СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИКЛАДНАЯ ИНФОРМАТИКА
№ 4, 2016

SYSTEM ANALYSIS AND APPLIED INFORMATION SCIENCE
No 4, 2016

Международный Научно-технический журнал

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Главный редактор

Федор Иванович Пантелеенко

International Science and Technique Journal

Published since December, 2012

Founnder

Belarusian National Technical University

Editor-in-chief

Phyodor Panteleenko

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора), В. А. Богуш, Т. В. Борботько, Р. Венерстен (Швеция), В. А. Ганэ, Н. Н. Гурский, Ю. М. Захарик, Э. Г. Лазаревич, А. А. Лобатый, В. А. Мищенко, А. Патрин (Польша), И. А. Сатиков, В. В. Старовойтов, П. П. Урбанович, А. Н. Чичко, В. Б. Байбурин (Россия), Е. И. Никифорович (Украина)

Editorial board

V. Golikov (deputy editor-in-chief), V. Bogush, T. Borbotko, P. Venersten (Sweden), V. Ganeh, N. Gurskiy, J. Zaharik, E. Lazarevich, A. Lobaty, V. Mishchenko, A. Patrin (Poland), I. Satikov, V. Starovoytov, P. Urbanovich, A. Chichko, V. Bayburin (Russia), E. Nikiforovich (Ukraine)

Журнал включен в "Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований".

Журнал включен в международные каталоги и базы данных:

- Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
- Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань
- DOAJ https://doaj.org/toc/2414-0481
- Google Scholar
- Киберленинка
- EBSCO
- BASE Search
- OpenAIRE
- WorldCat
- OpenDOAR
- ROAR

Содержание

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Гулай А. В., Зайцев В. М., Гулай В. А.
Формирование информационных сенсорных образов интеллектуальной *VITA*–среды 4

Даншина С. Ю.
Функциональная модель процесса управления материальными ресурсами проектов создания новой техники 11

Самаль Д. И., Фролов И. И.
Алгоритм подготовки обучающей ..... выборки с использованием 3D-моделирования лиц . 17

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Гурский Н. Н., Скачек В. А., Скачек А. В., Скудняков Ю. А.
Имитационное моделирование механизма наплавления пластмасс в аддитивных технологиях 25

Contents

SYSTEM ANALYSIS

Gulaj A. V., Zaytsev V. M., Gulaj V. A.
Formation of information sensor images of intelligent *VITA*-medium 4

Danshyna S. Yu.
Functional model of the material resources management for projects of the creation of new techniques 11

Samal D. I., Frolov I. I.
Algorithm of preparation of the training sample using 3D-face modeling..... 17

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

Hurski N. N., Skachek V. A., Skachek A. V., Skudnyakov Y. A.
Simulation of open mechanisms for the additive process weld plastics 25

Стрижнев А. Г.
Метод придания одноконтурной замкнутой системе автоматического управления требуемых фильтрующих свойств 31

Шаркович Р. П.
Оптимизация устройства балансировки Li-Ion аккумуляторной батареи для гибридных автомобилей и электромобилей 38

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Лобатый А. А., Петренко Ю. Н., Абуфанас А. С., Imad El Zein
Импульсное управление гибридной электротехнической системой 46

Михайлов В. Г.
Считывание, первичная обработка ускорений и углов наклона с MPU-6050 и запись их на SD-карту ARDUINO DUE 53

Strizhnev A. G.
The method of imparting desired filtering properties for closed-loop control system..... 31

Sharkovich R. P.
Optimization balancing devices Li-Ion batteries for hybrid and electric vehicles..... 38

DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING

Lobaty A. A., Petrenko Y. N., Abufanas A. S., Imad El Zein
Impulse control hybrid electrical system 46

Mikhailov V. G.
Reading, preprocessing of acceleration and corners inclination with MPU-6050 I record them on SD-card the ARDUINO DUE 53

Ответственный секретарь редакции
Лакин В. И.

Адрес редакции
ул. Франциска Скорины 25/3, Минск, 220114,
Республика Беларусь
Тел.+375 17 267-66-84
e-mail: CA_PI@bntu.by

Executive secretary of the editorial board
V. Lakin

Editorial board address
25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 267-66-84
e-mail: CA_PI@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1540 от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 22.03.2016. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Ризография. Усл. печ. л. 7,67. Уч.-изд. л. 3,00. Тираж 150 экз. Заказ 960.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013

© Белорусский национальный технический университет

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

УДК 004.89

А. В. ГУЛАЙ, В. М. ЗАЙЦЕВ. В. А. ГУЛАЙ

ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕНСОРНЫХ ОБРАЗОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ VITA-СРЕДЫ

Белорусский национальный технический университет

В работе представлен обобщенный подход к процедурам контроля и анализа свойств vita-среды при использовании «субъективной сенсорной системы». Состояние vita-среды определяется на основе применения источников экспертных оценок, отображающих на естественном языке ее свойства путем агрегирования количественных и качественных признаков. При этом формируется совокупность информационных сенсорных образов vita-среды, представляющих собой определенную информационную целостность и характеризующих vita-среду как специфическую целостность.

Показано, что создание информационных образов выполняется по известным принципам формализованного субъективного описания сложных систем. В связи с этим рассмотрена технология формализованного представления информационных потоков и сенсорных образов в процессе моделирования vita-среды с использованием категориальных переменных. Показана возможность структурирования vita-среды практически любого уровня сложности с помощью следующих компонентов: потребность; замысел; ресурсы; итоги; конструкция.

Проанализирована задача организации структур данных для формирования интеллектуальной vita-среды и представлена характеристика внешнего, системного и физического уровней организации данных в базе интеллектуальной модели. Особенность данных заключается в том, что в модели vita-среды они соотносятся с определенными материальными объектами реального мира, с физическими или информационными процессами. Это обеспечивает наполнение данных смыслоразличительным содержанием, имеющим определяющее значение для набора функциональных задач, решаемых в объеме интеллектуальной модели.

Ключевые слова: *интеллектуальная vita-среда; «субъективная сенсорная система»; информационный сенсорный образ; реляционное представление данных.*

Введение

В технологиях моделирования все объекты, входящие в сферу интересов человека, рассматриваются в той или иной степени зависимыми от субъективного компонента. Поэтому среди множества сегментов научного знания о взаимовлиянии человека и иных объектов живой и неживой природы важное место занимает теория активных систем. Она ориентирована в основном на решение проблем управления социальными и экономическими системами, поведение которых слабо предсказуемо в силу наличия активного элемента – человека. В контексте решения данных проблем актуальна разработка методологических и технологических основ моделирования указанных слабоформализованных систем.

Состояние активной системы определяется на основе сенсорного контроля ее количественных и качественных признаков. Сенсорный контроль системных свойств может носить разноплановый характер: от уровня отдельного элемента (концепта) до уровня системы в целом. Причем с повышением сложности системы в значительной степени возрастает проблема ее адекватного сенсорного описания. С учетом этого вызывает значительный научный интерес проблема анализа особенностей сенсорного контроля состояния активной системы. Данный вопрос значительно усложняется в случае формализованного описания системы при интеллектуализации процесса ее функционирования.

В настоящей работе приведен обобщенный подход к рассмотрению состояния такой активной системы как *vita*-среда, которая представлена в виде интеллектуальной модели с субъективно-сенсорными параметрами. Набор параметров в виде информационных сенсорных образов формируется при анализе

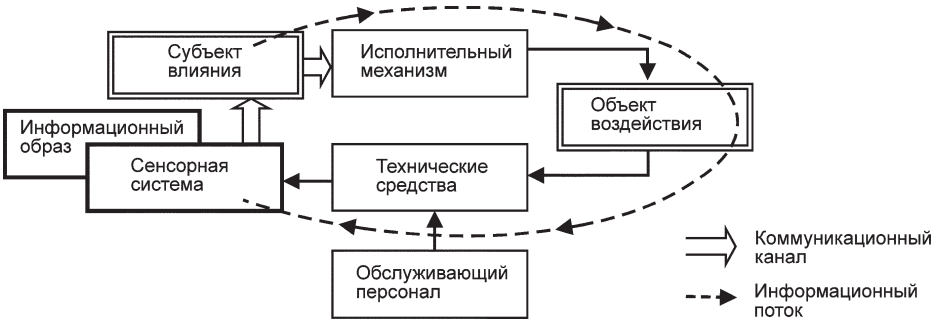


Рис. 1. Структурно-функциональная схема информационной модели *vita*-среды

свойств *vita*-среды с использованием оценок экспертов, составляющих «субъективную сенсорную систему». Рассмотрена технология формализованного представления информационных потоков в процессе моделирования *vita*-среды и отражена процедура построения структур данных для формирования сенсорных образов.

Vita-среда как система с субъективно-сенсорными параметрами

В теории активных систем для обозначения целенаправленно функционирующей совокупности людей и используемых ими знаний и технологий введено понятие **vita-системы** (от лат. *vita* – жизнь) [1]. Указанный термин применим при исследовании фактически любого вида человеческой деятельности, в том числе социальных и экономических систем. Универсальность содержания данного понятия характеризуется следующими общими признаками *vita*-систем: наличием разумного начала, свойственного человеческой деятельности; наращиванием функциональных возможностей выше уровня способностей человека; стремлением к самоорганизации, приводящим к синергичности их построения. Теория активных систем сформировалась на основе классической теории автоматического управления, что определяет структуру и функции *vita*-систем (рис. 1).

Одним из базовых элементов *vita*-системы признается субъект влияния (индивидуум, группа, коллектив), которому отводится роль инициатора в ее создании и применении. В качестве объектов воздействия *vita*-системы выступают структуры живой и неживой природы: отдельные индивидуумы, сообщества людей, технологические комплексы, природные образования, другие *vita*-системы. Для налаживания взаимосвязей между базовыми компонентами *vita*-системы создается подсистема восприятия параметров, характеризующих состояние объекта воздействия (сенсорная подсистема), а также подсистема воздействующих механизмов. Для передачи информации о состоянии указанного объекта и о воздействии на него в соответствии с принятыми решениями формируются коммуникационные подсистемы. Существенная особенность *vita*-системы заключается в наличии технических средств для получения сведений о ее свойствах (мобильная связь и сеть интернет, фотоаппаратура и видеосистемы, радио и телевидение). Наиболее информационно насыщенными являются пространственно-распределенные *vita*-системы (например, отрасли экономики – в частности, системы транспорта, вещания, связи), к определению которых вполне применим термин **«vita-среда»** [2].

Определение. *Информационная vita-среда – это модель с субъективно-сенсорными параметрами, отображающая функционирование совокупности людей и используемых ими знаний и технологий как распределенной активной системы с целенаправленными информационными процессами.* Путем разработки алгоритмов принятия решений и оснащения субъекта влияния компьютерными (автоматическими, интеллектуальными) устройствами формируется **интеллектуальная vita-среда** [3].

Определение. *Интеллектуальная vita-среда – это модель vita-системы в виде человеко-машинного комплекса, синтез, исследование и использование которого для управления социальными и экономическими процессами выполняется на основе интеллектных технологий.* В качестве примера реализации интеллектуальной *vita*-среды можно назвать введение

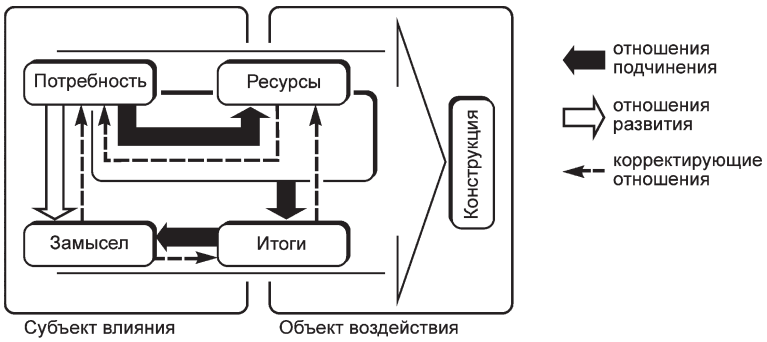


Рис. 2. Формирование информационных потоков в объеме *vita*-среды

долговременных программ ликвидации последствий масштабных катастроф при использовании экспертных систем поддержки принятия решений.

В процессе функционирования интеллектуальной *vita*-системы высшая творческая функция субъекта влияния проявляется в формировании информационного образа объекта воздействия за счет наличия сенсорных средств [4]. Разумное начало в данном случае предстает как возможность мысленного отображения внешнего мира на основе комплементарности логического и интуитивного механизмов. За человеческим разумом остается также определение функционального содержания действия *vita*-системы в условиях подготовки и выполнения заданных правил и принятых решений. Субъективная составляющая в функционировании *vita*-среды усиливается из-за влияния на технические средства управляющего персонала, опосредованно участвующего в формировании сенсорного образа.

При описании *vita*-среды используется обобщенная информация, содержащая оценки, формируемые в результате взаимодействия экспертов с *vita*-средой. Можно сказать, что в данном случае формируется **«субъективная сенсорная система»**, позволяющая агрегировать информацию, но при этом вносящая в нее элементы субъективного восприятия, свойственные людям. Схематическое описание интеллектуальной *vita*-среды в данном случае будем рассматривать как процесс, состоящий из следующих этапов: выделение сенсорной системой определенных свойств *vita*-среды; построение шкал, позволяющих проводить сравнение этих свойств; формирование соответствующих оценок по выбранным шкалам. Опираясь на приведенную характеристику процесса сенсорного контроля можно дать определение сенсорной системы, с помощью которой осуществляется контроль.

Определение. *«Субъективная сенсорная система» представляет собой совокупность явных и неявных источников экспертных оценок, отображающих на естественном языке свойства vita-среды путем агрегирования ее количественных и качественных признаков.* Наличие субъективного фактора накладывает особые требования на интерпретацию и использование информации, полученной с помощью «субъективных сенсоров» [3]. Из нее необходимо извлечь те существенные компоненты, которые являются отражением объективных закономерностей, свойственных контролируемой системе, и субъективные моменты, привнесенные «субъективным сенсором».

Создание информационных потоков и сенсорных образов *vita*-среды

Адекватность между формальными системами и материальными системами мира, в том числе *vita*-средой, состоит в наличии структуры – совокупности элементов с определенными функциями и связей между ними. *Vita*-среду практически любого уровня сложности можно структурировать, например, с помощью следующих пяти компонентов: потребность; замысел; ресурсы; конструкция; итоги [1]. Между данными категориями устанавливаются определенного вида взаимодействия: отношения развития/ответной реакции, а также отношения подчинения/сопротивления. В контексте нашего исследования наибольший интерес вызывает процесс моделирования системы информационного обеспечения *vita*-среды при взаимодействии указанных структурных компонентов. Логика формирования информационных потоков и сенсорных образов при моделировании *vita*-среды поясняется схемой на рис. 2.

