

Кубарев Василий Анатольевич*, к.т.н., доцент, **Богдановская Татьяна Вениаминовна**, старший преподаватель, **Игнатенко Оксана Александровна**, старший преподаватель, **Галлямова Ольга Радиковна**, соискатель, **Кучик Марина Михайловна**, ведущий инженер, **Гуров Александр Михайлович**, обучающийся

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

*E-mail: kubarev.sibsiu@list.ru

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛИС

***Аннотация:** В статье представлена реализация системы управления автономным инвертором напряжения на основе ПЛИС.*

***Актуальность работы.** В последние годы в общепромышленных механизмах произошел переход от двигателей постоянного тока к различным видам асинхронных в применениях, требующих надежного поддержания момента или скорости рабочего органа, что обосновано надежностью машин подобных типов и отсутствием у них коллекторного аппарата. При этом расширяется номенклатура различных преобразователей частоты и устройств плавного пуска. Имеются попытки перенести часть функций, ответственных за генерацию импульсов управления инвертором, на CPLD ПЛИС, однако большинство подобных устройств выполняются на основе микроконтроллеров со встроенными широтно-импульсными выходами.*

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

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

***Результаты.** Предложена функциональная схема и структура системы прямого цифрового управления автономным инвертором напряжения на основе ПЛИС. Предложена модульная структура системы, показана реализация отдельных модулей. Разработан алгоритм функционирования цифровой системы управления автономным инвертором напряжения на основе ПЛИС.*

***Ключевые слова:** автономный инвертор напряжения, система управления, ПЛИС, электропривод, частотное управление.*

***Информация о статье:** принята 20 ноября 2020 г.*

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-52-58

Введение

В настоящее время системы на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) различных изготовителей все шире применяются в реализации различных систем управления и сбора данных. Если раньше на ПЛИС перекладывались только отдельные функции, требующие аппаратной реализации: жесткой привязки ко времени, параллельных расчетов однотипных функций, высокоскоростных фильтров для систем управления электроприводом [1, 2], систем сбора данных и систем защит электропривода [3, 4, 5, 6], то современные ПЛИС позволяют не только реализовать отдельные элементы схем управления, но и реализовать систему на кристалле в целом, поэтому устройства на базе интегральных схем специального назначения, так называемые ASIC-схемы на основе ПЛИС, получают все большее распространение [7, 8], также вызывают интерес работы, посвященные переносу части функций, ответственных за

генерацию импульсов управления инвертором на ПЛИС [9, 10].

Емкость и вычислительная мощность современных ПЛИС, а также возможность применять для решения отдельных задач soft-процессоры, собираемые на кристалле ПЛИС, которые, несмотря на то, что занимают часть ресурсов ПЛИС и работают медленнее, чем отдельно выполненные процессоры, но позволяют использовать их программируемые функции, необходимые в отдельных случаях, позволяет реализовать полноценную систему на кристалле (SOC — System-on-chip).

Аппаратная реализация АИН

Функциональная схема автономного инвертора напряжения на базе ПЛИС с основными входными и выходными сигналами системы управления преобразователем приведена на рис. 1.

Входными сигналами для системы управления являются сигналы с датчиков тока (i_d) и

напряжения (u_d) выпрямителя, используемые для реализации защит выпрямительного звена по току и напряжению, сигнал задания u_z , сигнал с

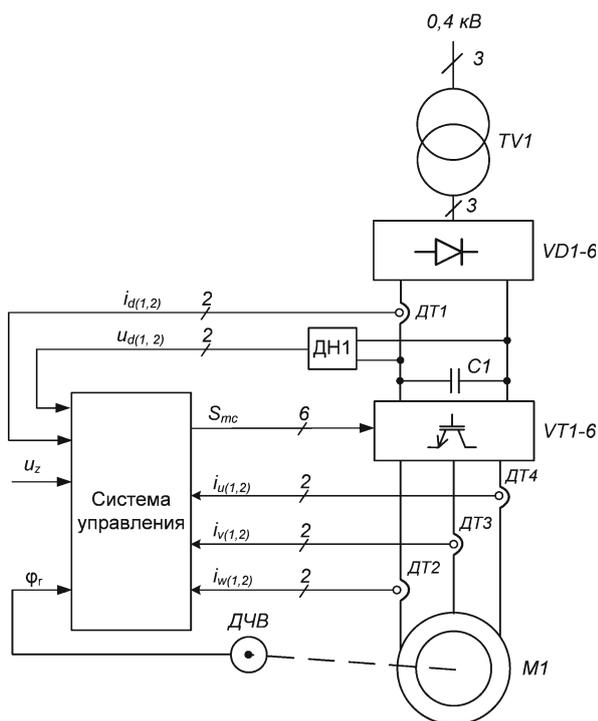


Рис. 1. Функциональная схема автономного инвертора напряжения на базе ПЛИС
Fig. 1. Functional diagram of the FPGA-based autonomous voltage inverter

датчика частоты вращения (инкрементного шифратора) ϕ_r , сигналы с датчиков тока в фазах инвертора i_u , i_v , i_w .

