

USE OF SOFTWARE AND HARDWARE MODELING FOR DESIGNING THE SHIP'S REFRIGERATION CONTROL SYSTEM

A. V. Vyngra, B. A. Avdeyev

Kerch State Marine Technological University,
Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation

The paper considers the use of hardware-in-the-loop simulation to improve the design efficiency of control systems. Designing and adjustment of control systems are required experimental research, trial launches and other works, which are often difficult to implement, are costly and a large number of man-hours are spent on their implementation. Realization of work on real-time hardware and software complexes with partial use of control system equipment allows managing considerably less. Work can be carry out on software and hardware complexes of real time with partial use of control system equipment. The design of control systems based on the example of a ship's refrigerator control system. The design of the control system takes place using the working model of the refrigeration unit presented in the Matlab/Simulink mathematical modeling environment and consists of a refrigeration compartment, a mechanical subsystem and a control subsystem, which in turn includes a configuration setting block, a fluid property block and a coolant temperature setting block. Investigated control unit "Control" processes input signals that are the temperature mismatch value and temperature mismatch differential. The author proposed to replace the modeled control unit by the fpga-in-the-loop unit with the use of a field-programmable gate array developed by Xilinx. The technical characteristics of the proposed board are given. The results of modeling the operation of the automatic control system are present in the form of temperature of the refrigeration system versus time. The using of hardware-in-the-loop simulation increases the efficiency and accuracy of the process of creating control systems. It is determined that with the use of it is possible to calculate the time of the control signal transmission to the executive body, and envisage this factor in the designed system.

Keywords: hardware-in-the-loop simulation, design of control systems, ship refrigerator unit, field-programmable gate array (fpga).

For citation:

Vyngra, Alexei V., and Boris A. Avdeyev. "Use of software and hardware modeling for designing the ship's refrigeration control system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 806–813. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-806-813.

УДК 681.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

А. В. Вынгра, Б. А. Авдеев

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Республика Крым, Российская Федерация

Рассматривается возможность применения программно-аппаратного моделирования для улучшения качества проектирования системы управления судовой холодильной установкой. Проектирование и наладка систем управления требуют проведения экспериментальных исследований, пробных пусков и других работ, которые зачастую труднореализуемы, высокочематратны, и на их проведение затрачивается большое количество человеко-часов. Проведение работы на программно-аппаратных комплексах реального времени при частичном использовании оборудования системы управления позволяет обойтись значительно меньшими затратами. Целью исследования является улучшение эффективности проектирования путем определения действительных параметров холодильной установки. Объектом исследования является судовая холодильная установка. Выполнение работы происходит с использованием ра-

бочей модели холодильной установки, представленной в среде математического моделирования Matlab/Simulink, состоящей из охлаждаемого помещения, механической подсистемы и подсистемы управления, которая, в свою очередь, включает блок задания конфигурации, блок свойства жидкости и блок задания температуры охладителя. Исследуемый в модели блок управления «Control» обрабатывает входные сигналы, которыми являются рассогласование температур и дифференциал рассогласования температур, и на выход отправляет управляющий сигнал. Предложено заменить смоделированный блок управления программно-аппаратной частью с применением программируемой логической интегральной схемы фирмы Xilinx. В работе приведены технические характеристики предлагаемой к применению платы. Изучены принципы генерирования HDL-кода для программирования отладочной интегральной схемы. Произведено моделирование с применением программно-аппаратной части в модели и при наличии только смоделированного блока управления холодильной установкой, приведены сравнительные характеристики полученных результатов моделирования. Результаты моделирования работы системы автоматического управления представлены в виде графиков изменения температуры холодильной установки с течением времени. Определено, что с помощью программно-аппаратного моделирования можно рассчитать действительное время передачи управляющего сигнала на исполнительный орган и предусмотреть этот фактор при создании системы управления. Установлено, что в случае применения программно-аппаратного моделирования при проектировании сложных систем управления увеличиваются эффективность и точность процесса создания систем управления.

Ключевые слова: программно-аппаратное моделирование, судовая холодильная установка, проектирование систем управления, программируемая логическая интегральная схема.

Для цитирования:

Вынгра А. В. Использование программно-аппаратного моделирования при проектировании системы управления судовой холодильной установкой / А. В. Вынгра, Б. А. Авдеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 806–813. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-806-813.