Определение. *Под информационным потоком понимается последовательная передача информации о свойствах интеллектуальной vita-среды через ее структурные компоненты (подсистемы): сенсорный модуль, центр управления, исполнительный механизм, коммуникационную сеть.*

Информационное обеспечение интеллектуальной *vita*-среды начинается с формирования пожелания субъекта влияния получать сенсорные сведения о ее функционировании. Это пожелание, являясь компонентом категории «потребность» (цель, интерес, устремление), приводит в действие закон подчинения. При этом формируется посылка субъекта влияния к категории «ресурсы» с запросом о наличии ресурсов (временных, материальных, энергетических, аппаратных) для удовлетворения данного желания. В зависимости от наличия ресурсов происходит либо усиление возникшего желания, либо (в силу действия деструктивного закона сопротивления) к ослаблению начального желания. В результате достигается согласованная величина компонента потребностей и ресурсного компонента.

Пара компонентов «ресурсы – потребности» формирует отношение подчинения с категорией «итоги» (объективные результаты и их документальное оформление), то есть создает ресурсные предпосылки для формирования первичных требований к процессам информационного обеспечения. Следствием этого является отношение сопротивления, направленное в сторону категории «ресурсы», которое редуцирует выделенные ресурсы на определенный объем затрат. После возможных итераций начинает действовать отношение подчинения, посредством которого в категории «замысел» (намерения на основе знаний, возможностей) формируется компонент, имеющий смысл концепции разработки подсистемы информационного обеспечения. В противовес этому созидательному отношению действует отношение, препятствующее построению указанной подсистемы в силу того, что *vita*-среда (как всякая сложная система) консервативна в отношении нововведений.

Параллельно с описанными процессами начальная потребность инициирует отношение развития, которое приводит к формированию замысла, отличного от первоначального. Полученные результаты конкурируют друг с другом, сигнал их несоответствия передается в качестве корректирующего отношения компоненту пожеланий с помощью отношения ответной реакции, после чего очередные итерации приводят к согласованному замыслу. Формируемая система информационного обеспечения интеллектуальной *vita*-среды, являясь ее подсистемой, рассматривается как элемент ее категории «конструкция» (то есть совокупности кадровых, технических, технологических компонентов).

При формализации описания *vita*-среды имеется необходимость вводить в процедуру рассмотрения как ее свойства (с их значениями на соответствующих шкалах), так и человека («субъективный сенсор»), формирующего оценки по этим шкалам. При этом повышается роль субъективного фактора в решении данной задачи, что позволяет особо указать на проявление одного из важнейших методологических принципов – **принципа комплементарности объективного и субъективного** в системном анализе информационной проблемы [5]. Совокупность контролируемых параметров можно представить как информационный образ объекта контроля, неотъемлемым качеством которого (так же как и особенностью объекта контроля) является «целостность» [4].

Определение. *Информационный сенсорный образ vita-среды – это комплекс формируемых «субъективной сенсорной системой» параметров, представляющий собой определенную информационную целостность и характеризующий vita-среду как специфическую целостность.* Существенной проблемой «субъективного сенсорного контроля» является вопрос соответствия свойств сенсорной системы информационному образу *vita*-среды. При этом для сопоставления объема параметров сенсорной системы с такой комплексной характеристикой *vita*-среды как «информационный образ» можно ввести согласованный с ним «сенсорный профиль» системы контроля.

Определение. *Сенсорным профилем «субъективной сенсорной системы» можно назвать набор ее характеристик, за счет которых формируется совокупность количественных и качественных параметров, адекватных свойствам контролируемой vita-среды.* Сенсор-

ный профиль системы контроля объединяет в первую очередь такие ее характеристики как чувствительность сенсоров, погрешность контроля, разрешающая способность и другие.

Разработка структур данных для формирования сенсорных образов

Создание информационного сенсорного образа *vita*-среды требует аккумуляции достаточно большого объема данных, их особой организации для обеспечения хранения и обработки. Эти данные должны отображать текущие состояния концептов *vita*-среды в интересах решения наборов различных функциональных задач {ФЗ*i*}; $i = 1, 2, 3, \ldots, N$ с целью принятия управленческих решений. Очевидно, что включение тех или иных задач в указанный набор связывается с объективными и субъективными оценками их важности, а также с прагматическими целями моделирования *vita*-среды.

Сведения о состоянии *vita*-среды отображаются с помощью числовых и символьных данных различного формата, а также с помощью их комбинаций, которые имеют смысл и применимы при моделировании [6, 7]. Особенностью данных является то, что в модели *vita*-среды они обязательно соотносятся с определенными материальными объектами реального мира, с физическими или информационными процессами. Каждой функциональной задаче ФЗ*i* соответствуют данные, совокупность которых образует некоторую подобласть *PFDi* функционально ориентированной части предметной области *FD vita*-среды. Если *D* – общая предметная область *vita*-среды, то выполняются следующие условия вложенности: $FD \in D$; $\{PFDi \in FD\}$.

Определение. *Функционально ориентированная часть предметной области vita-среды – это совокупность данных, относящихся к множествам объектов, явлений, событий, операций, процессов, состояний, имеющих определенный смысл для заданного набора функциональных задач.* При формировании функционально ориентированной части предметной области *FD* входящие в нее компоненты рассматриваются в двух аспектах: 1) как обобщающие классификационные понятия для обозначения и выделения на смыслоразличительном уровне отдельных классов (типов) концептов $\{Oj\}$; $j = 1, 2, 3, \ldots$; 2) как понятия для обозначения конкретных экземпляров (информационных образов) предметов $\{Ojk\}$; $k = 1, 2, 3, \ldots$ в границах каждого класса *Oj*.

Общепризнанным приемом организации данных является объединение их в единую базу [6]. Принято рассматривать три уровня организации данных в базе: внешний, системный и физический. Внешний уровень организации базы данных – это логическая структура и организация данных в каждой подобласти *PFDi,* как представляется она соответствующей функциональной задаче ФЗ*i* при условии согласования с системным администратором. Системная организация базы данных – это логическая структура и организация данных в области *FD* как она представляется системному администратору. Она отражает инженерные решения, принятые администратором при объединении подобластей $\{PFDi\}$. Физическая организация базы данных – это физическая структура и организация хранения данных в компьютерном оборудовании системы, представление данных системным администратором после размещения необходимых видов информации в конкретных областях памяти вычислительных средств. Уровень физического хранения данных задается с помощью схемы хранения, которая согласована с концептуальной схемой базы данных и обеспечивает эволюционное развитие. Схема хранения, концептуальная схема и подсхемы образуют раздел метаданных базы, который формируется в технологическом режиме и размещается в базе до начала комплексной отладки функциональных задач.

Реляционное представление данных предполагает отображение их в виде отношений – прямоугольных плоских таблиц, допускающих математическое описание (рис. 3). Выделяют следующие важнейшие свойства отношений: каждый класс (тип) объектов может быть описан определенным отношением реляционной базы; свойство объекта, сведения о котором содержит отношение, отображается с помощью соответствующего домена – столбца отношения; в пределах домена все элементы имеют одинаковый формат данных, единый системный смысл и могут отражать конкретные признаки предметов; каждой строке отношения – кортежу может быть поставлен в соответствие конкретный экземпляр объекта, принадлежа-

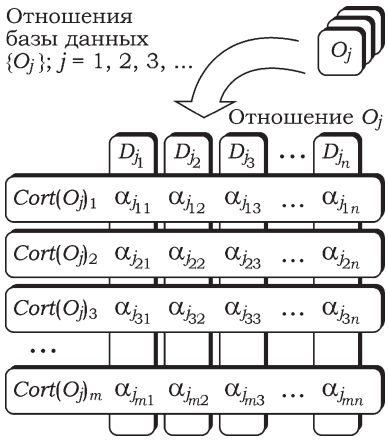


Рис. 3. Структура отношения базы данных интеллектуальной *vita*-среды

щего определенному классу предметов; в отношении не может быть одинаковых кортежей, они должны отличаться друг от друга хотя бы расположением в отношении; каждому элементу отношения ставится в соответствие некоторое значение – атрибут (информационная единица, имеющая смысл характеристики *vita*-среды).

Заключение

Представлен обобщенный подход к процедурам определения и анализа свойств *vita*-среды при использовании «субъективной сенсорной системы». С помощью данной системы на основе получаемого экспертным путем набора количественных и качественных параметров формируется совокупность информационных сенсорных образов *vita*-среды. Создание информационных образов может выполняться по известным принципам формализованного субъективного описания сложных систем. С учетом этого рассмотрены технологии формализованного представления информационных потоков и сенсорных образов в процессе моделирования *vita*-среды. Проанализирована задача организации структур данных для формирования интеллектуальной *vita*-среды.

Литература

1. **Аюпов А. И.** Разрешимость проблемы формализованного описания витасистем за счет использования категориальных переменных / А. И. Аюпов, С. И. Пляскота // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2012. – № 1. – С. 67–78.

2. **Gulay A.** Environmental monitoring with the use of vita «subjective touch system» / A. Gulay, V. Gulay // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. 3rd edition. Vol. 1. – San Francisco: B&M Publishing, 2014. – P. 41–47.

3. **Колешко В. М.** Синтез сенсорных и интеллектных технологий в научном познании / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай // Вышэйшая школа. – 2011. – № 2. – С. 53–57.

4. **Гулай А. В.** Интуиция как составляющая процесса поиска знаний / А. В. Гулай, А. И. Тесля // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Е. Педагогические науки. – 2013. – № 7. – С. 80–88.

5. **Гулай А. В.** Принцип комплементарности стохастического и алгоритмического в творческом поиске / А. В. Гулай, А. И. Тесля // Вышэйшая школа. – 2012. – № 4. – С. 28–32.

6. **Мартин Дж.** Организация баз данных в вычислительных системах / Дж. Мартин. – М.: Мир, 1980. – 662 с.

7. **Рыбина Г. В.** Основы построения интеллектуальных систем / Рыбина Г. В. – М.: Финансы и статистика, Инфра, 2010. – 432 с.

References

1. **Ayupov A. I.** Razreshimost problemy formalizovannogo opisaniya vitasistem za schyot ispol`zovaniya kategorial`ny`x peremenny`x / A. I. Ayupov, S. I. Plyaskota // Nejrokomp`yutery`: razrabotka, primenenie. – 2012. – № 1. – P. 67–78.

2. **Gulay A.** Environmental monitoring with the use of vita «subjective touch system» / A. Gulay, V. Gulay // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. 3rd edition. Vol. 1. – San Francisco: B&M Publishing, 2014. – P. 41–47.

3. **Koleschko V. M.** Sintez sensornyh i intellektnyh tehnologij v nauchnom poznanii / V. M. Koleshko, A. V. Gulaj, V. A. Gulaj // Wy`she`jshaya shkola. – 2011. – № 2. – P. 53–57.

4. **Gulaj A. V.** Intuiciya kak sostawlyayushhaya processa poiska znanij / A. V. Gulaj, A. I. Teslya // Westnik Poloczkogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya E. Pedagogicheskiye nauki. – 2013. – № 7. – P. 80–88.

5. **Gulaj A. V.** Princip komplementarnosti stoxasticheskogo i algoritmicheskogo v tworcheskom poiske / A. V. Gulaj, A. I. Teslya // Wy`she`jshaya shkola. – 2012. – № 4. – P. 28–32.

6. **Martin Dzh.** Organizaciya baz dannyx v vychislitelnyx sistemax / Dzh. Martin. – M.: Mir, 1980. – 662 p.

7. **Rybina G. V.** Osnovy postroeniya intellektualnyx sistem / G. V. Ry'bina. – M.: Finansy i statistika, Infra, 2010. – 432 p.

Поступила *15.06.2016* | *После доработки* *08.11.2016* | *Принята к печати* *28.11.2016*

A. V. Gulaj, V. M. Zaytsev, V. A. Gulaj

FORMATION OF INFORMATION SENSOR IMAGES OF INTELLIGENT VITA-MEDIUM

Belarusian National Technical University

This paper shows a generalized approach to procedures of control and analysis of vita-medium properties when «the subjective sensor system» is used. The state of vita-medium is determined on the basis of the applied sources of expert assessments which reflect its properties in the natural language by means of aggregation of quantitative and qualitative features. Being so, a totality of information sensor images of vita-medium is formed, which represent a certain informational coherence and characterize vita-medium as a specific coherence.

It is shown that the creation of information images is carried out according to the known principles of formalized subjective description of complex systems. Accordingly, the technology of formalized presentation of information flows and sensor images is considered in the process of vita-medium modeling with the use of categorical variables. Possible vita-medium structuring is shown at practically any complexity level with the aid of the following components: need; idea; resources; results; construction.

Organization of data structures has been analyzed for formation of the intelligent vita-medium, and external, systematic and physical levels in the intelligent model base have been provided. A peculiarity of data is that in the vita-medium model it is relevant to certain material objects of the real world, to physical or informational processes. This provide data filling with the distinctive contents having the principal meaning for a set of functional tasks resolved in the intelligent model volume.

Keywords: *intelligent vita-medium; «subjective sensor system»; information sensor image; relational view of data.*

Гулай А. В., кандидат технических наук, заведующий кафедрой БНТУ. Окончил Минский радиотехнический институт (1971), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (1982), лауреат Государственной премии в области науки и техники. Работал в научных учреждениях НАН Беларуси, занимался разработкой и исследованием микроэлектронных систем. С 2004 года – доцент кафедры «Интеллектуальные системы» БНТУ, с 2013 года – заведующий кафедрой. Область научных интересов: методологические проблемы интеллектных технологий; интеллектуальные системы формирования знаний; построение интеллектуальных и сенсорных систем.

Зайцев В. М., кандидат технических наук, доцент БНТУ. Окончил Минский радиотехнический институт (1971), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (1974). В отраслевом научно-исследовательском институте возглавлял научное направление по созданию автоматизированных систем управления. С 2000 года – доцент кафедры «Интеллектуальные системы» БНТУ. Область научных интересов: цифровая обработка сигналов; проектирование интеллектуальных систем технического назначения.

Гулай В. А., старший преподаватель БНТУ. Окончил Белорусский государственный университет (1997), аспирантуру БНТУ (2008). С 2005 года – старший преподаватель кафедры «Интеллектуальные системы» БНТУ. Область научных интересов: физика и технология сенсорных микро-наносистем; моделирование интеллектуальных и сенсорных систем.