Выходными являются сигналы на управление транзисторами моста S_{mc} .

Таблица 1. Характеристики ПЛИС EP4CE15F17C8.
Table 1. Characteristics of EP4CE15F17C8 FPGA.

Тип	Напряжение питания ядра	Логических элементов	Пользовательских выводов	Выводов обшего назначения	Бит памяти	9-ти битных умножителей	Блоков ФАПЧ (PLL)	Глобальных тактовых линий
EP4CE15F17C8	1,2V	15408	166	166	516096	112	4	20

На основе требований к автономному инвертору выбран состав аппаратной части устройства, представленный на рис. 2.

В аппаратную часть автономного инвертора напряжения на основе ПЛИС Intel Cyclone IV E, входят следующие компоненты:

- ПЛИС Intel Cyclone IV E, на которой реализована логика работы системы;
- два модуля гальванической развязки и нормализации аналоговых сигналов для канала напряжения звена постоянного тока и канала задания;
- четыре датчика тока ACS770LCB-050B-PFFT на эффекте Холла;

- шесть 12-битных АЦП MCP3201 с последовательным интерфейсом SPI;

- гальваническая развязка дискретных сигналов на основе диодных оптопар на 24 канала (8 каналов дискретного ввода с внешних устройств, 4 канала для ввода импульсов с инкрементного шифратора, 4 канала для подключения клавиатуры);

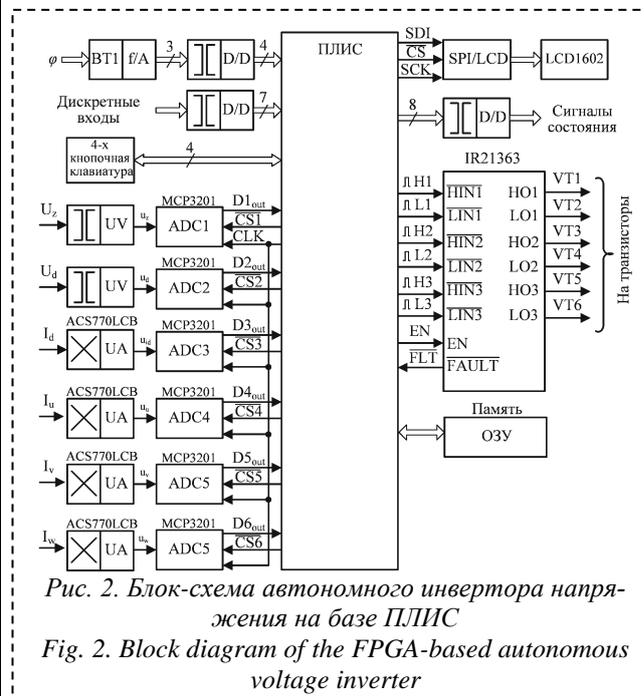


Рис. 2. Блок-схема автономного инвертора напряжения на базе ПЛИС
Fig. 2. Block diagram of the FPGA-based autonomous voltage inverter

- драйвер управления транзисторами IR21363;
- память для хранения конфигурации ПЛИС;
- источники питания.

В качестве ядра системы выбрана ПЛИС EP4CE15F17C8 серии Intel Cyclone IV E, основные параметры которой приведены в таблице 1.

Приемы выбора драйверов для управления силовыми IGBT-транзисторами и их характеристики подробно описаны в работах [11, 12, 13, 14]. На основании проведенного анализа, в качестве драйвера системы была выбрана ИМС IR21363, представляющая собой высоковольтный высокоскоростной драйвер IGBT-транзисторов с тремя независимыми каналами для

применения в 3-х фазных источниках, обеспечивающий защиту от помех по входам и позволяющий согласовать силовую часть с ПЛИС EP4CE15F17C8. Наличие у драйвера входа ENABLE позволяет в случае необходимости од-

зайствованы с незначительными изменениями с системы управления, описанной авторами ранее в работе [15].