Введение

Проблемы разработки современных систем управления для различных электронных электромеханических устройств непосредственно связаны с задачами моделирования реальных физических объектов, с проектированием систем управления, с тестированием и созданием рабочих прототипов. Для различного рода систем управления требуется персонал, обеспечивающий их обслуживание, а от самих систем, в свою очередь, требуется высокая точность и скорость работы. Следовательно, целесообразно задаться вопросами: каким образом можно уменьшить количество работающего персонала, сделав систему автоматического управления более автономной, и каким образом можно уменьшить затраты, связанные с неточностями работы систем автоматического управления.

В решении поставленной проблемы поможет использование программно-аппаратного моделирования (ПАМ), которое использует некоторые параметры работы реальной системы и позволяет изменять параметры проектируемой системы управления. ПАМ представляет собой метод, который используется в разработке и испытании сложных встроенных систем реального времени. ПАМ обеспечивает эффективную платформу моделирования при помощи добавления внешней системы управления для тестирования проектируемой системы. Это математическое представление называют *программным моделированием*.

В настоящее время большинство систем автоматического управления имеют возможность изменять параметры управления при работе непосредственно на установке. Исследование возможностей применения ПАМ при проектировании систем управления даст возможность предусмотреть некоторые параметры работы установки. Таким образом, не имея доступа к реальной проектируемой или модернизируемой установке, ПАМ позволит обеспечить моделирование работы некоторых подсистем установки в условиях, приближенных к реальным, что даст возможность эффективнее производить настройку параметров системы управления на этапе ее проектирования.

Методы и материалы

В научных публикациях отечественных и зарубежных авторов, посвященных вопросам моделирования систем управления, последние десять лет актуальной является тема исследования и совершенствования современных систем управления различными судовыми устройствами и установками. В статье [1] описываются принципы моделирования сетевых систем управления в среде моделирования Simulink. Автор статьи [2] рассматривает вопросы возможности проектирования сложных систем управления с использованием программируемых логических интегральных схем фирмы *Xilinx*. В статье [3] авторы рассматривают программно-аппаратный симулятор силовой части электропривода, реализованный на основе средств фирмы *National Instruments*, также проведен анализ точности расчета, выполняемого на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), на примере математического моделирования асинхронного электродвигателя. В статье [4] рассмотрены вопросы проектирования электронной аппаратуры с использованием микросхем фирмы *Xilinx* и предложены практические рекомендации по проектированию печатной платы, организации системы питания, программированию и сопряжению с периферийными устройствами.

ПАМ выполняется с помощью ПЛИС фирмы *Atlys* на базе микропроцессора *Xilinx Spartan-6*. Программирование платы производится в среде математического моделирования *Matlab/Simulink* с использованием подпрограммы *HDL-coder*. Язык написания программы — *Verilog*.

Особенности платы:

- микропроцессор — *Xilinx Spartan-6 LX45 FPGA*, пакет *BGA 324*-контактный;
- оперативная память — *128 MB DDR2* 16-битное хранение данных;
- четыре блока памяти по *16 MB* с встроенным *SPI* протоколом для конфигурации и хранения данных;
- *100 МГц* КМОП генератор частот;
- в режиме реального времени отслеживает мощность на всех шинах питания;
- интерфейсы программирования *JTAG*, совместимые с *Xilinx* в *Impact* и *Digilent Adept*;
- разъем *RJ-45* для подключения *10/100/100 Ethernet PHY* и *RS-232*;
- два входных порта видео *HDMI* и два выходных порта *HDMI*;
- *AC-97* кодек с линейным входом, линейным выходом, микрофоном;
- два *USB2*-порта для программирования и передачи данных;
- один *VMOD* (высокоскоростной *VHDC*) разъем;
- *USB-UART* и *USB-HID*-порт (для мыши / клавиатуры);
- *GPIO*, включающий в себя *8* светодиодов, *6* кнопок, *8* слайдов-переключателей;
- *48* свободных входов/выходов.

Обзор модели для тестирования

Для определения преимуществ использования ПАМ проанализируем его работу, используя модель холодильной установки. Модель представлена в среде математического моделирования *Matlab/Simulink*. (LicenseNo: 271282). Модель холодильной установки (рис. 1) состоит из следующих подсистем.