УДК 303.732.4:005.8

С. Ю. ДАНШИНА

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ ПРОЕКТОВ СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Статья посвящена проблеме управления материальными ресурсами, возникающей при реализации проектов по разработке и созданию (модернизации) новой техники. Уникальность проектов, их ограничение по стоимости и времени не позволяют использовать традиционные подходы к управлению ресурсами. Подобные проекты зачастую реализуются в рамках развития компаний, что не позволяет отказаться от традиционных процессных методов управления операционной деятельностью. Целью статьи является формализация процесса управления материальными ресурсами проектов, описание его информационных потоков для интеграции в практику проектного менеджмента и повышения эффективности управления материальными ресурсами. Для систематизации информации, возникающей при управлении материальными ресурсами, предложено теоретико-множественное представление рассматриваемого процесса. В соответствии с требованиями стандартов по управлению проектами дано описание множеств, определены правила их преобразования. Конкретизация теоретико-множественного представления позволила установить область и границы процесса моделирования. Дальнейшая декомпозиция процесса стала основой функциональной модели, построенной в соответствии с методологией IDEF 0. Графическое представление модели позволило наглядно представить анализируемый процесс на разных уровнях детализации. Для уточнения вопросов, связанных с организаций и продвижением материального потока, были дополнительно разработаны функциональные модели подпроцессов и дано описание возникающих при этом потоков данных. Для гармонизации процессного и проектного подходов сформулированы условия оценки эффективности управления материальными ресурсами. Разработанные модели могут стать основой при проектировании структуры компаний, при регламентации их проектной деятельности, а также при создании информационной системы управления ресурсами проектов.

Ключевые слова: *материальные ресурсы проекта, теоретико-множественное представление, методология IDEF0, процессный и проектный подходы, условия эффективности.*

Введение

Современное производство формируется в нестабильных условиях рыночной среды, заставляя компании ориентироваться на развитие и постоянное совершенствование. Это происходит в рамках основной, вспомогательной и проектной деятельностей. Специфика отраслей авиа-, машино- и приборостроения такова, что проекты в деятельности компаний возникают часто, носят не только вспомогательный характер, а непосредственно направлены на создание добавленной стоимости. Успешен проектный подход в случаях, когда проводят большой и дорогостоящий комплекс работ по разработке новых изделий, созданию опытных образцов или модернизации существующей номенклатуры выпускаемой продукции. Такие проекты развития часто становятся самостоятельными объектами управления и источниками заказов, фактически затрагивают деятельность всего менеджмента компании, что делает задачу гармонизации проектного и процессного подходов актуальными [1].

Как известно, бюджет проекта зависит от затрат на материальные ресурсы (МР). Существующие системы их планирования, направленные на интеграцию, синхронизацию и централизацию организационных данных, рассматриваются как важнейший инструмент достижения успеха компанией в условиях быстроменяющегося глобального рынка [2]. Однако высокая стоимость их приобретения, установки и реализации ограничивают возможность применения стандартных решений для проектов, носящих уникальный характер и имеющих ограниченный бюджет. Опыт по-

Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса управления материальными ресурсами проектов

казывает, что одно из центральных мест в управлении проектами разработки и создания (модернизации) изделий занимают задачи планирования, снабжения, распределения и контроля МР. Качество организации процесса управления МР влияет на финансовые показатели проектов, позволяет оценивать их фактическое состояние и перспективы реализации [2, 3]. В стандартах по управлению проектами подробно рассмотрены вопросы планирования закупок, возникающие при организации материального потока проектов. В справочниках по управлению проектами даны рекомендации по распределению МР [3, 4]. Но, как показывает практика, изменения среди поставщиков и условий контрактов не приводят к желаемым результатам, требуют пересмотра логики процесса и организационной эффективности его участников [1, 5].

Таким образом, целью статьи является формализация процесса управления материальными ресурсами проектов создания (модернизации) новой техники, описание его информационных потоков для интеграции в практику проектного менеджмента и, как следствие, повышение эффективности управления подобными проектами.

Основная часть

Для проектов по разработке новой техники, созданию опытных образцов или модернизации существующей номенклатуры изделий управление материальными ресурсами – одна из основных подсистем управления проектами, предназначенная для решения задач планирования, закупок, поставок, распределения, учета и контроля материалов в рамках материально-технического обеспечения проектов. При этом для совершенствования функционирования подобных систем необходимы адекватные методы обмена информацией между специалистами, принимающими участие в реализации проектов [2, 5].

Анализируя информационные потоки, возникающие при управлении МР, отметим, что в качестве исходных данных можно использовать данные о движении материалов, получаемые при реализации основной и вспомогательной деятельности компаний, а также информацию о ресурсах, потребовавшихся для выполнения аналогичных работ в предыдущих проектах и пр. [4, 5]. Детальное рассмотрение этой информации позволяет представить процесс управления МР проектов в теоретико-множественном виде, т. е. [6, 7]:

$$UMR = (X, S, Y, \varphi, \psi), \qquad (1)$$

где $X = \{x_1, x_2, \ldots, xn\}$ – множество исходных данных о материалах; $S = \{s_1, s_2, \ldots, sm\}$ – множество документов, регламентирующих процесс управления МР; $Y = \{y_1, y_2, \ldots, yk\}$ – множество данных, получаемых на выходе процесса; φ – функция, в результате реализации которой происходит обновление (коррекция) документов, регламентирующих процесс; ψ – функция, формирующая данные о ходе процесса (выходные данные).

В соответствии со стандартом IDEF 0 [7, 8] выражение (1) в графическом виде представлено на рис. 1.

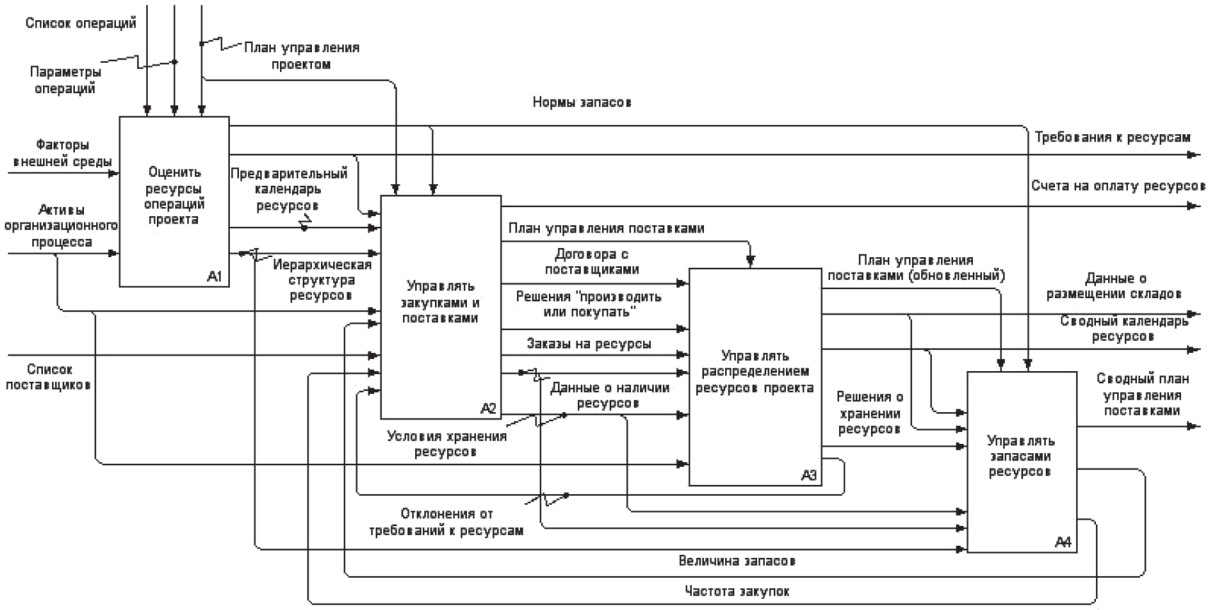


Рис. 2. Функциональная модель процесса управления материальными ресурсами проекта

Здесь элементами множества X являются: x_1 – активы организационного процесса, содержащие правила приобретения материалов, ретроспективную информацию о типах МР, необходимых для реализации проекта; x_2 – факторы внешней среды, содержащие информацию о наличии ресурсов, географических местах их нахождения и времени, когда эти ресурсы могут быть доступны; x_3 – список поставщиков [4].

Множество S формируют: s_1 – список операций проекта, для которых необходимы МР; s_2 – параметры операций, определяющие требования к ресурсам, необходимые даты, ограничения и допущения; *s3* – план управления проектом, в частности вопросы, связанные с расписанием, стоимостью, рисками, поставками и пр. [3, 4]. Таким образом, в ходе проекта реализуются функция [7, 9]:

$$\varphi : X \times S \to S, \forall \ (x, s) \in X \times S, \qquad (2)$$

т. е. содержание элементов множества S будет изменяться в зависимости от области приложения и сложности проекта, обновляться и корректироваться в рамках общего процесса управления изменениями при поступлении новой информации по проекту.

При декомпозиции в процессе управления МР выделим ряд функциональных областей, проходя через которые, формируется множество Y (рис. 2) [7, 8]. Его элементами являются: y_1 – требования к ресурсам, содержащие описание типов и количества ресурсов, необходимых для каждой операции проекта; y_2 – счета на оплату ресурсов; y_3 – данные о размещении складов; y_4 – сводный календарь ресурсов, определяющий количество каждого доступного ресурса по каждому периоду; y_5 – сводный план управления поставками, содержащий описание управления поставками, начиная от разработки документации по поставкам и до закрытия контракта.

В результате формируется функция ψ – отображение вида [7, 9]:

$$\psi : X \times S \to Y, \forall \ (x, s) \in X \times S, \qquad (3)$$

т. е. множество $X = \{x_1, x_2, \ldots, xn\}$, проходя функциональные области, с учетом требований проектной документации трансформируется в $Y = \{y_1, y_2, \ldots, yk\}$, а функционирование подсистемы планирования и управления материальными ресурсами проекта для $t \in T$ (T – длительность проекта) описывается уравнениями [5, 7]:

$$\begin{cases} s(t+1) = \varphi[s(t), x(t)]; \\ y(t) = \psi[s(t), x(t)], \end{cases}$$

где функции φ и ψ определены выражениями (2) и (3) соответственно.

Отметим, что предложенная функциональная модель процесса управления материальными ресурсами объединяет информационные

Рис. 3. Функциональная модель подпроцесса управления запасами ресурсов

потоки, возникающие при его реализации в рамках проекта. При этом эффективность этого процесса будет определяться следующим.

При выполнении функции А1 «Оценить ресурсы операций проекта» (рис. 2), содержание которой рекомендовано стандартами по управлению проектами [4], определяют интегральную величину ресурсов, необходимых для выполнения работ проекта

$$M = \int_0^T v(t)dt ,$$

где $v(t)$ – функция, определяющая необходимое количество ресурсов по работам в момент времени t ($t \in T$).

Функция А2 «Управлять закупками и поставками» должна обеспечивать организацию материального потока проекта таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\int_0^T g(t)dt \geq \int_0^T v(t)dt ,$$

где $g(t)$ – объемы поставок ресурсов во времени.

Таким образом, достигнуть ресурсной реализуемости проекта можно при [3, 5]

$$X(T) = \int_0^T v(t)dt ,$$

где $X(T)$ – функция наличия материальных ресурсов для проекта в целом.

Эффективным управление материальными ресурсами будет в том случае, если на момент окончания проекта выполняется условие [2, 4, 5]

$$X(T) \to 0,$$

что обеспечивается функциями А3 и А4.

Отметим, что содержание ряда функций, представленных на рис. 2, стандартами по управлению проектами не регламентируется. Их дальнейшее исследование, привело к разработке функциональных моделей подпроцессов, пример одной из которых (для функции А4 «Управлять запасами ресурсов») представлен на рис. 3.

Заключение

В работе рассмотрен процесс управления материальными ресурсами проектов создания образцов новой техники. Рассмотрение информации, возникающей при управлении материальными ресурсами проекта, позволило сформировать теоретико-множественном представление, которое стало основой функциональной модели процесса и ряда его подпроцессов. Новизна разработанной модели заключается в объединении требований стандарта по управлению проектами и процессного подхода. Это позволило, с одной стороны, гармонично интегрировать деятельность по управлению проектами в общую бизнес-модель, с другой стороны, разработать ряд условий, позволяющих оценить эффективность управления ресурсами проектов и достичь синергетического эффекта в управлении от применения двух современных подходов.

Литература

1. **Проектно-ориентирования** логистическая компания: баланс проектного и процессного управления / Харьков В. В. [и др.] // Управление проектами и программами. – 2010. – № 4(24). – С. 304–319.

2. **Kilic H. S.** Development of hybrid methodology for ERP system selection: The case of Turkish Airlines / H. S. Kilic, S. Zaim, D. Delen // Decisions Support Systems. – 2014. – Vol. 66. – P. 82–92.

3. **Управление** проектами: справочное пособие / И. И. Мазур [и др.]; под ред. И. И. Мазура, В. Д. Шапиро. – М.: Высш. шк., 2001. – 875 с.

4. **Национальный** стандарт «Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBOK)»: ANSI/PMI 99–001–2004 – Project Management Institute, Inc. PMI, 2004. – 285 с.

5. **Даншина С. Ю.** Управление логистическими системами в проектной деятельности предприятий / С. Ю. Даншина // Управление проектами: состояние и перспективы: Материалы X Международной науч.-практ. конф., Николаев, 16–19 сентября 2014 г. / Нац. ун-т кораблестроения им. адм. Макарова; редкол.: К. В. Кошкин [и др.]. – Николаев, 2014. – С. 79–81.

6. **Сорвина О. В.** Теоретико-множественное представление бизнес-процессов как инструмент повышения эффективности и структурно-функционального моделирования / О. В. Сорвина // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. – 2009. – № 2–1. – С. 243–251.

7. **Даншина С. Ю.** Функциональное моделирование процессов управления материальными потоками проектов развития / С. Ю. Даншина // Математическое моделирование процессов в экономике и управлении проектами и программами: Материалы Международной науч.-практ. конф., Коблево, 13–16 сентября 2016 г. / Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; редкол.: В. Н. Бабаев [и др.]. – Харьков, 2016. – С. 48–50.

8. **Методология** функционального моделирования IDEF 0: РД IDEF 0–2000. – Введ. 01.01.00. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 75 с.

9. **Пестриков В. М.** Дискретная математика: учебное пособие / В. М. Пестриков, В. С. Дудкин, Г. А. Петров. – СПб.: Изд-во СПб ГТУРП, 2013. – 136 с.

References

1. **Har'kov V. V., Andreeva E. A., Dianaova N. Ju., Savich A. V., Cipes G. L.** (2010) Proektno-orientirovannja logisticheskaja kompanija: balans proektnogo i processnogo upravlenija. Upravlenie proektami i programmami, 4 (24), 304–319.

2. **Kilic H. S., Zaim S., Delen D.** (2014) Development of hybrid methodology for ERP system selection: The case of Turkish Airlines. Decisions Support Systems, 66, 82–92.

3. **Mazur I. I., Shapiro V. D., Tipov S. A.** i dr. (2001). Upravlenie proektami [Project management]. Moscow: Vysshaja shkola, 875.