В составе системы можно выделить следующие (модули):

Таблица 2. Характеристики драйвера IR21363.

Table 2. Characteristics of IR21363.

Тип	Входная логика	T_{on}	T_{off}	V_{IH}	V_{IL}	V_{itrip+}	UVCC+	UVCC-
IR21363	$\overline{HIN}, \overline{LIN}$	400 нс	380 нс	2,7 В	1,7 В	0,46 В	11,2 В	11,0 В

новременно блокировать сигналы по всем выходам. Наличие выхода FAULT сигнализирует о срабатывании внутренней защиты драйвера по превышению тока или падению напряжения, и позволяет остановить генерацию импульсов.

Основные характеристики драйвера IR21363 приведены в таблице 2.

Структура программного обеспечения АИН

На основании анализа требований к системе была разработана структура программного обес-

1. Модуль работы с АЦП и ввода аналоговых сигналов формирует необходимые сигналы для работы с АЦП по интерфейсу SPI.

2. Модуль вычисления скорости по инкрементному шифратору преобразовывает входные значения с инкрементного шифратора в цифровую нормализованную величину скорости.

3. Модуль ввода дискретных сигналов (Модуль DI) производит цифровую фильтрацию считываемых дискретных сигналов, устраняя дребезг и ложные срабатывания из-за помех.

4. Модуль опроса клавиатуры формирует последовательность сканирующих импульсов для опроса клавиатуры.

5. Модуль цифровой фильтрации аналоговых сигналов производит фильтрацию и расчет действующих значений токов и напряжений.

6. Модуль защит реализует основные защиты преобразователя: нулевую защиту, максимальную токовую защиту, защиту от перегрузки.

7. Модуль системы автоматического регулирования скорости (САРС).

8. Модуль формирования импульсов управления транзисторами.

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

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

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

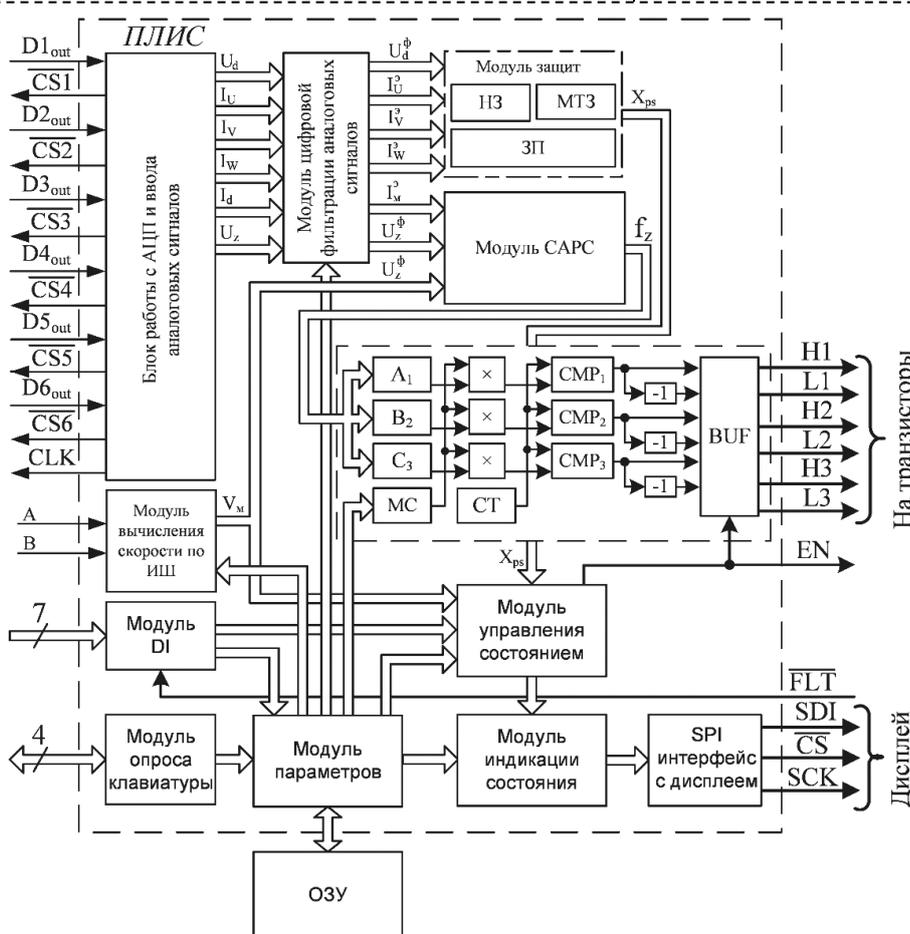


Рис. 4. Основные модули АИН

Fig. 4. Main modules of autonomous voltage inverter

печения для системы прямого цифрового управления инвертором.

