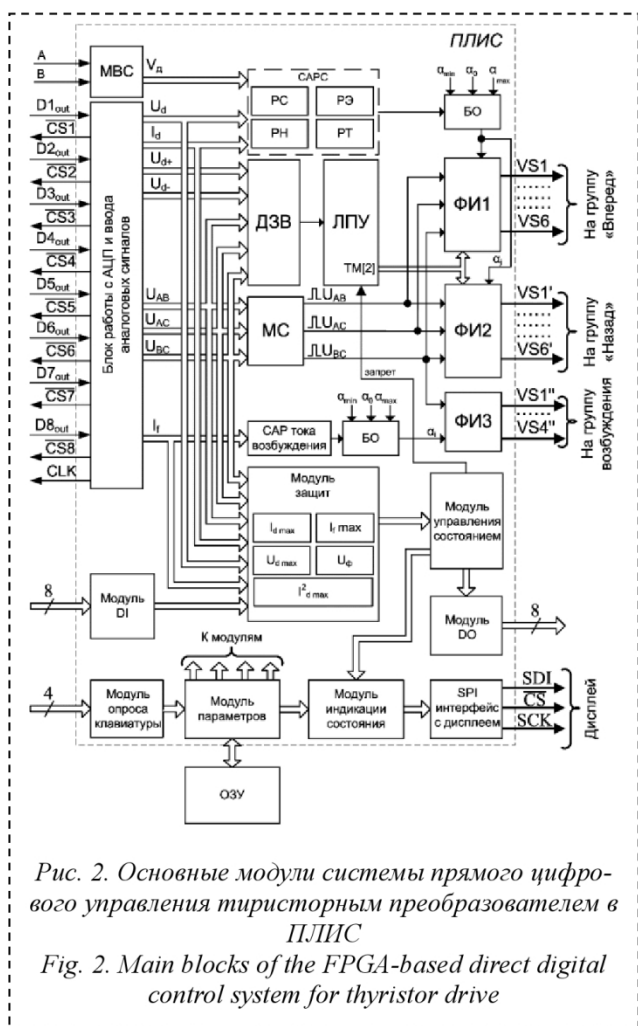


Рис. 1. Блок-схема системы прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе ПЛИС

Fig. 1. Block diagram of the FPGA-based direct digital control system for thyristor drive



8. Модуль синхронизации (МС) формирует запускаящие импульсы для сброса счетчиков формирователей импульсов в момент естественной коммутации;

9. Модуль защит реализует основные защиты тиристорного преобразователя: нулевую защиту (НЗ), максимальную токовую защиту ($I_{d \max}$), защиту от перегрузки по току ($I_{d^2 \max}$).

10. Одноконтурная САР тока возбуждения регулирует ток возбуждения двигателя, выдает задание на угол отпирания тириستоров.

11. Блоки ограничения БО1, БО2 ограничивают максимальные и минимальные углы управления тиристорами.

12. Формирователи импульсов ФИ1, ФИ2, ФИ3 формируют импульсы на группы вперед, назад тиристорного преобразователя и группу возбуждения двигателя.

13. Модуль управления состоянием — на основе данных с других модулей формирует и управляет режимами работы преобразователя.

14. Модуль параметров осуществляет работу по считыванию, изменению и записи параметров в память.

15. Модуль вывода дискретных сигналов (Модуль DO) на основе сигналов состояния внутренних модулей формирует слово управления дискретными выводами с учетом ограничений, наложенных режимами работы и аварийными состояниями.

16. Модуль формирования индикации состояния формирует экраны, выводимые на дисплей, в зависимости от выбранного режима отображения и выводимых параметров.

17. Модуль SPI интерфейса с дисплеем формирует интерфейс по протоколу SPI для управления ЖК-дисплеем.

Модульная структура разрабатывалась таким образом, чтобы каждый модуль являлся отдельным ИР-блоком, применимым для многократного использования и в других проектах. Основные модули системы прямого цифрового управления тиристорным преобразователем и их связи между ними показаны на рис. 2.

Реализация системы на Verilog HDL

Рассмотрим реализацию системы импульсно-фазового управления. Для реализации в системе прямого цифрового управления была выбрана система импульсно-фазового управления (СИФУ), построенная по многоканальной синхронной схеме. В зависимости от выбранного режима работы, система может формировать импульсы на тиристоры следующего вида: импульсы большой длительности (рис. 3 а), импульсы малой длительности с подтверждающим импульсом (рис. 3 б) или заполнение высокочастотными импульсами — пакет импульсов (рис. 3 в).