4. **Nacional'nyj** standart «Rukovodstvo k svodu znanij po upravleniju proektami (Rukovodstvo PMBOK)» [Guide of project management body of knowledge]: ANSI/PMI 99–001–2004 (2004). Project Management Institute, Inc, 285.

5. **Danshina S. Ju.** Upravlenie logisticheskimi sistemami v proektnoj dejatel'nosti predprijatij (2014). Upravlenie proektami: sostojanie i perspektivy: Materialy X Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf., Nikolaev, 16–19 sentjabrja 2014 g., 79–81.

6. **Sorvina O. V.** Teoretiko-mnozhestvennoe predstavlenie biznes-processov kak instrument povyshenija jeffektivnosti i strukturno-funkcional'nogo modelirovanija (2009). Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Jekonomicheskie i juridicheskie nauki, 2–1, 243–251.

7. **Danshina S. Ju.** Funkcional'noe modelirovanie processov upravlenija material'nymi potokami proektov razvitija (2016). Matematicheskoe modelirovanie processov v jekonomike i upravlenii proektami i programmami: Materialy Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf., Koblevo, 13–16 sentjabrja 2016 g., 48–50.

8. **Metodologija** funkcional'nogo modelirovanija IDEF 0: RD IDEF 0–2000. – Vved. 01.01.00. (2000). Moscow: Izdatel'stvo standartov, 75.

9. **Pestrikov V. M., Dudkin V. S., Petrov G. A.** (2013). Diskretnaja matematika. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo SPb GTURP. 136.

Поступила *06.10.2016*

После доработки *28.10.2016*

Принята к печати *28.11.2016*

Danshyna S. Yu.

FUNCTIONAL MODEL OF THE MATERIAL RESOURCES MANAGEMENT FOR PROJECTS OF THE CREATION OF NEW TECHNIQUES

The article is devoted to problem of material management arising in the implementation of projects for the development and creation (modernization) of the new techniques. The uniqueness of the projects, their limit on the cost and time does not allow the use of traditional approaches to resource management. Such projects are often implemented in the development of companies; where it is not possible to abandon the traditional operating methods of management. The aim of the article is a formalization of the process of material management of projects, a description of its information flows for integrate into the project management practices and for improve the efficiency of material management. For the systematization of information

arising from the material resources management, invited the set-theoretic representation of the management process. According with the requirements of project management standards were described the sets and defined rules of their transformation. Specification of the set-theoretic representation helped to establish the area and limits of the modelling process. Further decomposition process became the basis of the functional model, constructed in accordance with the methodology IDEF 0. A graphical representation of the model allows you to visualize the process at different levels of detail. For specification of issues related to the organization and promotion of material flow, were developed functional models of sub-processes and were described the identified data-flows. For the harmonization of process and project approaches formulated conditions for evaluating the efficiency of material management. The developed models can be the basis for designing the structure of companies, for regulation of their project activities, as well as for establishing an information system of management resources of projects.

Keywords: *material resources of the project, set-theoretic representation, methodology IDEF 0, project and process approaches, efficiency conditions.*

Материал подготовлен в рамках выполнения научно-исследовательской работы Д 502–18/2015 П «Разработка интеллектуальных беспилотных летающих платформ и их программно-математического обеспечения для оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций» (ГР № 0115U000998) при организации работ, связанных с выпуском опытного образца беспилотного летательного аппарата.

Даншина Светлана Юрьевна, 1976 г. р., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства радиоэлектронных система летательных аппаратов факультета радиотехнических систем летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Научные интересы: управление проектами, системный анализ, информационные системы разного назначения.

Адрес: Украина, 61070, г. Харьков, ул. Чкалова, 17, Национальный аэрокосмический университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

Тел. +38(057) 788-48-03.

Danshyna Svetlana Yu., Candidate of Technical Science (Ph. D.), Associate Professor is an associate professor of the Department of production of radio electronic systems for aircraft of the National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». Research interests are project management, systems analysis, information systems for different purposes.

Address: 17, Chkalova Str., Kharkiv, 61070, Ukraine National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», tel. +38(057) 788-48-03.

УДК 531/534: [57 + 61]; 616.713:616.12–089

Д. И. САМАЛЬ, И. И. ФРОЛОВ

АЛГОРИТМ ПОДГОТОВКИ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИЦ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

В работе представлен алгоритм подготовки выборки для обучения многоклассового классификатора машин опорных векторов (SVM). Описанный подход основан на моделировании возможных изменений внешности распознаваемого человека, путем введения дополнительных ракурсов съемки, условий освещения, углов наклона изображаемого фотопортрета человека. Полученные изменения искусственным путем непосредственно оказывают влияние на обучение классификатора, расширяя диапазон возможных вариаций исходного изображения. Классификатор, обученный на расширенной выборке, соответственно, готов в большей степени распознавать новые объекты. Основными рассматриваемыми параметрами для моделирования выбраны возраст, эмоциональные выражения лица, повороты головы, различные условия освещения, шумы, а также некоторые комбинации перечисленных параметров. Для моделирования дополнительных признаков использовано стороннее программное обеспечение FaceGen, позволяющее моделировать до 150 параметров и доступное в демо-версии для свободного скачивания.

В качестве классификатора для тестирования влияния вводимых модификаций обучающей выборки выбран SVM. Подготовка и предварительная обработка изображений выполнялась в несколько этапов: локализация области лица на изображении, оценка угла поворота и наклона, растяжение диапазона яркостей пикселей и эквализация гистограммы для выравнивания яркостно-контрастных характеристик обрабатываемых изображений, Масштабирование локализованной и обработанной области лица, Формирование вектора признаков отмасштабированного и обработанного изображения лица по методу главных компонент (алгоритм NIPALS), Обучение многоклассового SVM-классификатора.

Представленная методика расширения обучающей выборки носит практически ориентированный характер и позволяет с использованием 3D-моделей расширить диапазон обрабатываемых 2D-фотопортретов лиц, что положительно сказывается на результатах идентификации в системе распознавания лиц. Данный подход позволяет в определенной мере компенсировать недостаток исходных изображений для повышения качества идентификации.

Ключевые слова: *3D-моделировние, предобработка, подготовка обучающей выборки*

Введение

Алгоритмы обнаружения области интереса (лица) на изображении ориентированы на устойчивость к качеству подаваемых на вход системы изображений – контрастности, яркости и т. д. Однако, даже при точной детекции области лица из-за разности условий освещения человека (рис. 1) при проведении фотосъемки процесс достоверной классификации остается весьма проблематичным.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день не существует универсальных алгоритмов улучшения изображения и выравнивания яркостно-контрастных характеристик, применяемых для задач обработки изображений различного рода и, в частности, для распознавания лиц. Остается открытым вопрос о выборе применяемых или разработке новых алгоритмов цифровой обработки изображений для задачи распознавания лиц.

В системе биометрической идентификации по фотопортрету компании Technest (www.genextech.com) использована технология 3D-моделирования для добавления в базу лиц фотопортретов недостающих ракурсов с отличающимися позами, освещением и выражениями лиц, однако данный ресурс ничего не сообщает о нивелировании возрастных отличий.

В работе [1] рассмотрена возможность использования фильтров, шумов с целью расширения обучающего множества для настройки биометрических систем распознавания. Одна-

Рис.1. Образцы изображений с различной освещенностью

Рис. 2. Сопоставление фотографии и 3D модели

ко данная работа направлена в большей степени на моделирование шумов и не рассматривает вопросы моделирования освещения, мимики, возрастных отличий.

В данной работе предложен комплексный подход для решения задачи по формированию и расширению обучающей выборки из изображений с разными характеристиками яркости, контрастности, условий освещенности, эмоциональных выражений лица, возрастных отличий. Демонстрируемый результат достигается путем синтезирования 3D-моделирования лица с изменяемыми параметрами и методов цифровой обработки изображений для имитации шумов, а также приведения к единым условиям обработки.

SVM-классификатор, так же как и нейронные сети, относится к классификаторам статистического типа, поэтому чем больше изображений лица в различных его вариациях (освещение, мимика, возраст, поворот, наклон) будет представлено системе на этапе обучения, тем большей обобщающей способностью будет обладать данный классификатор и тем выше процент распознавания будет на этапе распознавания лиц (данное утверждение будет проверено на этапе тестирования алгоритмов).

Параметры 3D-моделирования лица

Для построения 3D-модели лица необходимо наличие минимум одного фотопортрета полного фронтального типа с разрешением, не ниже требуемого (не менее 90 пикселей между центрами зрачков глаз) и без отклонений, поворотов и наклонов головы. Построение 3D-модели выполняется с использованием стороннего программного обеспечения FaceGenhttp://www.facegen.com и [2].

При использовании технологии 3D-моделирования наглядно был установлен факт высокой степени визуального соответствия фотографий реальных людей и их 3D-моделей (рис. 2). Построение виртуального набора лиц различных ракурсов, эмоций, освещения, шумов, возраста позволяет расширить обучающую выборку, а также нивелировать влияние искажающих факторов.

Самым распространенным фактором, влияющим на точность распознавания является изменение источников освещения, которые приводят к появлению теней на изображениях. Если обучающая выборка не содержит изображений, снятых различными вариантами освещения, то уровень распознавания системой таких лиц резко падает. На рис. 3 представлены варианты освещения модели лица (слева-направо): сверху, рассеянное прямое освещение, источник света справа, источник света слева.

Важную роль в идентификации личности по цифровому фотопортрету играет также возраст при получении фотоснимков и момент проведения процедуры идентификации. В данном случае лицо человека подвержено процес-

Рис. 3. Моделирование различных условий освещения

Рис. 4. Модель изменения возраста, слева-направо: 30 лет, 40 лет, 50 лет, 60 лет

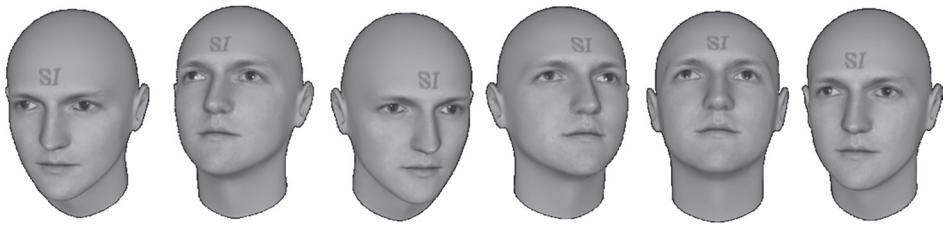


Рис. 5. Наклон и поворот головы в трех плоскостях при равномерном рассеянном освещении

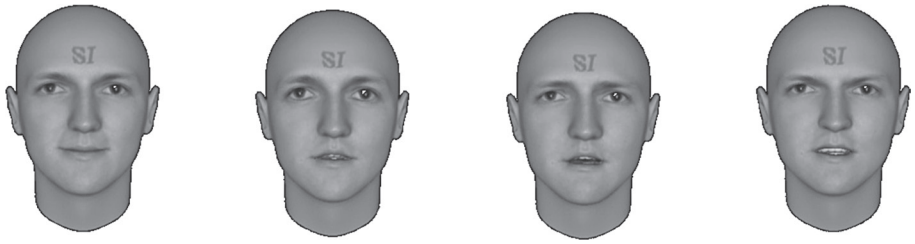


Рис. 6. Эмоции: улыбка закрытая, удивление, страх, гнев

су старения и, как следствие, изменению черт лица (рис. 4).

Кроме того, важным моментом при распознавании является ракурс фотосъемки: отклонение головы от вертикального положения вправо-влево, поворот головы вокруг вертикальной оси вправо-влево, наклон головы вокруг горизонтальной оси вверх-вниз. Перечисленные изменения положения головы могут иметь место как в одной плоскости (рис. 5), так и одновременно во всех трех перечисленных (рис. 5).

Следующим фактором, также меняющим черты лица, является проявление человеческих эмоций (рис. 6).

Кроме того, для формирования более полной обучающей выборки с многочисленными вариантами освещения, наклонов/поворотов головы, эмоциональных выражений лица, реализованы комбинации перечисленных вариантов для каждого фотопортрета. Учитывая фактор различных условий получения, хранения и передачи изображений, для нивелирования различных возможных шумов на изображении выполнено совмещение 3D-моделей лица и нескольких распространенных видов шумов (рис. 7).

Применение данных подходов позволяет расширить тренировочный набор фотопортретов в процессе формирования и обработки обучающей выборки, получая большее количество возможных вариаций условий съемки. Таким образом, повышается количество векторов признаков, описывающих изображения, и, соответственно, учитывая их отличия между собой, увеличивается и количество опорных

Рис. 7. Моделирование вариаций освещения, эмоций, возраста, шумов

векторов при обучении классификаторов, что повышает обобщающую способность классификаторов и, следовательно, приводит к увеличению коэффициента распознавания.

Если рассматривать ограниченный набор изменяемых параметров, то можно вычислить общее количество дополнительных изображений, которые строятся для расширения обучающей выборки по формуле $images = n \times (n - 1) / 2$, где *images* – общее число дополнительных изображений для каждого исходного фотопортрета; n – количество варьируемых параметров.

В проведенном исследовании использовано 17 параметров для расширения обучающей выборки – минимальный набор вариаций, позволяющий охватить сразу несколько влияющих факторов: угол поворота и наклона (7 позиций), возраст (2 позиции), эмоциональные выражения лица (4 позиции), освещение (4 позиции), что позволило увеличить обучающую выборку в 136 раз (т. к. для каждого изображения сгенерировано именно по 136 дополнительных изображений). Для того, чтобы не делать значительной долю зашумленных изображений, эффекты шума и фильтры применялись выборочно только для изображений лиц с нормальным рассеянным освещением без дополнительных измененных параметров, что позволило сформировать для 40 изображений каждого класса (случайно отобранных) эффекты шумов (рис. 7). В работе были использованы следующие преобразования: гауссов шум, импульсный шум (типа «соль и перец»). Таким образом, общее количество изображений, сгенерированных для каждого исходного изображения, составило 176 экземпляров.

Представленную последовательность операций по формированию обучающей выборки можно описать в виде следующего алгоритма.

Шаг 1. Формирование исходной выборки изображений лиц для обучения SVM-классификатора.

Шаг 2. Построение 3D-модели обрабатываемого лица с использованием стороннего программного обеспечения FaceGen (www.facegen.com) и генерирование дополнительных 176 изображений (количество и виды параметров – освещение, возраст, эмоциональные выражения лица, наличие усов, очков, наклонов/поворотов – устанавливается в зависимости от условий использования системы и требований пользователя) для каждого исходного фотопортрета в соответствии с выбранными изменяемыми параметрами фотосъемки.

Шаг 3. Оценка ракурса для каждого изображения (исходного и сгенерированных): предварительный поиск лица на изображении, поиск зрачков, вычисление угла поворота изображения и поворот до расположения глаз на одной горизонтальной линии, вычисление углов поворота α_1^{new} и наклона α_2^{new} головы.