Основные модули АИН и связи между ними показаны на рис. 4. Часть IP-модулей прошивки ПЛИС реализованы универсальными и

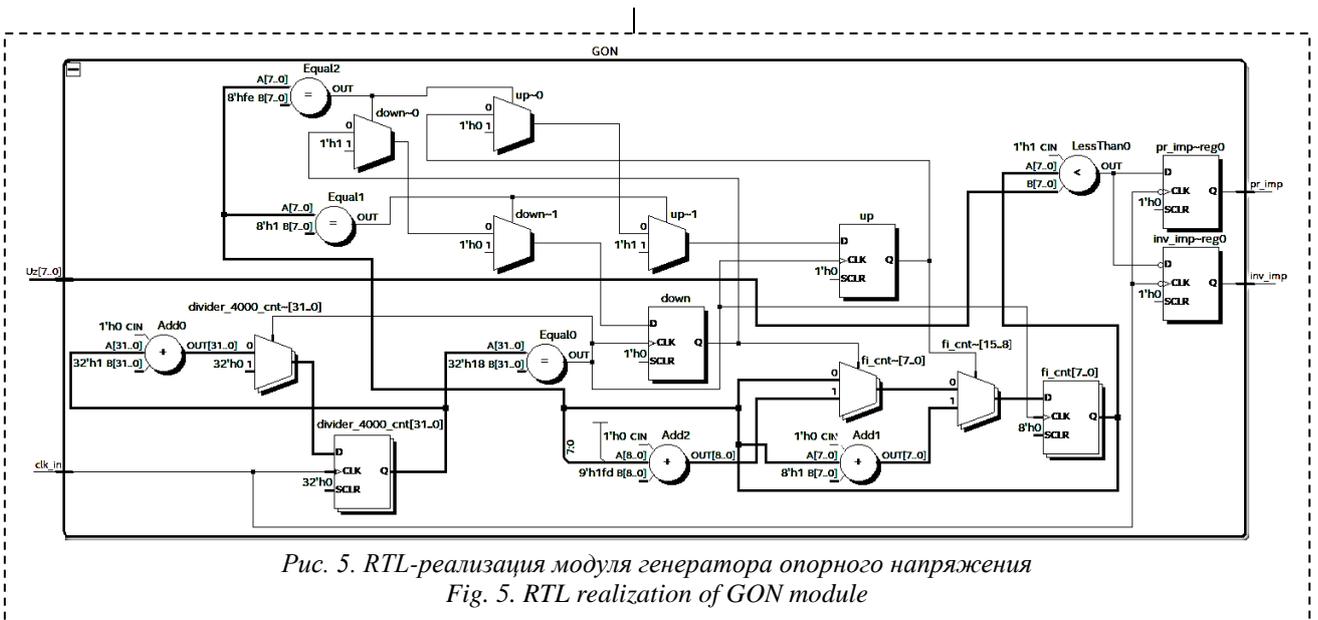


Рис. 5. RTL-реализация модуля генератора опорного напряжения
Fig. 5. RTL realization of GON module

12. Модуль SPI интерфейса с дисплеем, который формирует интерфейс по протоколу SPI для управления ЖК-дисплеем.

Описание модулей на Verilog HDL

Ниже приведен фрагмент описания генератора опорного модулирующего напряжения с компаратором на языке Verilog, а его реализация в системе Quartus Prime 18.1 на уровне регистровых передач (register transfer logic – RTL) показана на рис. 5.

В качестве опорного модулирующего напряжения разработанного трехфазного АИН для исключения одновременного переключения тран-

```
input [7:0] Uz;
output reg pr_imp;
output reg inv_imp;
```

```
reg pr_imp_gen = 1'b0;
reg inv_imp_gen = 1'b0;
reg [7:0] fi_cnt = 8'd0;
```

```
reg up = 1'b1;
reg down = 1'b0;
```

```
wire clk_freq;
reg [31:0] divider_4000_cnt = 0;
```