Импульсы большой длительности (рис. 3 а) применяются при модернизации тиристорных преобразователей типа АТР, АТРВ с установленными мощными импульсными трансформаторами и имеют время импульса $t_{\text{и}}$ равное 120 эл. град.

При модернизации преобразователей электроприводов типа КТЭ, КТЭУР применяются импульсы малой длительности (рис. 3 б), ширина которых принимается равной составляет 15 — 20 эл. град.

При установке системы в новый преобразователь для устранения недостатков, представленных выше способов управления, применяется высокочастотное заполнение (рис. 3 в), при котором в течение требуемого интервала времени на управляющий электрод тиристора подается пакет импульсов. Пакет представляет собой серию высокочастотных импульсов длительностью $t_{\text{и}}$, выбираемой исходя из динамических характеристик тиристора. Длительность импульса $t_{\text{и}}$ выбирается из условия $t_{\text{и}} \approx (3 \dots 5) \cdot t_d$, где t_d — время задержки включения тиристора при максимальном анодном токе. При «пакетном» управлении пауза $t_{\text{п}}$ между импульсами должна быть не более $0,5 \cdot t_q$, где t_q — время выключения тиристора при максимальном анодном токе. Как правило, $t_q \approx 10 \cdot t_{\text{вкл}}$, поэтому считается, что можно принять $t_{\text{и}} = t_{\text{п}} \approx (3 \dots 5) \cdot t_d$ [14]. Для наиболее распространенных типов низкочастотных силовых тириستоров время задержки включения $t_d = 10 \dots 15$ мкс, время выключения $t_q = 100 \dots 400$ мкс (T160, T273, T353) [15], поэтому в системе управления принято $t_{\text{и}} = t_{\text{п}} = 55,6$ мкс.

В состав формирователя импульсов входят счетчики (СТ), компараторы (СМР), распределитель импульсов (ИР) формирующий импульсы и буфер

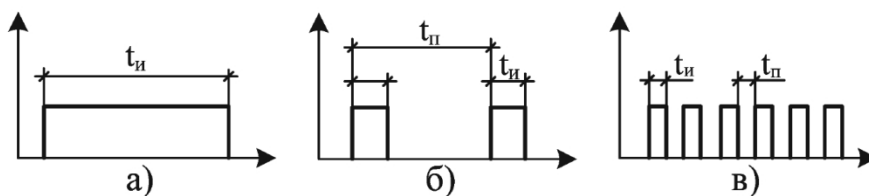


Рис. 3. Формы импульсов управления тиристорами
Fig. 3. Thyristor firing pulses forms

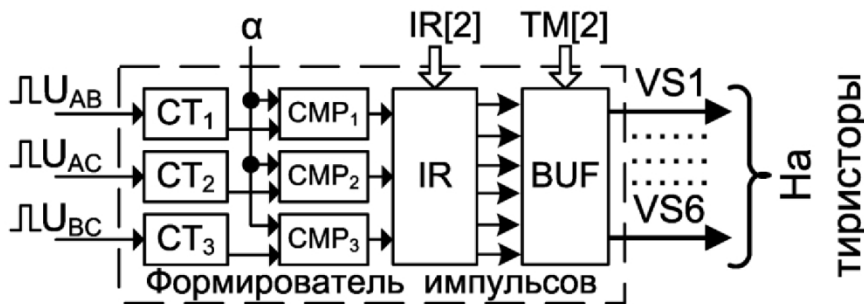


Рис. 4. Схема формирователя импульсов
Fig. 4. Pulse driver circuit

(BUF), управляемый с логического переключающего устройства.