1. Охлаждаемое помещение (*Refrigeation Compartment*).
2. Механическая подсистема (через все компоненты данной подсистемы осуществляется поток хладагента) имеет четыре смоделированных блока для основных компонентов подсистемы:
 - компрессор (*Compressor*);
 - конденсатор (*Condenser*);
 - расширительный клапан (*Expansion valve*);
 - испаритель (*Evaporator*).
3. Подсистема управления — состоит из блока задания конфигурации (*Solver Configuration*), блока свойств жидкости (*Fluid Properties*) и блока задания температуры охладителя (*Target Refrigiration Temperature*) [3], [5] – [7].

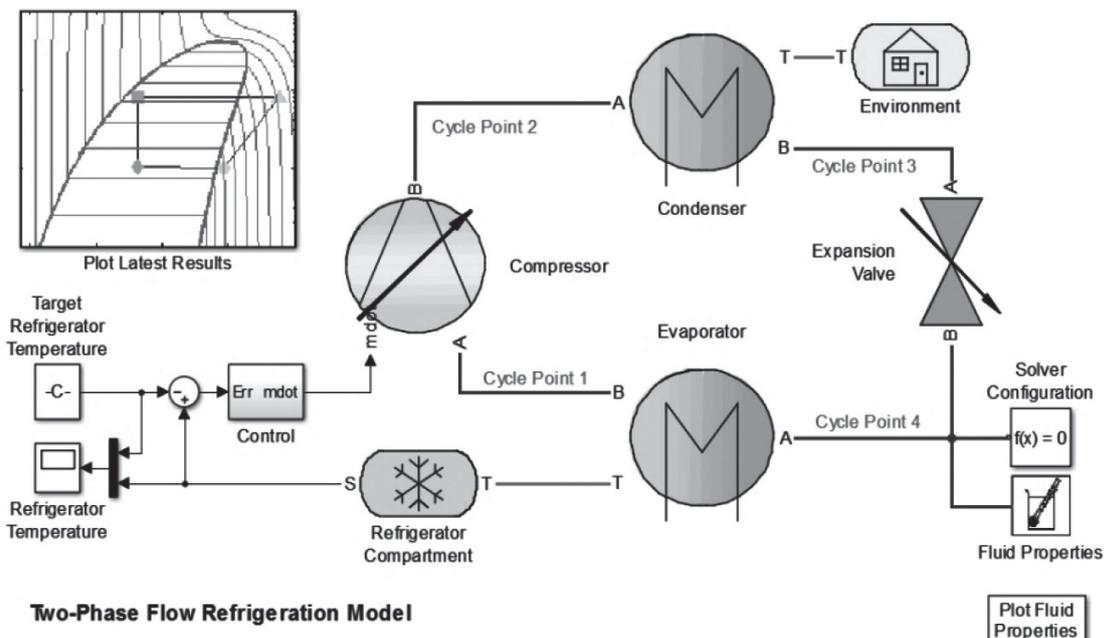


Рис. 1. Модель холодильной установки в среде Matlab/Simulink

От производительности компрессора зависит скорость выполнения цикла охлаждения и производительность системы охлаждения соответственно, поэтому для управления холодильной установкой требуется изменять производительность компрессора [8] – [10]. За изменение производительности компрессора отвечает подсистема управления «Control». Таким образом, существует возможность смоделировать работу холодильной установки при наличии в модели аппаратной части, выполняющей функции подсистемы управления. Далее сравним скорость работы системы при непосредственном нахождении подсистемы «Control» в модели установки и при ее нахождении на программируемой плате.

Применение ПАМ для рассмотренной модели

Для того чтобы добавить аппаратную часть в модель, выполняется следующая последовательность.

1. Создание HDL-кода для подсистемы регулирования (рис. 2). Для этого требуется выполнить встроенную в Simulink функцию «Generate HDL for subsystem...». Программа сгенерирует код и поместит его в архив расширением .vhd в корневую папку редактируемой модели.

```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.

### Generating HDL for 'ssc_refrigeration/Control'.
### Starting HDL check.
>>
### Begin VHDL Code Generation for 'ssc_refrigeration'.
### Working on ssc_refrigeration/Control as hdlsrc\ssc\_refrigeration\Control.vhd.
### Creating HDL Code Generation Check Report Control\_report.html
### HDL check for 'ssc_refrigeration' complete with 0 errors, 7 warnings, and 0 messages.
### HDL code generation complete.
fx >> |
    
```

Рис. 2. Командное окно с описанием процесса создания HDL-кода для подсистемы «control»

2. Создание блока FPGA-in-the-loop (далее FIL) и необходимых файлов для программирования платы [11], [12]. Создается блок, который заменит подсистему управления аппаратной частью

в модели. Для создания данного блока воспользуемся утилитой FPGA-in-the-loop Wizard. В окне специальных опций указываем MAC-адрес и IP-адрес подключаемой платы.