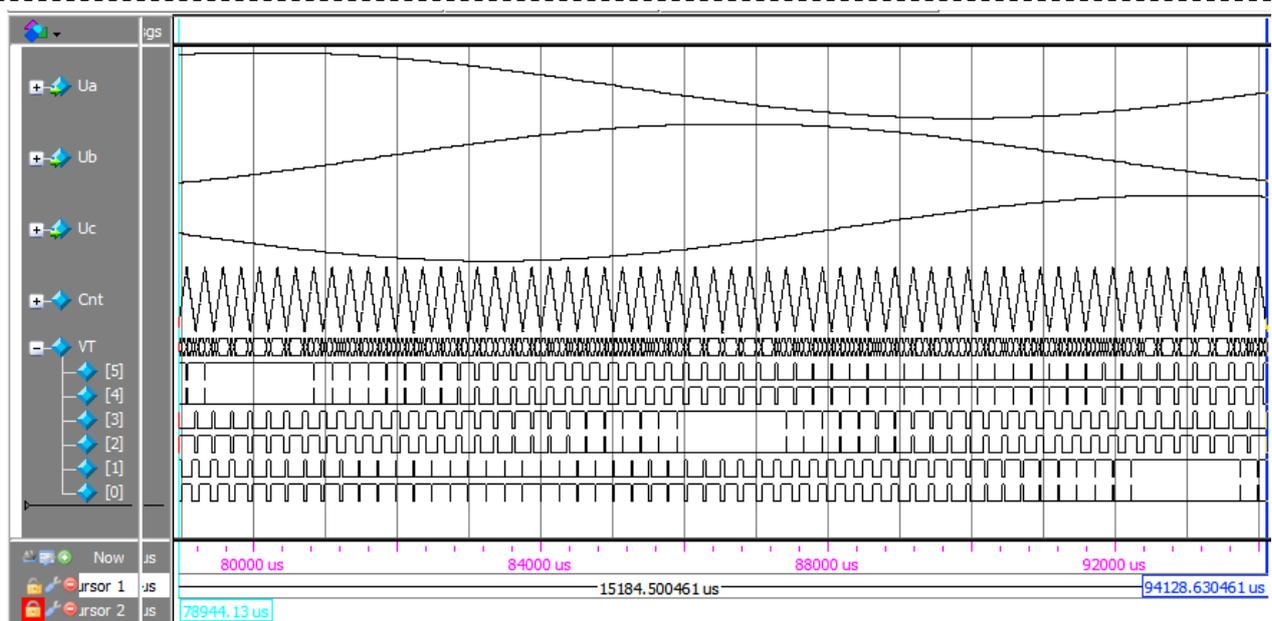


Рис. 6. Моделирование работы АИН в среде ModelSim
Fig. 6. RTL realization of GON module

зисторов в разных фазах применена центрированная ШИМ.

```
module GON(clk_in, Uz, pr_imp, inv_imp);
//Генератор пилы с компаратором
input clk_in;
```

```
assign clk_freq = (divider_4000_cnt==32'd24)?
1.0;
```

```
always @(posedge clk_in)
begin
```

```

if(clk_freq) divider_4000_cnt <= 0;
else divider_4000_cnt <= divider_4000_cnt +
1'b1;
end