Ниже приведён фрагмент описания генератора опорного напряжения с компаратором на языке Verilog, а его реализация в системе Quartus 17.0 на уровне регистровых передач (register transfer logic - RTL) показана на рис. 5.

```

module GON(clk_in, rise_st, fall_st, Uz, pr_imp,
inv_imp);
  input clk_in; // Вход тактовой частоты
  input rise_st; // Переход синусоиды «-» → 0 →
«+» в положительную полуволну
  input fall_st; // Переход синусоиды «+» → 0 → «-»
в отрицательную полуволну
  input [15:0] Uz; // Задание
  output reg pr_imp; // Выход прямого импульса (в
положительной полуволне)
  output reg inv_imp; // Выход инверсного им-
пульса (в отрицательной полуволне)

```

```

always @(posedge clk_in) //
Запуск генератора опорного
напряжения
begin
  if (rise_st) begin fi_cnt <= 0;
pr_imp_gen <= 1'b1;
inv_imp_gen <= 1'b0; end
  else if (fall_st)
begin fi_cnt <= 0; pr_imp_gen
<= 1'b0; inv_imp_gen <= 1'b1;
end
  else fi_cnt
<= fi_cnt + 1'b1;
end
  // Сработал генератор по
прямому импульсу
  wire pr_imp_pred;
  assign pr_imp_pred =
((fi_cnt >= Uz) &&
(pr_imp_gen)) ? 1'b1:1'b0;
  // Сработал генератор по
инверсному импульсу
  wire inv_imp_pred;
  assign inv_imp_pred =
((fi_cnt >= Uz) && (inv_imp_gen)) ? 1'b1:1'b0;

```

```

reg pr_imp_pred_prev;
reg inv_imp_pred_prev;
always @(posedge clk_in) begin
pr_imp_pred_prev <= pr_imp_pred;
inv_imp_pred_prev <= inv_imp_pred;
end
  // Формирование выходного импульса
  wire pr_imp1;
  assign pr_imp1 = ~pr_imp_pred_prev &
pr_imp_pred;
  wire inv_imp1;
  assign inv_imp1 = ~inv_imp_pred_prev &
inv_imp_pred;

  always @(negedge clk_in) begin // Синхрониза-
ция выхода
pr_imp <= pr_imp1;
inv_imp <= inv_imp1;