Шаг 4. Локализация области лица по границам надбровных дуг с помощью алгоритма локализации лица Виола-Джонса.

Шаг 5. Предварительная обработка и нормализация изображений: растяжение диапазона яркостей пикселей и эквализация гистограммы для выравнивания яркостно-контрастных характеристик обрабатываемых изображений.

Шаг 6. Масштабирование локализованной и обработанной области лица до размеров 200×200 пикселей (данное разрешение соответствует требованию о минимальном расстоянии в 90 пикс. между центрами зрачков глаз при локализации лица по границам надбровных дуг).

Шаг 7. Добавление локализованной и обработанной области лица в обучающий набор фотопортретов и соответствующую базу лиц системы распознавания.

Шаг 8. Формирование вектора признаков отмасштабированного и обработанного изображения лица по методу главных компонент (алгоритм NIPALS), используя 100 главных компонентов для представления каждого век-

Рис. 8. Пример процедуры предобработки изображения

тора. Сохранение вектора признаков в обучающем наборе и соответствующей базе системы.

Шаг 9. Обучение многоклассового SVM-классификатора (4). Завершение алгоритма.

При разработке системы были проведены исследования и экспериментальным путем установлена целесообразность выполнения на первом этапе работы операции выделения области интереса – лица – на исходном изображении, а только на последующем шаге – реализация процедуры предварительной обработки цифрового изображения. Для демонстрации влияния именно фактора смоделированных изображений на конечный результат в данной работе в качестве нормализации изображения применялась только эквализация гистограммы изображения, без поворотов и иных алгоритмов увеличения робастности к шумам. Эффективность выполнения данных процедур в указанном порядке отображена на рис. 8. Изображения справа имеют более контрастный и насыщенный вид, а значит, содержат более информативные признаки по сравнению с более однотонным и низкоконтрастным изображением слева. Данные результаты объясняются влиянием фона и «лишних» частей фотопортрета (фон, одежда) при применении алгоритмов эквализации и нормализации гистограммы изображения [3], т. к. при их применении расчёты проводятся с учетом пикселей всего изображения, на котором фон зачастую оказывается либо темнее, либо светлее области интереса.

Выполнение процедуры улучшения изображения только на заданной области интереса (лицо) позволяет получить более контрастные изображения, в большей степени пригодные для дальнейшей процедуры редуцирования исходного пространства данных и распознавания образов.

С целью оценки эффективности применения предложенного подхода по формированию и расширению обучающей выборки для обучения SVM-классификатора проведен соответствующий эксперимент. Для распознавания был обучен SVM-классификатор с параметрами обучения $C = 8$, $\gamma = 0{,}003125$. Результаты эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. **Влияние расширения объема обучающей выборки на коэффициент распознавания**

Обучающая выборка	Число классов	Общее число изображений для обучения	Число изображений каждого класса	Коэффициент распознавания при идентификации, %
По 2 изображения каждого класса	700	1400	2	89,71
По 2 изображения каждого класса + дополнительный виртуальный набор лиц	700	124600	178	96,86

Необходимо отметить, что с увеличением числа обучающих изображений наблюдается и рост времени обучения классификатора. Однако данный недостаток не является определяющим, т. к. обучения происходит на стадии настройки системы и не влияет на скорость работы в режиме идентификации.

Заключение

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения разработанного алгоритма формирования обучающей выборки для обучения классификатора в задаче распознавания лиц. Применение 3D-моделирования лица позволяет в большой степени компенсировать отсутствие множества реальных фотопортретов с различными условиями фотосъемками, возрастными отличиями и присутствием эмоциональных выражений лица, на-

личием шумов. Разработанный алгоритм отличается от известных подходов в системах биометрической идентификации устойчивостью не только к изменениям освещения, ракурса и эмоций, но и к возрастным отличиям и шумам.

Литература

1. **Старовойтов В. В.** Расширение обучающего множества для настройки биометрических систем распознавания / В. В. Старовойтов, Никодимов Д. Ю. // Обработка информации и управление в чрезвычайных и экстремальных ситуациях: материалы 4-й международной конференции. – Минск, 2004. – С. 204–209.

2. **Yanushkevich S. N.** Biometric-Based Decision Support Assistance in Physical Access Control Systems / S. Chague, B. Droit, O. Boulanov, S. N. Yanushkevich, V. P. Shmerko, A. Stoica // Bio-inspired Learning and Intelligent Systems for Security: Proceedings of ECSIS Symposium, Aug. 4–6, 2008, Edinburgh, UK. – Edinburg, 2008. – P. 11–16.

3. **Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва: Техносфера. – 2005. – 1072 с.

4. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – Москва: Вильямс. – 2006. – 1104 с.

References

1. **Starovojtov V. V.** Rasshirenie obuchajushhego mnozhestva dlja nastrojki biometricheskih sistem raspoznavanija / B. B. Starovojtov, Nikodimov D. Ju. // Obrabotka informacii i upravlenie v chrezvychajnyh i jekstremal'nyh situacijah: materialy 4-j mezhdunarodnoj konferencii. – Minsk, 2004. – S. 204–209.

2. **Yanushkevich S. N. Biometric**-Based Decision Support Assistance in Physical Access Control Systems / S. Chague, B. Droit, O. Boulanov, S. N. Yanushkevich, V. P. Shmerko, A. Stoica // Bio-inspired Learning and Intelligent Systems for Security: Proceedings of ECSIS Symposium, Aug. 4–6, 2008, Edinburgh, UK. – Edinburg, 2008. – P. 11–16.

3. **Gonsales R.** Cifrovaja obrabotka izobrazhenij / R. Gonsales, R. Vuds. – Moskva: Tehnosfera. – 2005. – 1072 s.

4. **Hajkin S.** Nejronnye seti: polnyj kurs / S. Hajkin. – Moskva: Vil'jams. – 2006. – 1104 s.

Поступила	*После доработки*	*Принята к печати*
10.10.2016	*23.11.2016*	*28.11.2016*

Samal D. I., Frolov I. I.

ALGORITHM OF PREPARATION OF THE TRAINING SAMPLE USING 3D-FACE MODELING

The algorithm of preparation and sampling for training of the multiclass qualifier of support vector machines (SVM) is provided. The described approach based on the modeling of possible changes of the face features of recognized person. Additional features like perspectives of shooting, conditions of lighting, tilt angles were introduced to get improved identification results. These synthetic generated changes have some impact on the classifier learning expanding the range of possible variations of the initial image. The classifier learned with such extended example is ready to recognize unknown objects better. The age, emotional looks, turns of the head, various conditions of lighting, noise, and also some combinations of the listed parameters are chosen as the key considered parameters for modeling. The third-party software 'FaceGen' allowing to model up to 150 parameters and available in a demoversion for free downloading is used for 3D-modeling.

The SVM classifier was chosen to test the impact of the introduced modifications of training sample. The preparation and preliminary processing of images contains the following constituents like detection and localization of area of the person on the image, assessment of an angle of rotation and an inclination, extension of the range of brightness of pixels and an equalization of the histogram to smooth the brightness and contrast characteristics of the processed images, scaling of the localized and processed area of the person, creation of a vector of features of the scaled and processed image of the person by a Principal component analysis (algorithm NIPALS), training of the multiclass SVM-classifier.

The provided algorithm of expansion of the training selection is oriented to be used in practice and allows to expand using 3D-models the processed range of 2D – photographs of persons that positively affects results of identification in system of face recognition. This approach allows to compensate in a certain measure a lack of initial images for identification improvement of quality.

Самаль Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент. Заведующий кафедрой ЭВМ *учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»*.

Сфера научных интересов: машинное обучение, обработка и анализ изображений, системы технического, распознавание образов, зрения, робототехника, параллельные вычисления, анализ данных.

E-mail: samal@bsuir.by, dmitry_samal@mail.ru,

Фролов Игорь Иванович, кандидат технических наук. Доцент кафедры ЭВМ учреждения образования *«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»*, г. Минск, Беларусь. Сфера научных интересов: машинное обучение, обработка изображений, распознавание образов, системы технического зрения.

E-mail: frolov@bsuir.by

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

MANAGEMEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

УДК 004.94

*Н. Н. ГУРСКИЙ, В. А. СКАЧЕК, А. В. СКАЧЕК, Ю. А. СКУДНЯКОВ**

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА НАПЛАВЛЕНИЯ ПЛАСТМАСС В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Белорусский национальный технический университет
**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

В статье рассматриваются: модель работы двухзвенного механизма; обобщенная схема имитационной модели мехатронной системы 3D-принтера с позиционированием звеньев электроприводами постоянного тока; математическая модель электропривода одного звена принтера в виде системы дифференциальных уравнений; имитационная модель 3D-принтера, реализованная в среде Matlab-Simulink с помощью блоков стандартной библиотеки и библиотеки SimMechanics; виртуальная (анимационная) модель 3D-принтера на базе библиотеки Simulink 3D-Animation, поддерживающая визуализацию движений основных узлов проектируемого механизма.

Представлены исходные данные и результаты моделирования работы 3D-принтера типа Scara в виде временных диаграмм позиционирования исполнительного элемента (экструдера) при изготовлении тестовой детали методом наплавления пластмассы.

Ключевые слова: *имитационная модель, мехатронная система, 3D-принтер, электропривод, математическая модель, аддитивный процесс, виртуальная модель, позиционирование, экструдер.*

Введение

При выполнении операций аддитивного производства используются управляемые электромеханические устройства (3D-принтеры). Существуют различные схемы построения таких устройств. Во многих случаях эффективными являются устройства, основу которых составляют двухзвенные механизмы.

В настоящей работе рассматривается математическая модель 3D-принтера в виде дифференциальных уравнений, описывающих механические движения звеньев, электрический привод с помощью двигателей постоянного тока, а также приводится компьютерная модель, построенная в среде Matlab-Simulink с помощью блоков стандартной библиотеки и библиотек SimMechanics, Simulink 3D-Animation. Представлены результаты моделирования работы 3D-принтера типа Scara.

Модель работы двухзвенного механизма

Геометрия двухзвенного механизма, являющегося основой построения Scara-принтеров, и обозначение основных параметров, обеспечивающих заданное положение, приведена на рис. 1.

Для связи параметров используются математические соотношения (1).

$$\left.\begin{aligned} x_A &= a_1 \cos\varphi_1, \\ y_A &= a_1 \sin\varphi_1, \\ x_B &= x_A + \sqrt{a_2^2 - (y_A - y_B)^2}, \\ \varphi_2 &= -\varphi_1 - \arccos\left(\frac{x_B}{a_2}\right). \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Приведенные уравнения позволяют решать прямую и обратную задачи для данного меха-

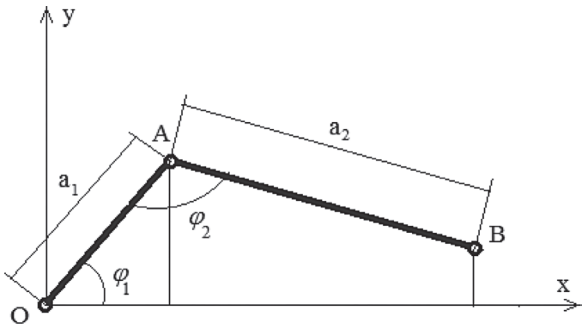


Рис. 1. Схема двухзвенного механизма

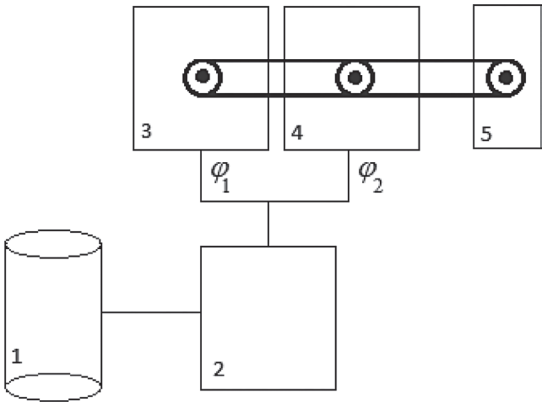


Рис. 2. Обобщенная схема работы разомкнутого механизма

низма, производящего необходимые операции с объектом манипулирования. Как видно, для решения обратной задачи требуется решение нелинейного уравнения. Оно может быть выполнено одним из численных методом, например, методом деления отрезка пополам.

Обобщенная схема имитационной модели 3D-принтера

Обобщенная схема имитационной модели 3D-принтера показана на рис. 2 в виде связей отдельных блоков. Назначение блоков: блок *1* – цифровая модель изготавливаемого объекта; блок *2* – решатель обратной задачи; блоки *3*, *4* – соответственно звено *1* и звено *2* двухзвенного механизма; блок *5* – исполнительный узел (экструдер) наплавления пластмассы.

В качестве исполнительных механизмов позиционирования звеньев используются электроприводы с двигателями постоянного тока [1]. Схема управления двигателем в контексте одного звена приведена на рис. 3. Принятые здесь обозначения соответствуют переменным, используемым для описания математической модели (2) электропривода одного звена.