```

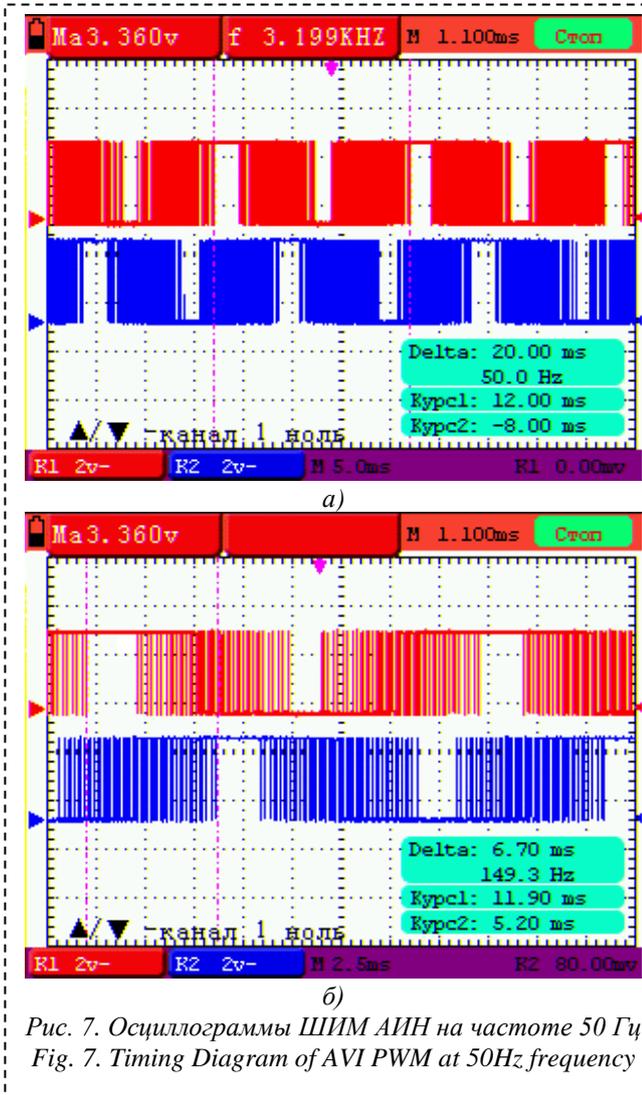


Рис. 7. Осциллограммы ШИМ АИН на частоте 50 Гц
 Fig. 7. Timing Diagram of AVI PWM at 50Hz frequency

```

always @(posedge clk_freq)
begin
if (up) fi_cnt <= fi_cnt + 1'b1;
else if (down) fi_cnt <= fi_cnt - 1'b1;
else fi_cnt <= fi_cnt;
if (fi_cnt == 8'd1) begin up <= 1'b1; down <=
1'b0; end
else if (fi_cnt == 8'd254) begin up <= 1'b0;
down <= 1'b1; end
else begin up <= up; down <= down; end
end

wire pr_imp_pred;
assign pr_imp_pred = (fi_cnt <= Uz); // Срабо-
тал компаратор по счетчику фазы

wire inv_imp_pred;
assign inv_imp_pred = ~pr_imp_pred;

always @(negedge clk_in) // Синхронизация
выхода модуля

```

```

begin
pr_imp <= pr_imp_pred;
inv_imp <= inv_imp_pred;
end
endmodule // Конец модуля

```

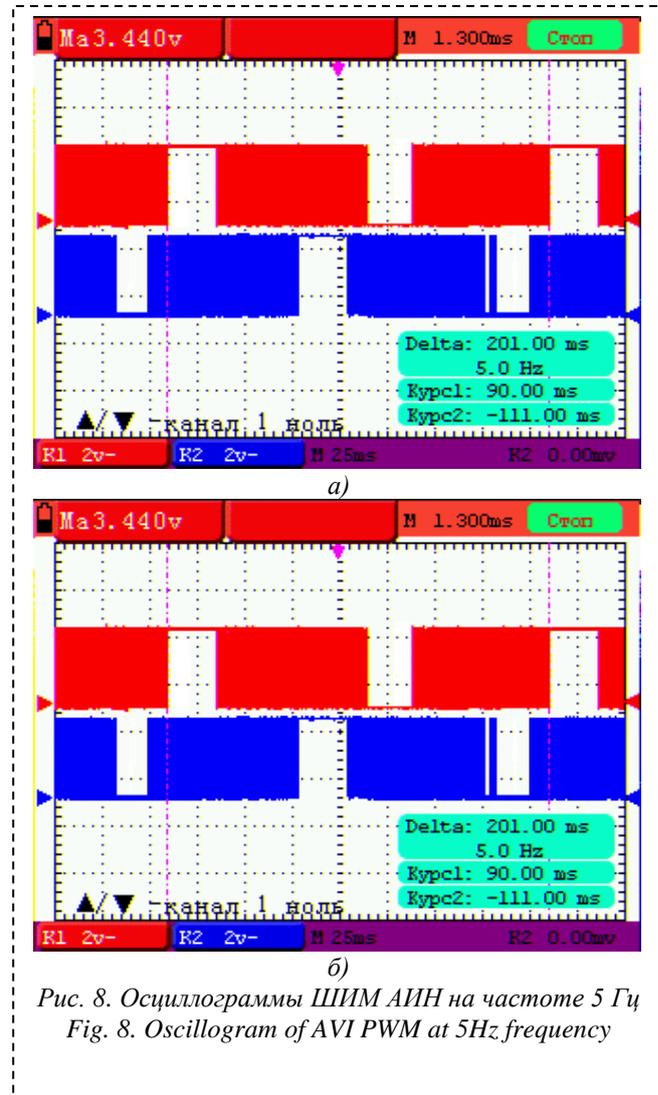


Рис. 8. Осциллограммы ШИМ АИН на частоте 5 Гц
 Fig. 8. Oscillogram of AVI PWM at 5Hz frequency

На рис. 6 показан результат моделирования работы АИН в среде ModelSim, а на рис. 7 и 8 осциллограммы работы ШИМ АИН на частотах 50 и 5 Гц.