```

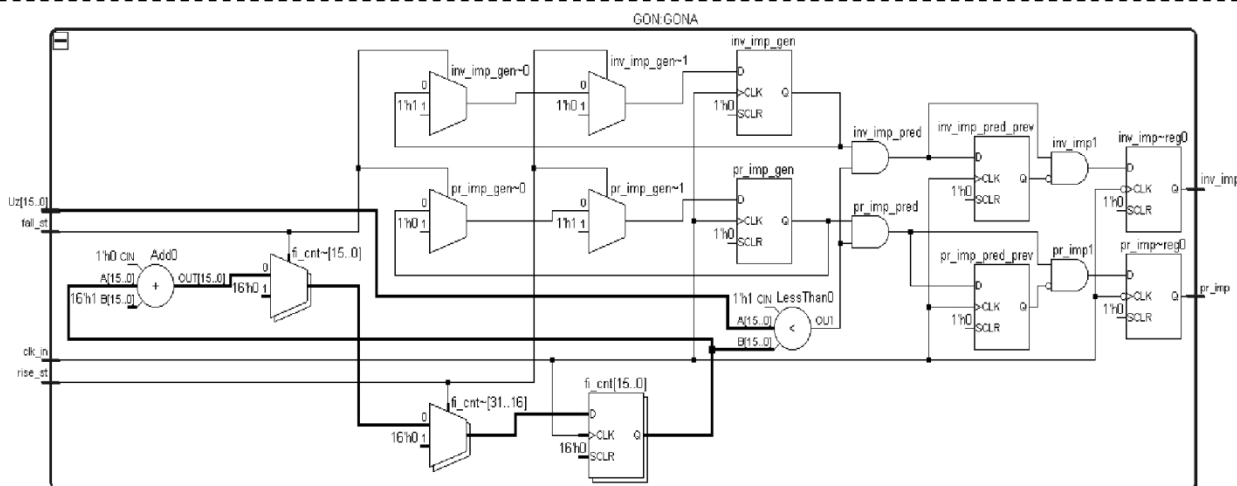


Рис. 5. RTL-реализация модуля ГОН
Fig. 5. RTL realization of GON module

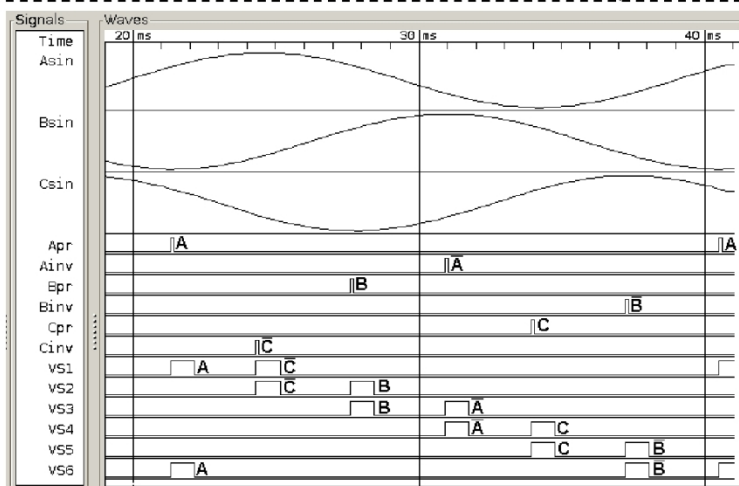


Рис. 6. Результаты моделирования в режиме сдвоенных импульсов при $\alpha = 0$

Fig. 6. Simulation results in dual pulse mode ($\alpha = 0$)

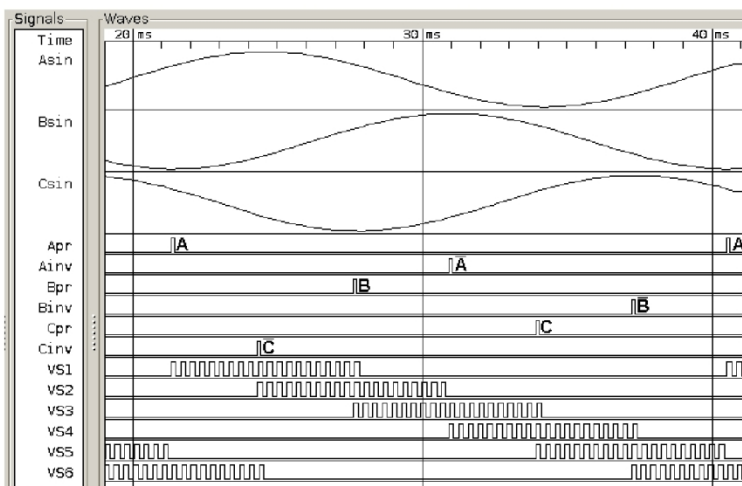


Рис. 7. Результаты моделирования в режиме заполнения импульсами при $\alpha = 0$

Fig. 7. Simulation results in pulse filling mode ($\alpha = 0$)

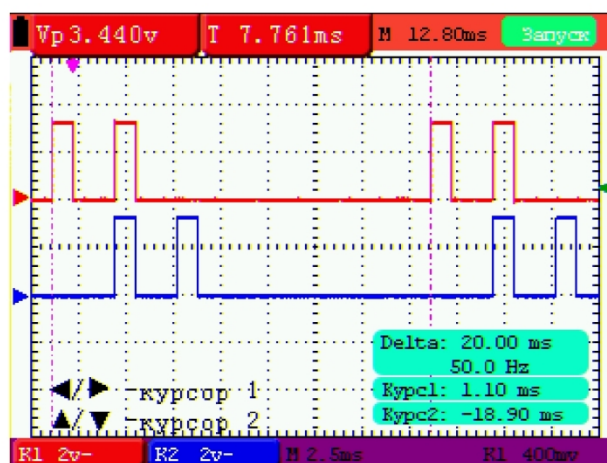


Рис. 8. Характеристики импульсов в режиме сдвоенных импульсов

Fig. 8. Pulse parameters in in dual pulse mode

end
endmodule // Конец модуля

После разработки всех модулей осуществлено моделирование работы устройства. Результаты моделирования для режима сдвоенных импульсов и режима заполнения импульсами представлены на рис. 6 и рис. 7, соответственно.