Далее программа сама создает FIL блок (рис. 3), который необходимо поместить в модель, предварительно убрав из цикла подсистему «Control».

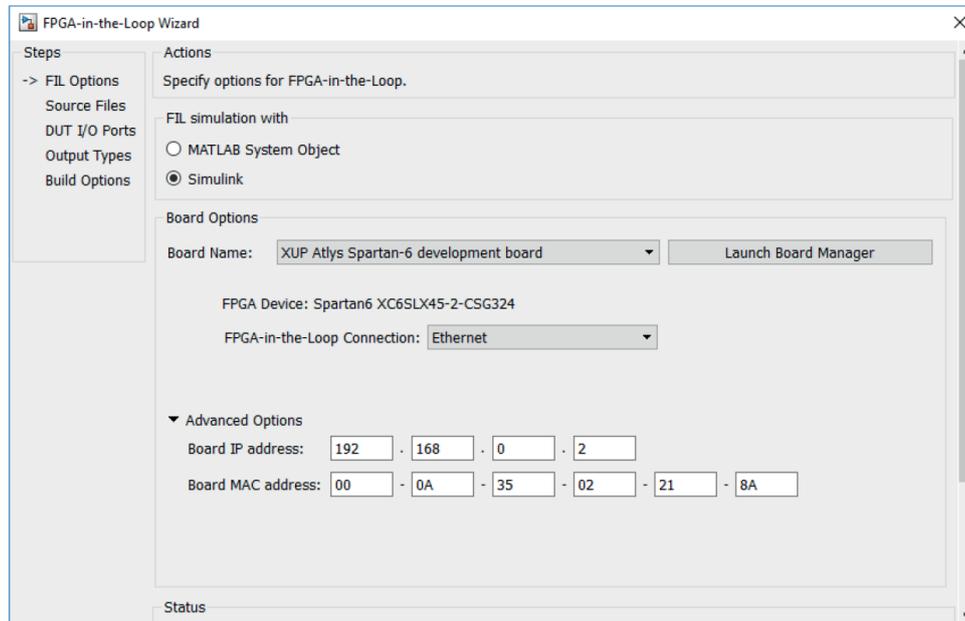


Рис. 3. Окно создания блока FPGA-in-the-loop

3. Запись программы управления на плату. Осуществляется через интерфейс JTAG подключением к порту USB.

4. Отладка модели. Связь модели с аппаратной частью осуществляется по протоколам интерфейса связи Ethernet. Подключаем плату к ПК через разъем стандарта RG-45 и производим процесс моделирования установки.

Результаты

Отладка модели была произведена с применением следующих параметров холодильной установки и хладагента:

а) параметры хладагента:

- тип хладагента: R134a;
- плотность, жидкая фаза: 1,206 кг/л;
- скрытая теплота испарения в точке кипения: 217,1 кДж/кг;
- молекулярный вес: 102 г/моль;
- теплопроводность, газообразная фаза: 0,0145 Вт/(м · °С);
- точка кипения при 1 бар: –26,1 °С;
- точка кристаллизации: –101 °С.

б) параметры холодильной установки:

- площадь охлаждаемого помещения 10 м².

При отладке модели без использования ПАМ имеем следующие результаты:

- время отладки для полного цикла выполнения модели — 60 с;
- скорость передачи информации с подсистемы управления на модель — 1 Мб/с.

Для случая с применением аппаратной части в модели холодильной установки получены следующие результаты:

- время отладки для полного цикла выполнения модели — 40 с;
- скорость передачи информации с подсистемы управления на модель — 0,8 Мб/с.

Полученные данные моделирования в виде графиков изменения температуры холодильной установки приведены на рис. 4 (сплошная линия — температура холодильной установки, пунктирная — заданная температура). Модель выполняет стандартный цикл двухпозиционного регулирования температуры.