Математическая модель электропривода звена принтера

Система уравнений движения электромеханической системы [2–5] одного звена с электрическим приводом постоянного тока с учетом диссипации энергии в подшипниках привода, в том числе типа сухого трения, а также нелинейных упруго-диссипативных свойств соединительной муфты с редуктором, имеют вид:

$$\begin{cases} T_c\dot{E}_c + E_c - k_c u = 0, \\ T_r\dot{I}_r + I_r - k_r E_c + k_e k_r \dot{\theta}_1 = 0, \\ J_1\ddot{\theta}_1 + (B_1\dot{\theta}_1 + \bar{M}_{31}\operatorname{sgn}\dot{\theta}_1) + M_L = M_e, \\ J_2\ddot{\theta}_2 + (B_2\dot{\theta}_2 + \bar{M}_{32}\operatorname{sgn}\dot{\theta}_2) - M_L = M_c, \\ T_s\dot{U}_s + U_s - k_s\theta_1 = 0, \\ M_e = k_e I_r, \\ M_L = c_{tr}(\theta_1 - i\theta_2) + k_{tr}(\dot{\theta}_1 - i\dot{\theta}_2), \end{cases} \quad (2)$$

$$t \ge t_0: \quad E_c(t_0) = E_{c0},\ I_r(t_0) = I_{r0},$$
$$\theta_1(t_0) = \theta_{01},\ \dot{\theta}_1(t_0) = \dot{\theta}_{01},$$
$$\theta_2(t_0) = \theta_{02},\ \dot{\theta}_2(t_0) = \dot{\theta}_{02},$$
$$U_s(t_0) = U_{s0},$$

где $k_r = 1/R_r$, $T_r = L_r/R_r$, $L_r = L'_r + L_m$, kc – коэффициент усиления усилителя-преобразователя; T_c – постоянная времени усилителя-преобразователя, c; коэффициент усиления двигателя; T_r – постоянная времени двигателя, с; k_e – паспортный параметр двигателя, характеризующий его способность преобразовывать ток ротора в крутящий момент; R_r – сопротивление ротора двигателя, Ом; L'_r – индуктивность ротора, Гн; L_m – взаимная индукция, Гн; M_L – нагрузочный момент двигателя, Нм; M_c – нагрузочный момент редуктора, Нм; J_1 – момент инерции ротора электродвигателя

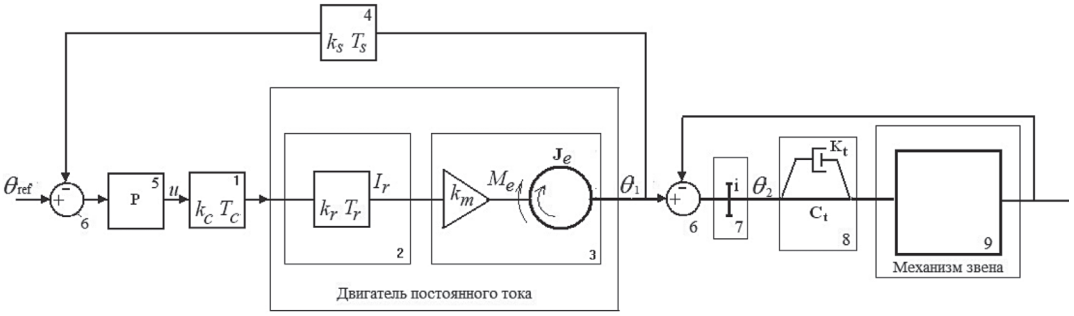


Рис. 3. Структурная схема электропривода звена принтера

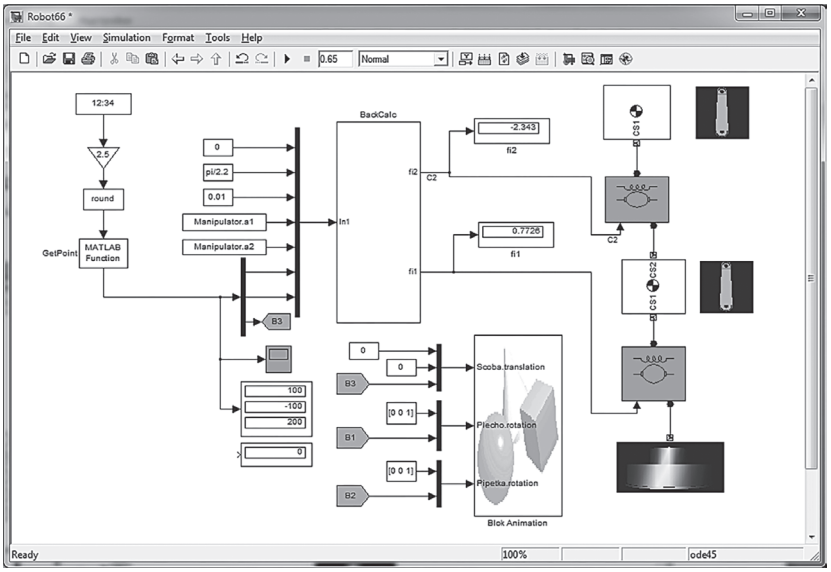


Рис. 4. Имитационная модель 3D-принтера

с присоединенными массами, кг·м^2; J_2 – момент инерции редуктора и механизма звена, кг·м^2; $\theta_1, \dot{\theta}_1, \ddot{\theta}_1$ – угол, скорость, ускорение поворота двигателя; $\theta_2, \dot{\theta}_2, \ddot{\theta}_2$ – угол, скорость, ускорение поворота редуктора; k_s – коэффициент усиления датчика; T_s – постоянная времени датчика, с; M_e – крутящий момент двигателя, Нм; c_{tr} – угловая жесткость упругой муфты, соединяющей электродвигатель и редуктор Нм рад/с; k_{tr} – коэффициент диссипации энергии в соединительной муфте Нм рад/с; i – передаточное отношение редуктора; B_1 – коэффициент диссипации энергии в опорах двигателя Нм рад/с; B_2 – коэффициент диссипации энергии в опорах редуктора Нм рад/с; $\bar{M}_{31}$ – сухое трение в опорах двигателя в статическом положении Нм рад/с; $\bar{M}_{32}$ – сухое трение в опорах редуктора в статическом положении Нм рад/с; I_r – ток ротора электродвигателя, A; E_c – напряжение на выходе тиристорного преобразователя, B; U_s – выходной сигнал датчика; u – выходной сигнал регулятора.

В качестве регулятора используется PID-регулятор (блок 5), значение выходной величины которого, описывается выражением:

$$u(t) = k_p \Delta(t) + k_i \int_0^{t_k} \Delta(t)dt + k_d \frac{d\Delta(t)}{dt},$$

где k_p, k_i, k_d – соответственно коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора; t_k – время наблюдения за системой; $\Delta(t) = \theta_{ref}(t) - \theta_1(t)$ – разность между желаемыми и наблюдаемыми значениями управляемой переменной.

Имитационная модель 3D-принтера

Имитационная модель 3D-принтера и его программная реализация (см. рис. 4) выполнена в среде Matlab-Simulink с помощью блоков стандартной библиотеки и библиотек SimMechanics, Simulink 3D-Animation в соответствии с обобщенной схемой, показанной на рис. 2. Как видно, покоординатное считывание точек цифровой модели изготавливаемой детали поддерживается функцией GetPoint через заданные временные интервалы. Для контроля координаты выводятся на экран, а далее поступают в блок BackCalc (решатель обратной задачи), в котором по формулам (1) вычисляются желаемые значения углов поворотов двигателей звеньев, доставляющих позиционирование экструдера в заданную точку.

Позиционирование обеспечивают условные блоки двухзвенного механизма, представленные в правой части рис. 4. Развернутая Simulink модель каждого звена имеет вид, показанный на рис. 5. На рис. 4 приведен также блок BlokAnimation, позволяющий визуализировать движения основных узлов модели 3D-принтера с помощью библиотеки Simulink 3D-Animation.

Simulink-модель управления одним звеном реализована по структурной схеме электропривода, показанной на рис. 3. Функциональность модели поддерживается с помощью элементов библиотеки SimMechanics.

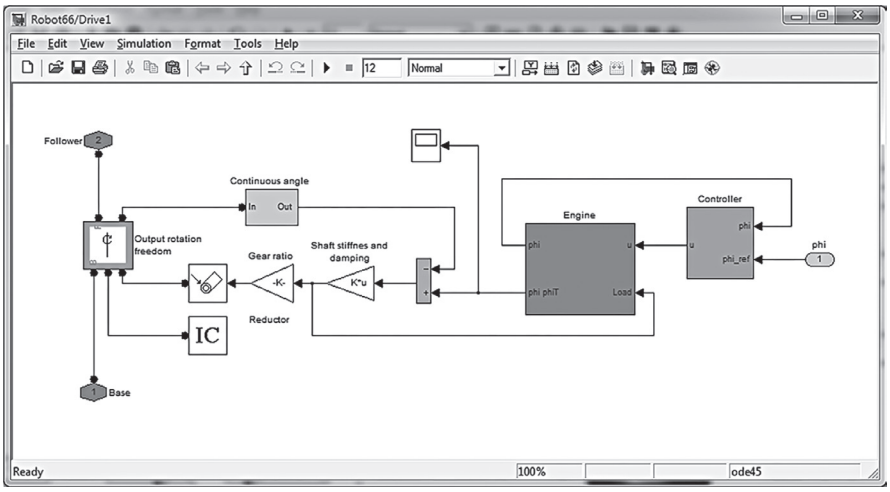


Рис. 5. Simulink-модель управления одним звеном

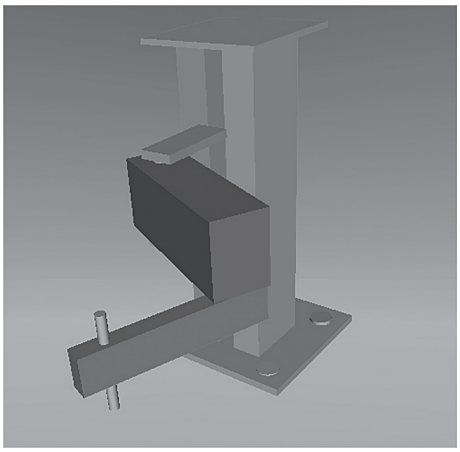


Рис. 6. Анимационная модель 3D-принтера

Блок электрического двигателя Engine включает систему уравнений (2). Simulink модель данного блока приведена в работе [2].

Анимационная модель 3D-принтера

Чтобы упростить процесс исследования влияния отдельных параметров на динамическое состояние проектируемой мехатронной системы, была разработана ее виртуальная модель (см. рис. 6) с использованием языка моделирования виртуальной реальности VRML (Virtual Reality Modeling Language).

Связь имитационной и виртуальной моделей (см. рис. 4), а также оживление виртуальной модели реализуется с помощью блоков библиотеки Simulink 3D-Animation.

Исходные данные и результаты моделирования

Параметры, принятые в расчетах, приведены в таблице.

Исходные значения принятых параметров

Обозначение	Значение	Ед. измерения	Обозначение	Значение	Ед. измерения
k_c	1		B_1	0.1	Нм рад/с
T_c	0.003	с	B_2	0.1	Нм рад/с
R_r	0.3	Ом	$\bar{M}_{31}$	0.01	Нм рад/с
L'_r	0.000237	Гн	$\bar{M}_{32}$	0.01	Нм рад/с
L_m	0.00714	Гн	c_{tr}	43	Нм рад/с
k_m	0.45		k_{tr}	0.05	Нм рад/с
J_e	0.074	кг·м^2	a_1	140	мм
a_2	192	мм			

Модель PID-контроллера, используемая для управления электрическим двигателем, имеет вид:

$$u(t) = 10\Delta(t) + 0.6\int_0^{t_k} \Delta(t)dt + 0.9\frac{d\Delta(t)}{dt}.$$

Ниже на рис. 7 приведена временная диаграмма позиционирования экструдера при наплавлении пластмассы для плоской тестовой детали. Временные процессы, показанные на первых двух графиках, описывают точки исходной детали в плоскости XY. На графиках *3* и *4* представлены графические зависимости требуемых углов поворотов роторов (φ_1, φ_2) электрических двигателей в соответствии с формулами (1) и углов поворотов роторов с учетом нагрузок на звенья и управляющих воздействий регуляторов.

Заключение

Представленная модель 3D-принтера позволяет на ранних этапах проектирования аддитивного производственного процесса оценить работу манипулятора, выбрать требуемые параметры исполнительных устройств и системы управления приводами.

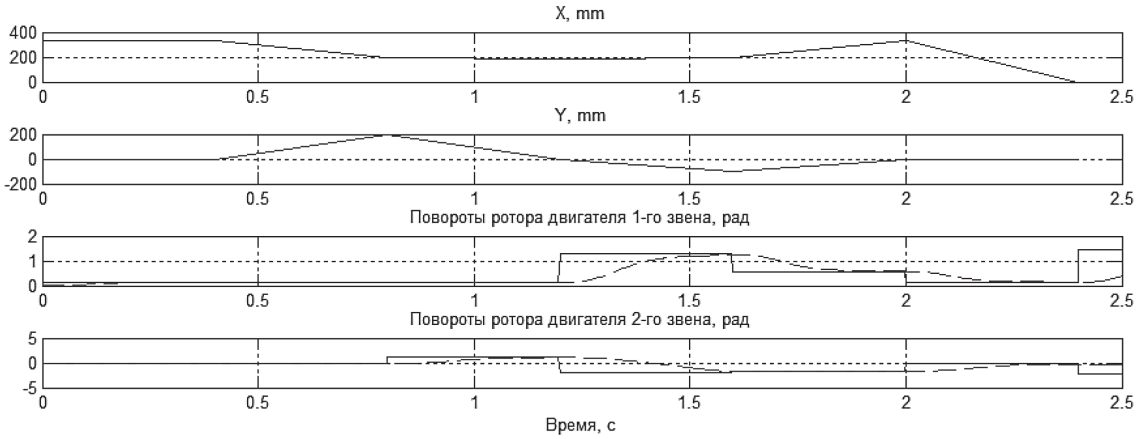


Рис. 7. Временная диаграмма позиционирования 3D-принтера

Приведенные имитационная, математическая и виртуальная модели мехатронной системы 3D-принтера могут быть использованы в учебном процессе.

Литература

1. **Фираго Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Технoперспектива, 2007.

2. **Гурский Н. Н.** Имитационная модель управления движением большегрузной машины с электроприводом постоянного тока / Н. Н. Гурский, М. Нажжарин // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – № 2– С. 27–30.

3. **Гурский Н. Н.** Моделирование процессов управления электромеханической трансмиссией колесного трактора / Н. Н. Гурский, А. В. Пащенко, И. Н. Жуковский // Наука и техника. – 2014. – № 2. – С. 41–45.

4. **Гурский Н. Н.** Simulink-модель движения большегрузной машины с нейро-контроллером в контуре управления / Н. Н. Гурский, М. Нажжарин // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 4 – С. 32–38.

5. **Амельченко П. А.** Особенности разгона сельскохозяйственного машино-тракторного агрегата на электрической тяге / П. А. Амельченко, И. Н. Жуковский, Н. Н. Гурский, А. В. Ключников, А. В. Ващила // Тракторы и сельхозмашины. – Москва. – 2015. – № 8 – С. 23–28.

References

1. **Firago B. I.** Theory of electric / B. I. Firago, L. B. Pavlyachik. – Minsk: Tekhnoperspektiva 2007.

2. **Gursky N. N.** A simulation model of heavy-traffic control machines with electric DC / N. N. Gursky, M. Nazhzharin // System analysis and applied informatics. – 2015. – no. 2- P. 27–30.

3. **Gursky N. N.** Simulation of control processes electromechanical transmission wheel tractor / N. N. Gursky, A. V. Pascenco, I. N. Zhukovsky // Science and Technology. – 2014. – no. 2. – P. 41–45.

4. **Gursky N. N.** The Simulink-model of the motion of heavy machines with neuro-controller in the control circuit / N. N. Gursky, M. Nazhzharin // System analysis and applied informatics. – 2014. – no. 4 – P. 32–38.

5. **Amelchenko P. A.** Features acceleration of agricultural machine-tractor unit on electric traction / P. A. Amelchenko, I. N. Zhukovsky, N. N. Gursky, A. V. Kluchnikov, A. V. Vaschila // Tractors and farm machinery. – Moscow. – 2015. – no. 8. – P. 23–28.