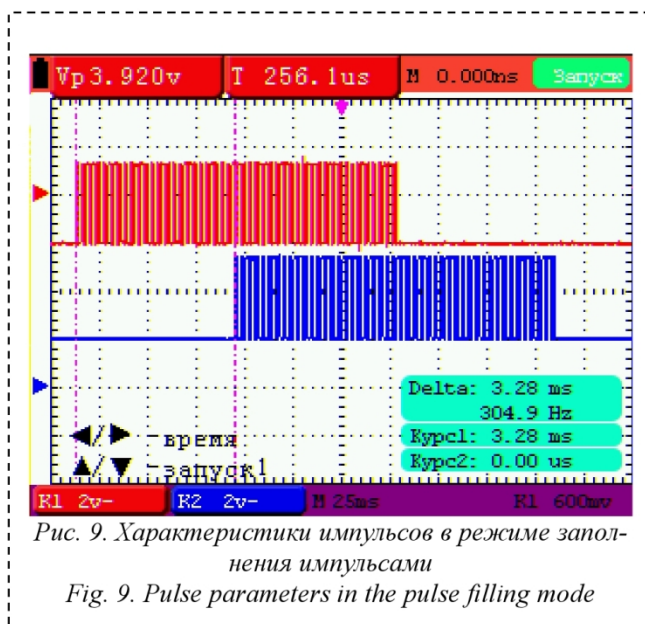
Также осциллографом АСК-2028 сняты реальные характеристики импульсов для тиристоров VS1 и VS2 в режиме сдвоенных импульсов (рис. 8) и в режиме заполнения импульсами (рис. 9) при частоте питающей сети $f_c = 50$ Гц.

Заключение

За последнее время номенклатура, емкость и возможности доступных по стоимости ПЛИС расширились до уровня позволяющего реализовать системы управления преобразователем на одном кристалле. Анализ осциллограмм разработанной системы показывает, что представленная система прямого цифрового управления тиристорным преобразователем, реализованная на ПЛИС, выполняет возложенные на неё функции и выдерживает требуемые временные характеристики импульсов управления в различных режимах формирования импульсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems / M.N. Cirstea, A. Dinu, J.G. Khor, M. McCormick. — Newnes, 2002. — 399 с. — ISBN 0-7506-5558-5
2. Вычужанин, В. Применение ПЛИС в регулируемом асинхронном электроприводе / В. Вычужанин // Современная электроника. — 2008, № 2. — с. 26-28.
3. 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: 30.07.2018 г.
4. 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: 30.07.2018 г. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.08.011>
5. Castro, Ricardo & Araújo, Rui & Freitas, Diamantino. (2011). FPGA Based Powertrain Control for Electric Vehicles. DOI: 10.5772/18491.



6. Tashakori Abkenar, Alireza & Hassanudeen, M & Ektesabi, Mehran. (2015). FPGA based controller drive of BLDC motor using digital PWM technique. DOI: 10.1109/PEDS.2015.7203584.

7. Industrial Motor Drive on a Single FPGA [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/po/ss-drives-soc-fpga.pdf>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.07.2018 г.

8. 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: 30.07.2018 г.

9. 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: 30.07.2018 г.

10. Cyclone IV Device Handbook Volume 1. Altera Corporation, 2016 — Режим доступа: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyclone4-handbook.pdf>

11. MCP3201, 2.7V 12-Bit A/D Converter with SPI Serial Interface. Datasheet [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.farnell.com/datasheets/1669366.pdf>. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.07.2018 г.

12. Digole Serial: UART/I2C/SPI Character/Graphic LCD/OLED Display Module: Programmer Manual [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.digole.com/images/file/Tech_Data/Digole_Serial_Display_Adapter-Manual.pdf. — Загл. с экрана. Дата обращения: 30.07.2018 г.

13. Островляничик, В. Ю. Автоматический электропривод постоянного тока горно-металлургического производства: Учебное пособие [Текст] / В. Ю. Островляничик. — Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2004. — 383 с.

14. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. — 425 с.

15. Воронин, П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П.А. Воронин. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 382 с. — ISBN 978-5-97060-266-9.

Viktor Yu. Ostrovlyanchik^{1,2}, Dr. Sc., Professor, Vasily A. Kubarev^{1,2}, C. Sc., Associate Professor, Tatiana V. Bogdanovskaya¹, Senior Lecturer, Oksana A. Ignatenko¹, Senior Lecturer, Dmitriy G. Chudinov^{1,3}, Chief specialist, Olga R. Gallyamova¹, Postgraduate, Aleksey V. Tolstykh^{1,2}

¹Siberian State Industrial University, 42 Kirova street, Novokuznetsk, 654007, Russia

²NII AEM SibGIU, LLC, 42 Kirova street, Novokuznetsk, 654007, Russia

³EvrzTechnica, LLC, 3 Pobed Sq., Novokuznetsk, 654010, Russia

FPGA-BASED DIRECT DIGITAL CONTROL SYSTEM FOR THYRISTOR DRIVE

Abstract: The paper is devoted to the implementation of the FPGA-based direct digital control system for thyristor drive.