Заключение

Анализ снятых осциллограмм ШИМ АИН на частотах 5 и 50 Гц разработанной системы указывает на то, что они соответствуют осциллограммам, полученным при моделировании системы в ModelSim, а также показывает, что представленная система прямого цифрового управления автономным инвертором напряжения на основе ПЛИС выполняет возложенные на нее функции и выдерживает требуемые временные характеристики при формировании импульсов управления силовыми транзисторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jens Sorensen, Shane O'Meara and Dara O'Sullivan (2019) Part 1: Optimized Sigma-Delta Modulated Current Measurement for Motor Control. Analog Dialogue. Vol 53 No 4, October 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-53/number-4/optimized-sigma-delta-modulated-current-measurement-for-motor-control.pdf>
2. Jens Sorensen, Shane O'Meara and Dara O'Sullivan (2019) Part 2: Optimized Sigma-Delta Modulated Current Measurement for Motor Control. Jens Sorensen, Shane O'Meara, and Dara O'Sullivan. Analog Dialogue Vol. 53 No 4, November 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-53/number-4/optimized-sigma-delta-modulated-current-measurement-for-motor-control-part-2.pdf>
3. FPGA Based Monitoring and Protection System for Industrial Drive Application / Shekhar Bhawal и [д. п.]. — URL: https://www.ee.iitb.ac.in/npec/Papers/Program/NPEC_2015_paper_90.pdf.
4. Либерман Я. Л. Автоматическая система управления конвейерными приводами / Я. Л. Либерман, К. Ю. Летнев, Л.Н. Горбунова // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №2. – С. 3-9.
5. FPGA-Based Systems Increase Motor-Control Performance/ By Andrei Cozma and Eric Cigan Analog Dialogue 49-03, March 2015 URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-49/number-1/articles/fpga-based-systems-increase-mc-performance.pdf>
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. FPGA-Based Control for Electric Vehicle and Hybrid Electric Vehicle Power Electronics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.intel.ru/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/wp/wp-01210-electric-vehicles.pdf>
9. Вычужанин, В. Применение ПЛИС в регулируемом асинхронном электроприводе / В. Вычужанин // Современная электроника. – 2008, №2. – с. 26-28.
10. Puyal D., Barragan L. A., Acero Jesus, Burdío José and Millan, Ignacio. (2006). An FPGA-Based Digital Modulator for Full- or Half-Bridge Inverter Control. Power Electronics, IEEE Transactions on. 21. 1479 - 1483. DOI:10.1109/TPEL.2006.880234.
11. Никитин, А. Современные высоковольтные драйверы MOSFET- и IGBT-транзисторов / А. Никитин // Новости электроники, 2010. – №6. – с. 32-36.
12. Козенков, Д. Драйверы MOSFET и IGBT / Д. Козенков // Современная электроника, 2005. – №6. – с. 10-15.
13. Колпаков, А. Особенности применения драйверов MOSFET и IGBT / А. Колпаков // Компоненты и технологии, 2000.– №6. – с. 34-38.
14. Драйверы MOSFET/IGBT технологии SOI с усовершенствованными каскадами сдвига уровня Компоненты и технологии №12, 2007 / М. Россберг, Б. Воглер, Р. Херцер Перевод: А. Колпаков.
15. Система прямого цифрового управления тиристорным преобразователем на основе ПЛИС / В. Ю. Островляничик, В. А. Кубарев, Т. В. Богдановская, О. А. Игнатенко, Д. Г. Чудинов, О. Р. Галлямова, А. В. Толстых // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №1. – С. 33-39.

Vasiliy A. Kubarev, C. Sc. (Engineering), Associate Professor, **Tatyana V. Bogdanovskaya**, Senior Lecturer, **Oksana A. Ignatenko**, Senior Lecturer, **Olga R. Gallyamova**, Postgraduate, **Marina M. Kuchik**, Lead Engineer, **Alexander M. Gurov**, student

Siberian State Industrial University, 654007, Russia, Novokuznetsk, 42 Kirova Street

FPGA-BASED CONTROL SYSTEM OF THE AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER

Abstract: The article is devoted to the implementation of a FPGA-based control system for an autonomous voltage inverter.