Поступила *28.10.2016*

После доработки *15.11.2016*

Принята к печати *28.11.2016*

N. Hurski, V. Skachek, A. Skachek, Y. Skudnyakov

SIMULATION OF OPEN MECHANISMS FOR THE ADDITIVE PROCESS WELD PLASTICS

This article discusses: model of the two-link mechanism; generalized scheme of mechatronic simulation model of 3D-printer with the positioning units of electric DC; mathematical model of the actuator of the printer unit in the form of a system of differential equations; 3D-printer programming model implemented in the Matlab-Simulink environment using the c standard library blocks and SimMechanics library; virtual (animated) 3D printer model on the basis of the library Simulink 3D Animation, supports the visualization of the movements of the designed mechanism of the basic units. We present the initial data and the results of simulation of 3D-printer type Scara as a waveform positioning actuator (extruder) in the manufacture of test items by fusing plastic.

Keywords: *simulation model, mechatronic system, 3D printer, power, mathematical model, additive process, a virtual model, positioning, extruder.*

Гурский Николай Николаевич – доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, Минск, 220013, Беларусь, пр-т Независимости, 65, тел.: +375 29 697-50-96.

Nicolay Hurski graduated from the Faculty of Radiophysics and Electronics of the Belorussion State University, Belarus, in 1979. He received a PhD in Dynamics and Strength of Machines from the Kaunas University of Technology, Lithuania. He is an Associate Professor at the Belorussian National Technical University, Department of Computer Technology and Automated Systems. His current research interests are in computer-aided modelling of the dynamic processes of mobile machines. E-mail: ngurski@bntu.by.

Скачек Виктор Андреевич – заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, Минск, 220013, Беларусь, ул. Б. Хмельницкого 9.

Тел.: +375 29 681-56-63.

Victor Skachek is the head of a research laboratory at Belarusian National Technical University since 1992. His research interests range from strain-measuring devices and automated process systems to open kinematic chains, industrial robotics, and force sensing systems for industrial robots.

E-mail: nilap@bntu.by

Скачек Алексей Викторович – ведущий инженер научно-исследовательской инновационной лаборатории Белорусского национального технического университета, Минск, 220013, Беларусь, ул. Б. Хмельницкого 9.

Тел.: +375 29 656-24-86

Aleksey Skachek is a lead engineer at a research laboratory of Belarusian National Technical University since 2001. His research interests include software processing of tensometric data, automatic control of complex objects in conditions of strong noise pollution, research results visualization, and creation of dynamic models for transition processes.

E-mail: nilap@bntu.by

Скудняков Юрий Александрович – доцент кафедры промышленной электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, кандидат технических наук, Минск, 220013, Беларусь, ул. П. Бровки, 6. Тел.: +375 29 701-85-06.

Yuri Skudnyakov Research interests: models and algorithms for organization of modern educational process; models and pattern recognition algorithms; models and algorithms of research and designing discrete systems of automatic control; algorithms for solving problems of topological synthesis of electronic computing means.

E-mail: juri_alex@tut.by.

УДК 681.515

А. Г. СТРИЖНЕВ

МЕТОД ПРИДАНИЯ ОДНОКОНТУРНОЙ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ СВОЙСТВ

Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»

Предложен метод придания одноконтурной замкнутой системе автоматического управления требуемых фильтрующих свойств, основанный на применении входного ограничителя скорости и синтезе специальных цифровых регуляторов с использованием эталонных фильтров низкой частоты. На примере астатического объекта управления с двумя апериодическими звеньями и эталонных фильтров в виде апериодического звена третьего порядка и апериодического и колебательного звеньев, осуществлен синтез таких регуляторов. С учетом линейной зоны объекта управления и требуемой полосы пропускания системы определены параметры входного ограничителя скорости. Проведено имитационное моделирование и осуществлен сравнительный анализ предложенного метода с известными решениями. Даны рекомендации по практическому применению полученных результатов.

Введение

Проведенные ранее исследования [1] одноконтурной замкнутой системы автоматического управления (САУ) с цифровым регулятором (ЦР) показывают, что при воздействии высокочастотных сигналов (превышающих полосу пропускания системы) возникают незатухающие колебания и происходит самопроизвольный уход системы из равновесного состояния. Применение входных цифровых формирующих устройств (ЦФУ) [1, 2, 3] позволяет стабилизировать работу САУ при воздействии сигналов любой частоты. Вместе с тем использование ЦФУ приводит к увеличению длительности переходного процесса при отработке ступенчатых воздействий и к возникновению фазового запаздывания при отработке гармонических воздействий. Данные недостатки могут значительно ухудшать работу высокодинамичных систем слежения и стабилизации.

Для решения данной задачи был разработан авторский метод, позволяющий придать САУ требуемые фильтрующие свойства, который в дальнейшем и будет рассмотрен.

Метод придания одноконтурной замкнутой САУ требуемых фильтрующих свойств

Метод базируется на синтезе специального ЦР, который используется совместно с входным ограничителем скорости (ОС). Входной ОС обеспечивает отработку ступенчатых сигналов большой амплитуды, а ЦР формирует требуемую полосу пропускания и показатели качества работы САУ.

Структурная схема САУ, реализующая данный метод, приведена на рис. 1.

Для синтеза специального ЦР предлагается использовать эталонную модель ФНЧ при условии, что $N(s) = F(s)$, где $N(s) = \dfrac{G(s)W(s)}{1 + G(s)W(s)}$ – передаточная функция замкнутой системы, $G(s)$ – передаточная функция объекта управления, $W(s)$ – передаточная функция корректиру-

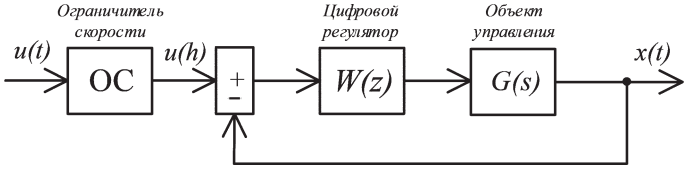


Рис. 1. Структурная схема САУ с ЦР и ОС

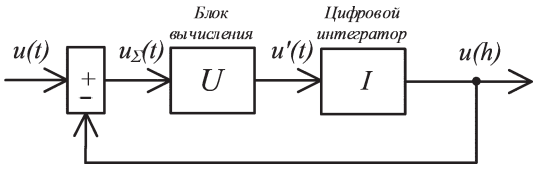


Рис. 2. Структурная схема ОС

ющего устройства, $F(s)$ – передаточная функция эталонного ФНЧ.

С учетом выполнения данного условия получим выражение для определения передаточной функции корректирующего устройства в аналоговом виде, обеспечивающего требуемую полосу пропускания САУ

$$W(s) = \frac{F(s)}{G(s)[1 - F(s)]}, \qquad (1)$$

В качестве эталонного фильтра $F(s)$ можно использовать любые ФНЧ, в том числе и полученные с помощью передаточных функций элементарных звеньев.

Для отработки САУ ступенчатых сигналов большой амплитуды входной ОС должен ограничивать скорость изменения входных сигналов до величины, определяемой выражением: $v_{\text{огр}} = A_{\text{л}} \cdot \omega_{\text{пр}}$, где $A_{\text{л}}$ – амплитуда линейной зоны регулирования; $\omega_{\text{пр}}$ – граничная частота полосы пропускания.

Структурная схема ОС приведена на рис. 2 и содержит блоки: вычитания, U – вычисления, I – цифровой интегратор.

На выходе блока вычитания образуется сигнал $u_{\Sigma}(t) = u(t) - u(h)$. Блок вычисления выполняет операцию согласно выражению

$$u'(t) = \begin{cases} v_{\text{огр}}, & \text{при } u_{\Sigma}(t) \ge v_{\text{огр}}; \\ -v_{\text{огр}}, & \text{при } u_{\Sigma}(t) \le -v_{\text{огр}}. \end{cases}$$

Цифровой интегратор преобразует аналоговый сигнал $u'(t)$ в цифровой $u(h)$ и имеет передаточную функцию

$$u(h) = \frac{h(1 + z^{-1})}{2(1 - z^{-1})},$$

где h – шаг квантования.

Реализацию метода рассмотрим на примере САУ, содержащей объект управления (ОУ) третьего порядка.

Одноконтурная замкнутая САУ и реализация метода

Для исследований был выбран астатический ОУ с двумя апериодическими звеньями, имеющий передаточную функцию вида:

$$G(s) = \frac{\alpha}{s(s + a)(s + b)}, \qquad (2)$$

где $\alpha = k/T_1T_2 = 4971{,}15\ \text{с}^{-3}$, $a = 1/T_1 = 1{,}415\ \text{с}^{-1}$, $b = 1/T_2 = 48{,}54\ \text{с}^{-1}$.

Для сравнительного анализа использован цифровой ПИД-регулятор, который работает совместно с входным ЦФУ [1].

Цифровой ПИД-регулятор имеет передаточную функцию вида [4]

$$W_{\text{ПИД}}(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}, \qquad (3)$$

где $K_0 = 19{,}0$, $b_1 = -1{,}921053$, $b_2 = 0{,}921053$, $h = 0{,}01\ \text{с}$.

Начальная установка коэффициентов цифрового ПИД-регулятора осуществлена с помощью метода Зиглера-Никольса, а окончательная настройка проведена с использованием блока Signal Constraint из расширения Simulink Design Optimization [5] пакета прикладных программ MATLAB, которое содержит инструменты динамической оптимизации параметров проектируемых систем управления [5, 6].

Следует отметить, что САУ с объектом управления $G(s)$ и цифровым ПИД-регулятором $W_{\text{ПИД}}(z)$ при синусоидальном $x = A\sin\omega t$ воздействии амплитудой $A = 50$ делений (дел) обеспечивает граничную частоту полосы пропускания $\omega_{\text{пр}} = 24\ \text{с}^{-1}$.

В качестве входного ЦФУ выбран эллиптический цифровой фильтр низких частот (ФНЧ) [1], расчет которого осуществлен с использованием функции ellip с параметрами (N = 4; R_p = 0,1 дБ; R_p = 48 дБ; $F_{pn} = 0{,}01368\ \text{с}^{-1}$; $F_p = 3{,}82\ \text{с}^{-1}$; h = 0,002 с) и получена передаточная функция фильтра:

$$F(z) = K_0 \frac{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3} + c_4 z^{-4}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-4}}, \qquad (4)$$

где $K_0 = 0{,}0039196$, $c_1 = -3{,}9761558$, $c_2 = 5{,}9523864$, c_3 = –3,9761558, c_4 = 1, d_1 = –3,9566343, d_2 = 5,8714188, d_3 = –3,8729063, d_4 = 0,9581221, h = 0,002 с.

Согласно рекомендациям [7] порядок эталонного фильтра должен быть выше или соответствовать передаточной функции ОУ. С учетом, что ОУ имеет третий порядок, рассмотрим две модели эталонных ФНЧ, используемых для реализации метода: ФНЧ 1 в виде апериодического звена третьего порядка и ФНЧ 2 в виде

апериодического и колебательного звеньев. Коэффициент передачи элементарных звеньев ФНЧ на граничной частоте полосы пропускания САУ нужно выбирать из условия $N \ge \sqrt[n]{1/\sqrt{2}}$, где n – количество элементарных звеньев.

Эталонная модель ФНЧ 1, содержащая апериодическое звено третьего порядка, имеет передаточную функцию:

$$F_1(s) = \frac{1}{(T_3 s + 1)^3}. \qquad (5)$$

Апериодическое звено [8] на частоте сопряжения $\omega = 1/T_3$ имеет фазовый сдвиг –45°. Используя амплитудную характеристику апериодического звена, получим выражение для определения постоянной времени

$$T_3 = \frac{1}{\omega_{\text{пр}}}\sqrt{\frac{1}{N_1^2} - 1},$$

где $\omega_{\text{пр}}$ – граничная частота полосы пропускания САУ. С учетом обеспечения параметров ($\omega_{\text{пр}} = 24$ с$^{-1}$, $N_1 = \sqrt[3]{1/\sqrt{2}} = 0{,}890899$), находим $T_3 \approx 0{,}021243$ с.

Используя эталонную модель (5) и выражение (1), получим передаточную функцию корректирующего устройства в аналоговом виде:

$$W_1(s) = C_0 \frac{s^2 + c_1 s + c_2}{s^2 + d_1 s + d_2},$$

где C_0 = 20,985372 с$^{-1}$, c_1 = 49,955 с$^{-1}$, c_2 = 68,6841 с$^{-1}$, d_1 = 141,225277 с$^{-1}$, d_2 = 6648,192983 с$^{-1}$.

Применяя билинейную аппроксимацию (преобразование Тастина)

$$s \approx \frac{2}{h} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}},$$

где h – шаг квантования, получим передаточную функцию ЦР 1:

$$W_1(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}. \qquad (6)$$

где K_0 = 10,273647, b_1 = –1,318534, b_2 = 0,336771, a_1 = –0,217857, a_2 = 0,082080, h = 0,02 с.

Эталонная модель ФНЧ 2, содержащая апериодическое и колебательное звенья, имеет передаточную функцию:

$$F_2(s) = \frac{1}{(T_4 s + 1)(T_5^2 s^2 + 2\xi T_5 s + 1)}. \qquad (7)$$

С учетом обеспечения параметров ($\omega_{\text{пр}}$ = 24 с$^{-1}$, $N_2 = \sqrt{1/\sqrt{2}} = 0{,}840896$), для апериодического звена находим $T_4 \approx 0{,}026817$ с.

Колебательное звено [8] на частоте сопряжения $\omega = 1/T_4$ имеет фазовый сдвиг –90° и отклонения асимптотической логарифмической амплитудно частотной характеристики ЛАЧХ не превышают 3 дБ, если значение коэффициента относительного затухания ξ находится в пределах $0{,}38 \le \xi < 0{,}7$. Используя амплитудную характеристику колебательного звена, получим выражение для определения постоянной времени

$$T_5 = \frac{1}{\omega_{\text{гр}}}\sqrt{1 - 2\xi^2 + \sqrt{4\xi^2(\xi^2 - 1) + \frac{1}{N_2^2}}}.$$

С учетом обеспечения параметров ($\omega_{\text{пр}}$ = 24 с$^{-1}$, $N_2 = \sqrt{1/\sqrt{2}} = 0{,}840896$, $\xi = 0{,}7$) находим $T_5 \approx$ 0,033950 с.

Используя эталонную модель (7) и выражение (1), получим передаточную функцию корректирующего устройства в аналоговом виде:

$$W_2(s) = C_0 \frac{s^2 + c_1 s + c_2}{s^2 + d_1 s + d_2},$$

где C_0 = 6,508147 с$^{-1}$, c_1 = 49,955 с$^{-1}$, c_2 = 68,6841 с$^{-1}$, d_1 = 78,527409 с$^{-1}$, d_2 = 2405,337691 с$^{-1}$.