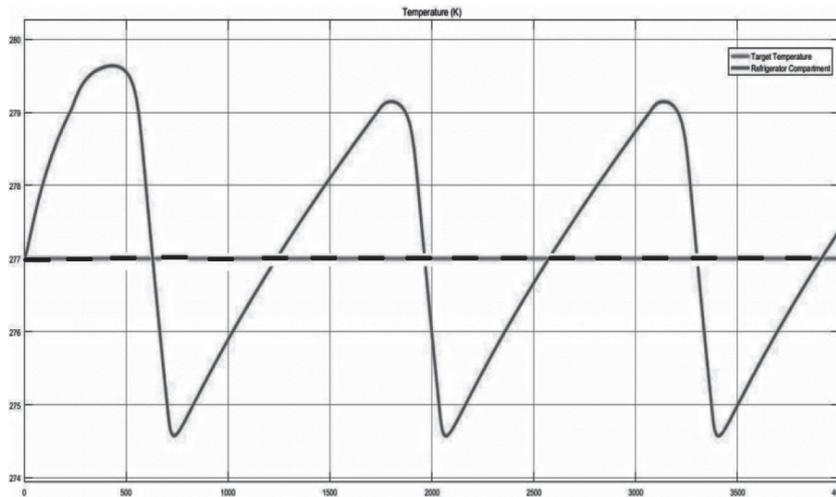


Рис. 4. Результаты моделирования работы системы автоматического управления: изменение температуры холодильной установки с течением времени

Обсуждение

При отладке модели с использованием ПАМ и при стандартной отладке были получены одинаковые графики изменения температуры в холодильной установке, поэтому можно заключить, что применение программного аппаратного моделирования не влияет на выходные результаты работы модели. Из результатов следует, что с использованием в модели аппаратной части процесс моделирования происходит быстрее, так как программное обеспечение Matlab/Simulink лишается некоторых процессов, выполняемых на внешней плате. Однако следует отметить, что увеличивается время передачи информации с системы управления на модель, что объясняется наличием физических связей.

Заключение

Проведенное исследование показало несомненную эффективность использования ПАМ на этапе проектирования систем управления. Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что применение ПАМ при проектировании сложных систем управления увеличивает эффективность и точность процесса создания систем управления. Результаты показали, что применение ПАМ в модели холодильной установки позволило сократить время отладки для полного цикла выполнения модели с 60 с до 40 с. Также использование ПАМ в производстве обеспечивает возможность уменьшения количества сетевых связей между системами управления и исполнительными органами путем введения аппаратной части вблизи исполнительного органа. С помощью ПАМ возможно рассчитать время передачи управляющего сигнала на исполнительный орган, и в проектируемой системе предусмотреть этот фактор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофус М. В. Моделирование в системе структурного и имитационного моделирования Simulink / М. В. Трофус, А. П. Кирпичников, И. М. Якимов // Вестник Казанского технологического университета. — 2017. — Т. 20. — № 8. — С. 107–110.
2. Тарасов И. Разработка цифровых систем на базе FPGA Xilinx начального уровня / И. Тарасов // Компоненты и технологии. — 2015. — № 3 (164). — С. 56–62.