The urgency of the discussed issue. In recent years, in industrial mechanisms, there has been a transition from direct current motors to various types of asynchronous ones in applications requiring reliable maintenance of the torque or speed of the working body, which is justified by the reliability of machines of this type, and the absence of a collector device in them. At the same time, the range of various frequency converters and soft starters is expanding. There are attempts to transfer some of the functions responsible for generating inverter control pulses to CPLD FPGAs, however, most of such devices are based on microcontrollers with built-in pulse-width outputs.

The main aim of the study. Development of a technical structure, hardware and software architecture for a FPGA-based direct digital control system for an autonomous inverter.

The methods used in the study. Theory of electric drive, theory of automatic control, theory of automata, theory of algorithms.

The results. A functional diagram and structure of a FPGA-based direct digital control system of an autonomous voltage inverter are proposed. The modular structure of the system is proposed; the implementation of individual modules is shown. An algorithm for the functioning of a FPGA-based digital control system for an autonomous voltage inverter has been developed.

Keywords: autonomous voltage inverter, control system, FPGA, electric drive, frequency control.

Article info: received November 20, 2020

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-52-58

REFERENCES

1. Jens Sorensen, Shane O'Meara and Dara O'Sullivan (2019) Part 1: Optimized Sigma-Delta Modulated Current Measurement for Motor Control. Analog Dialogue. Vol 53 No 4, October 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-53/number-4/optimized-sigma-delta-modulated-current-measurement-for-motor-control.pdf>

2. Jens Sorensen, Shane O'Meara and Dara O'Sullivan (2019) Part 2: Optimized Sigma-Delta Modulated Current Measurement for Motor Control. Jens Sorensen, Shane O'Meara, and Dara O'Sullivan. Analog Dialogue Vol. 53 No 4, November 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-53/number-4/optimized-sigma-delta-modulated-current-measurement-for-motor-control-part-2.pdf>

3. FPGA Based Monitoring and Protection System for Industrial Drive Application / Shekhar Bhalwal и [д. п.]. — URL: https://www.ee.iitb.ac.in/npec/Papers/Program/NPEC_2015_paper_90.pdf.

4. Lieberman Ya. L., Letnev K. Yu., Gorbunova L.N. (2019) Automatic control system for conveyor drives. Mining Equipment and Electromechanics, 2 (142). pp. 3-9

5. Andrei Cozma, Eric Cigan (2015) FPGA-Based Systems Increase Motor-Control Performance. Analog Dialogue 49-03, March 2015 URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-49/number-1/articles/fpga-based-systems-increase-mc-performance.pdf>

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. FPGA-Based Control for Electric Vehicle and Hybrid Electric Vehicle Power Electronics [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.intel.ru/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/wp/wp-01210-electric-vehicles.pdf>

9. Vychuzhanin, V. (2008) Application of FPGA in a regulated asynchronous electric drive. Modern electronics, 2. – pp. 26-28.

10. Puyal D., Barragan L. A., Acero Jesus, Burdío José and Millan, Ignacio. (2006). An FPGA-Based Digital Modulator for Full- or Half-Bridge Inverter Control. Power Electronics, IEEE Transactions on. 21. 1479 - 1483. DOI:10.1109/TPEL.2006.880234.

11. Nikitin, A. (2010) Modern high-voltage drivers for MOSFET and IGBT transistors. News of electronics, 6. – pp. 32-36.

12. Kozenkov, D. (2005) MOSFET and IGBT drivers. Modern electronics, 6. – pp. 10-15.

13. Kolpakov, A. (2003) Features of the use of MOSFET and IGBT drivers. Components and technologies, 3. – pp. 34-38.

14. Rossberg M., Vogler B. and Herzer R. (2007) SOI Technology MOSFET / IGBT Drivers with Advanced Level Shifting Cascades. Components and Technologies, 12

15. Ostrovlyanchik V. Yu, Kubarev V. A., Bogdanovskaya T. V., Ignatenko O. A., Chudinov D. G., Gallyamova O. R., Tolstykh A. V. (2019) FPGA-based direct digital control system for thyristor drive. Mining Equipment and Electromechanics, 1 (141), pp. 33-39.

Библиографическое описание статьи

Кубарев В.А., Богдановская Т.В., Игнатенко О.А., Галлямова О.Р., Кучик М.М., Гуров А.М. Система управления автономным инвертором напряжения на основе ПЛИС // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 6 (152). – С. 52-58.

Reference to article

Kubarev V.A., Bogdanovskaya T.V., Ignatenko O.A., Gallyamova O.R., Kuchik M.M., Gurov A.M. FPGA-based control system of the autonomous voltage inverter. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.6 (152), pp. 52-58.