The urgency of the discussed issue. Currently, various enterprises have in operation a sufficient number of DC drives equipped with various types of thyristor converters requiring modernization, in addition there are a significant number of systems (rectifiers) in which the use of direct current is necessary. Currently, thyristor drives are performed on programmable controllers.

The main aim of the study: the development of the technical structure of the hardware and software architecture of the FPGA-based direct digital control system for thyristor drive.

The methods used in the study: electric drive theory, algorithm theory, automatic control theory.

The results. A functional diagram and structure of a direct digital control system for a FPGA-based thyristor converter is proposed. A modular structure of the system is proposed, the implementation of individual modules is shown. Algorithms for the operation of a direct digital control system thyristor converter based on FPGA are developed.

Keywords: thyristor converter, control system, FPGA, electric drive.

Article info: received February 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-33-39

REFERENCES

1. M.N. Cirstea, A. Dinu, J.G. Khor, M. McCormick "Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems". Newnes, 2002. 399 p. ISBN 0-7506-5558-5

2. Vychuzhanin V. "Primenenie PLIS v reguliruemom asinkhronnom elektroprivode" [Application of FPGA in adjustable asynchronous electric drive]. Sovremennaya elektronika [Modern Electronics]. 2008, N2. p. 26-28.

3. Shekhar Bhawal et al. "FPGA Based Monitoring and Protection System for Industrial drive Application". Conference: National Power Electronics Conference (NPEC) (2015). At IIT Bombay. URL: https://www.ee.iitb.ac.in/npec/Papers/Program/NPEC_2015_paper_90.pdf

4. A Single Chip FPGA-Based Solution for Controlling of Multi-Unit PMSM Motor with Time-Division Multiplexing Scheme. URL: <https://www.researchgate.net/publication/282970580>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2015.08.011>

5. Castro, Ricardo & Araújo, Rui & Freitas, Diamantino. (2011). FPGA Based Powertrain Control for Electric Vehicles. DOI: 10.5772/18491.

6. Tashakori Abkenar, Alireza & Hassanudeen, M & Ektesabi, Mehran. (2015). FPGA based controller drive of BLDC motor using digital PWM technique. DOI: 10.1109/PEDS.2015.7203584.

7. Industrial Motor Drive on a Single FPGA. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/po/ss-drives-soc-fpga.pdf>

8. 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-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]. 2011, No1. pp. 50-56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15647299>.

9. 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-tekhnicheskii 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>

10. Cyclone IV Device Handbook Volume 1. Altera Corporation, 2016. URL: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyclone4-handbook.pdf>

11. MCP3201. 2.7V 12-Bit A/D Converter with SPI Serial Interface. Datasheet. URL: <http://www.farnell.com/datasheets/1669366.pdf>

12. Digole Serial: UART/I2C/SPI Character/Graphic LCD/OLED Display Module: Programmer Manual. URL: http://www.digole.com/images/file/Tech_Data/Digole_Serial_Display_Adapter-Manual.pdf

13. Ostrovlyanchik V. Yu. Avtomaticheskii elektroprivod postoyannogo toka gorno-metallurgicheskogo proizvodstva: Uchebnoe posobie [DC-powered Automatic Electric Drive of Mining and Metallurgical Production: Textbook]. Novokuznetsk: SibSIU, 2004. 383 p.

14. Gel'man M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskiy K.A., Preobrazovatel'naya tekhnika: uchebnoe posobie [Electric power conversion]. Chelyabinsk, 2009. 425 p.

15. Voronin P.A. Silovye poluprovodnikovye klyuchi: semeystva, kharakteristiki, primenenie [Power semiconductor switches: families, characteristics, application]. Moscow DMC Press, 2015. 382 p. ISBN 978-5-97060-266-9.

Библиографическое описание статьи

Островляничик В.Ю., Кубарев В.А., Богдановская Т.В., Игнатенко О.А., Чудинов Д.Г., Галлямова О.Р., Толстых А.В. Система прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе ПЛИС // Горное оборудование и электромеханика — 2019. — № 1 (141). — С. 33-39.

Reference to article

Ostrovlyanchik V.Yu., Kubarev V.A., Bogdanovskaya T.V., Ignatenko O.A., Chudinov D.G., Gallyamova O.R., Tolstyh A.V. FPGA-based direct digital control system for thyristor drive. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 1 (141), pp. 33-39.