3. Зюзев А. М. FPGA-симулятор реального времени электропривода переменного тока / А. М. Зюзев, М. В. Мудров, К. Е. Нестеров // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. — 2014. — № 1. — С. 229–238.
4. Аверченко А. П. Использование математических пакетов Matlab & Simulink при разработке цифровых фильтров / А. А. Аверченко, А. Ю. Медведков, Ж. Б. Садыков. // Технические науки в России и за рубежом: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Москва, июль 2014 г.). — М.: Буки-Веди, 2014. — С. 24–26.
5. Вынгра А. В. Модернизация модели судовых холодильных установок применением нечеткой логики для регулирования температуры / А. В. Вынгра // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 60–68. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-60-68.
6. Черный С. Г. Повышение производительности микропроцессорной сети управления на платформе Ethernet для системы буровых комплексов / С. Г. Черный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2016. — № 1. — С. 2–10.
7. Черный С. Г. Задача создания системы управления рисками для сложных систем морских платформ / С. Г. Черный // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2016. — № 1. — С. 55–61.
8. Зотов В. Создание проекта встраиваемой системы на основе микропроцессорного ядра семейства PicoBlaze / В. Зотов // Компоненты и технологии. — 2005. — № 52. — С. 178–182.
9. Ahmadeev E. The Virtual Test Bench of Medium Voltage Controlled AC Drives / E. Ahmadeev, D. Beliaev, E. Ilijin, A. Weinger // Proc. 15th IASTED Int. Conf. on Applied Simulation and Modelling ASM-2006. — 2006. — Pp. 340–345.
10. Применение FPGA в промышленных системах управления электроприводом [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/40498/doc/47909/> (Дата обращения: 20.06.2017).
11. Bolsens I. Challenges and opportunities for FPGA platforms / I. Bolsens // Lecture notes in computer science. — 2002. — Pp. 391–392.
12. Akgul A. Chaos-based engineering applications with a 3d chaotic system without equilibrium points / A. Akgul, I. Pehlivan, H. Calgan, I. Koyuncu, A. Istanbulu // Nonlinear dynamics. — 2016. — Vol. 84. — Is. 2. — Pp. 481–495. DOI: 10.1007/s11071-015-2501-7.

REFERENCES

1. Trofus, M. V., A. P. Kirpichnikov, and I. M. Yakimov. “Modelirovanie v sisteme strukturnogo i imitatsionnogo modelirovaniya Simulink.” *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* 20.8 (2017): 107–110.
2. Tarasov, I. “Razrabotka tsifrovyykh sistem na baze FPGA Xilinx nachal’nogo urovnya.” *Komponenty i tekhnologii* 3(164) (2015): 56–62.
3. Ziuzev, A. M., M.V. Mudrov, and K. E. Nesterov. “FPGA-based real-time software-hardware simulation of the electric drives.” *Energetika. Innovatsionnye napravleniya v energetike. CALS-tekhnologii v energetike* 1 (2014): 229–238.
4. Averchenko, A. P., A. Yu. Medvedkov, and Zh. B. Sadyikov. “Ispolzovanie matematicheskikh paketov Matlab & Simulink pri razrabotke tsifrovyykh filtrov.” *Tekhnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom: materialyi III Mezhdunar. nauch. konf.* M.: Buki-Vedi, 2014: 24–26.
5. Vyngra, Alexei Viktorovich. “Modernization of the model of ship refrigeration units using fuzzy logic for temperature control.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 60–68. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-60-68.
6. Chernyi, S. G. “Improving performance of microprocessor network management platform for Ethernet systems drilling rigs.” *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics* 1 (2016): 2–10.
7. Cherny, Sergey Grigorievich. “Development of the risk management system for complex systems of offshore platforms.” *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* 1 (2016): 55–61.
8. Zotov, V. “Sozdanie proekta vstraivayemoy sistemy na osnove mikroprotsessornogo yadra semeystva PicoBlaze.” *Komponenty i tekhnologii* 52 (2005): 178–182.
9. Ahmadeev, E., D. Beliaev, E. Ilijin, and A. Weinger. “The virtual test bench of medium voltage controlled AC drives.” *Proc. 15th IASTED Int. Conf. on Applied Simulation and Modelling ASM-2006.* 2006.

10. Primenenie FPGA v promyshlennykh sistemakh upravleniya elektroprivodom. Web 20 June 2017 <<http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/40498/doc/47909/>>.

11. Bolsens, Ivo. "Challenges and opportunities for FPGA platforms." *Lecture notes in computer science* (2002): 391–392.

12. Akgul, Akif, I. Pehlivan, H. Calgan, I. Koyuncu, and A. Istanbulu. "Chaos-based engineering applications with a 3D chaotic system without equilibrium points." *Nonlinear Dynamics* 84.2 (2016): 481–495. DOI: 10.1007/s11071-015-2501-7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вынгра Алексей Викторович — ассистент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Республика Крым,
г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: elag1995@gmail.com

Авдеев Борис Александрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Республика Крым,
г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: dirigeant@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyngra, Alexei V. — Assistant
Kerch State Marine
Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Republic of Crimea, Russian Federation
e-mail: elag1995@gmail.com

Avdeyev, Boris A. —
PhD, associate professor
Kerch State Marine
Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Republic of Crimea, Russian Federation
e-mail: dirigeant@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 июля 2017 г.

Received: July 13, 2017.