Применяя преобразование Тастина, получим передаточную функцию ЦР 2:

$$W_2(z) = K_0 \frac{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}. \qquad (8)$$

где K_0 = 4,839547, b_1 = –1,318534 , b_2 = 0,336771, a_1 = –0,749710, a_2 = 0,224730, h = 0,02 с.

Цифровые регуляторы ЦР 1 и ЦР 2 обеспечивают хорошую работу САУ в линейной зоне регулирования, а при отработке ступенчатых сигналов большой амплитуды увеличивают длительность переходного процесса. В связи с этим возникает необходимость применения входного ограничителя скорости ОС, параметры которого должны быть согласованы с параметрами системы. Для системы (рис. 1) обеспечивающей параметры (A = 50 дел, $\omega_{\text{пр}}$ = 24 с$^{-1}$), целесообразно выбрать уровень ограничения скорости $v_{\text{огр}} = A\omega_{\text{пр}} = \pm 1200$ дел/с .

Проверку эффективности работы рассчитанных устройств осуществим с помощью имитационного моделирования.

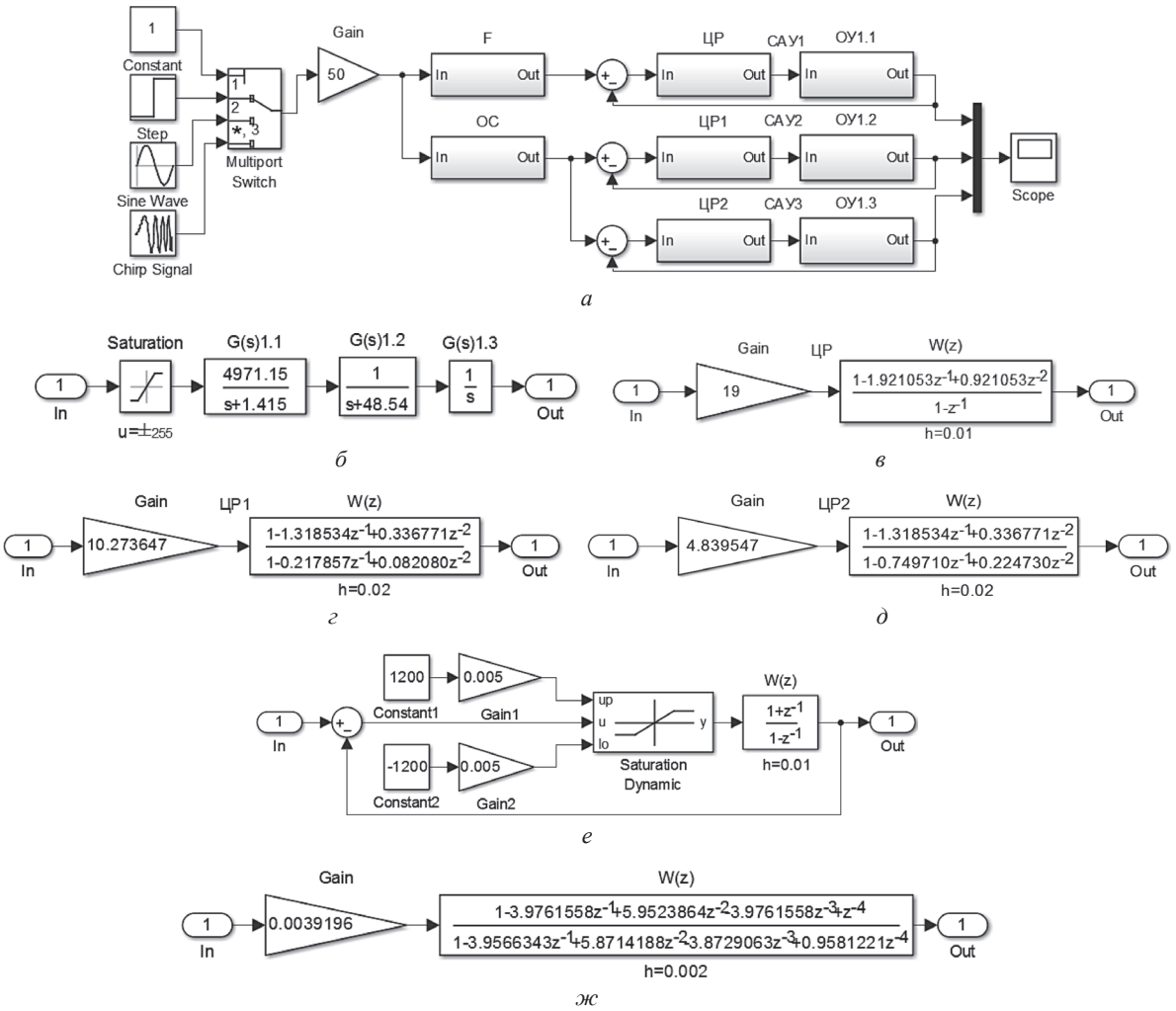


Рис. 3. Схемы моделей: *а* – САУ; *б* – ОУ; *в* – ПИД-регулятора; *г* – ЦР 1; *д* – ЦР 2; *е* – ОС; *ж* – ЦФУ

Схема моделирования работы САУ с входным ОС и различными ЦР

Для проверки работы разработанного метода была составлена схема моделирования в среде Simulink пакета программ MATLAB [9–11], которая представлена на рис. 3.

Схема (рис. 3, *а*) состоит из трех САУ 1–3, выполненных по типовой схеме (рис. 1) и содержащих один и тот же ОУ. Схема ОУ (рис. 3, *б*) представлена блоками *Transfer Fcn*, реализующими выражение (*2*) и блоком *Saturation* с параметрами $u = \pm 255$ дел для реализации нелинейности типа «насыщение». САУ 1 содержит цифровой ПИД-регулятор и ЦФУ на основе эллиптического ФНЧ. Схема ПИД-регулятора реализована (рис. 3, *в*) с помощью блоков *Gain* и *Discrete Filter* с параметрами из выражения (*3*). САУ 2 содержит ЦР 1, а САУ 3 – ЦР 2. Схемы регуляторов ЦР 1 и ЦР 2 реализованы (рис. 3, *г*, *д*) с помощью блоков *Gain* и *Discrete Filter* с параметрами из выражений (*6*, *8*). Схема входного ОС содержит сумматор *Sum*, два источника постоянного сигнала *Constant 1, 2*, два усилителя *Gain 1, 2*, блок динамического ограничения *Saturation Dynamic*, дискретный интегратор *Discrete Filter*. Блоки *Constant 1, 2* имитируют ввод ограничения скорости, усилители *Gain 1, 2* имеют коэффициент передачи $k = h/2 = 0{,}005$, интегратор *Discrete Filter* имеет шаг квантования $h = 0{,}01$ с. Схема эллиптического ФНЧ реализована (рис. 3, *ж*) с помощью блоков *Gain* и *Discrete Filter* с параметрами из выражения (*4*). В качестве источников входных воздействий используются генератор ступенчатого сигнала *Step*, генератор синусоидального сигнала *Sine Wave* и генератор синусоидального сигнала линейно-изменяющейся частоты *Chirp Signal*. Амплитуда входных воздействий устанавливается усилителем *Gain*.

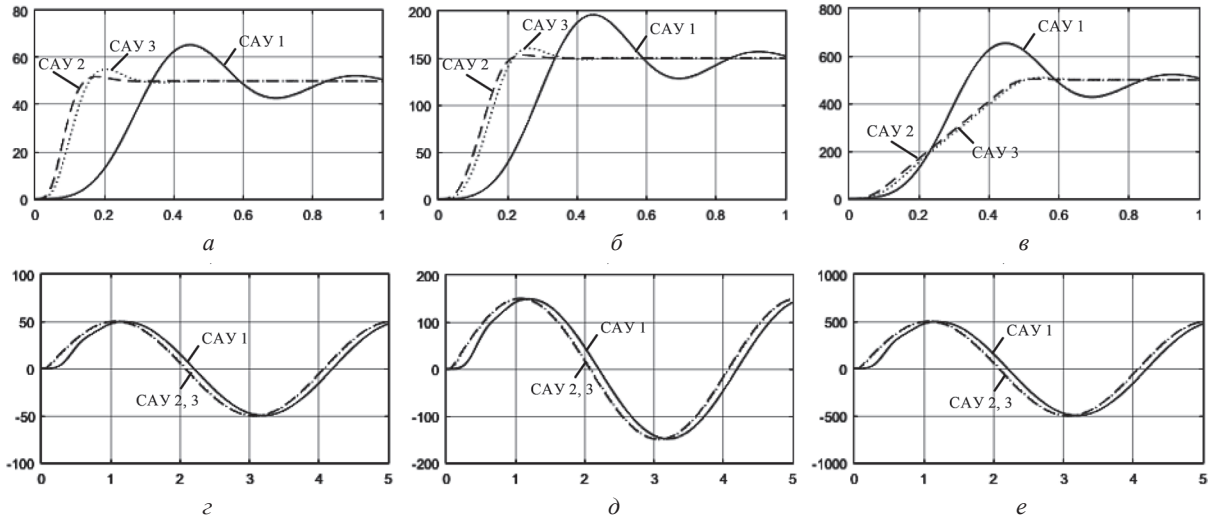


Рис. 4. Результаты отработки САУ ступенчатых и синусоидальных воздействий различной амплитуды: *а, г* – A = 50 дел; *б, д* – A = 150 дел; *в, е* – A = 500 дел

Результаты работы различных САУ

Тип САУ	Время регулирования в с, при отработке ступенчатых воздействий различной амплитуды в дел			Максимальная ошибка в дел /запаздывание в с, при отработке синусоидальных воздействий различной амплитуды в дел		
Амплитуда	A = 50	A = 150	A = 500	A = 50	A = 150	A = 500
САУ 1	0,8	0,8	0,8	15,34 / 0,199	46,03 / 0,199	153,42 / 0,199
САУ 2	0,130	0,191	0,457	5,40 / 0,070	16,19 / 0,071	53,95 / 0,071
САУ 3	0,255	0,298	0,469	6,24 / 0,081	18,71 / 0,082	62,37 / 0,082

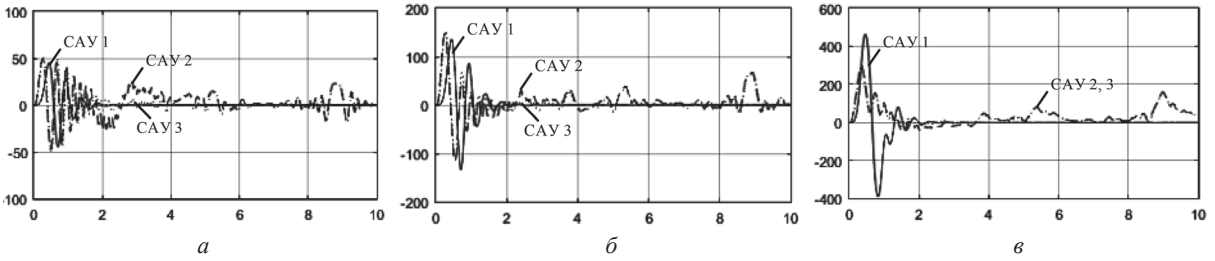


Рис. 5. Результаты отработки САУ синусоидальных воздействий линейно-изменяющейся частоты различной амплитуды: *а* – A = 50 дел; *б* – A = 150 дел; *в* – A = 500 дел

Результаты моделирования работы САУ с ЦР при различных входных воздействиях

Моделирование и оценка качества работы САУ осуществлены при различных воздействиях (ступенчатом $x = A$, синусоидальном $x = A \sin \omega t$ с $\omega = 1{,}57$ с$^{-1}$ и линейно-изменяющейся частоты $\omega = 6{,}28$–239 рад/с) различной амплитуды (A = 50 дел, A = 150 дел, A = 500 дел). Максимальная частота $\omega_{max} = 239$ рад/с ($f_{max} \approx 38$ Гц) была выбрана в 10 раз больше полосы пропускания САУ 1.

Все САУ обеспечивают различные показатели работы, которые приведены на рис. 4 и в таблице.

Вид переходного процесса при отработке ступенчатых $x = A$ воздействий в различных САУ разный. В САУ 1 – длительный и колебательный с перерегулированием (при A = 50 дел) 15,37 дел или 30,74%, в САУ 2 – близко апериодический, а САУ 3 – колебательный с перерегулированием (при A = 50 дел) 4,94 дел или 9,88%. Время регулирования при отработке ступенчатых воздействий зафиксировано на уровне 5% отклонения от задающего воздействия. Отработка синусоидальных воздействий ($x = A \sin \omega t$, $\omega = 1{,}57$ с$^{-1}$) осуществляется с постоянным запаздыванием и максимальной ошибке, которые у САУ 1 значительно большие (2,43–2,8 раза) чем у САУ 2, 3.

При отработке синусоидальных воздействий $x = A \sin \omega t$ линейно-изменяющейся частоты $\omega = 6{,}28$–239 рад/с, наблюдается (рис. 5) устойчивая работа всех САУ. Величина отдель-

ных нескомпенсированных возмущений в САУ 2 и САУ 3, не превышает 25 дел или 50% линейной зоны регулирования.

Анализируя полученные результаты (рис. 5) можно отметить, что реализация метода позволяет стабилизировать работу САУ при воздействии частот, превышающих полосу пропускания системы. При этом обеспечивается малое фазовое запаздывание и время переходного процесса в сравнении с использованием ЦФУ на основе ФНЧ.

Заключение

Рассмотрен авторский метод придания одноконтурной замкнутой САУ требуемых фильтрующих свойств, который основан на синтезе специального ЦР с входным ОС, обеспечивающего требуемую полосу пропускания системы. В основу синтеза ЦР положено использование эталонных моделей ФНЧ (полученных с помощью передаточных функций элементарных звеньев), параметры которых согласованы с требуемой полосой пропускания САУ. На примере САУ, содержащей ОУ третьего порядка, с использованием эталонных ФНЧ 1 в виде апериодического звена третьего порядка и ФНЧ 2 в виде апериодического и колебательного звеньев осуществлен синтез ЦР 1, ЦР 2 и определены параметры входного ОС.

Для оценки работы рассчитанных устройств проведено имитационное моделирование. Осуществлена оценка качества работы САУ при различных входных воздействиях: ступенчатом и синусоидальном фиксированной частоты и различной амплитуды. В результате сравнительного анализа установлено, что применение предложенного метода обеспечивает уменьшение фазового запаздывания и времени переходного процесса в 2,43–2,8 раза в сравнении с ЦФУ на основе ФНЧ.

Таким образом, применение предложенного метода обеспечивает требуемую полосу пропускания и устойчивую работу системы при воздействии высокочастотных сигналов, не ухудшая при этом отработку детерминированных (ступенчатых и синусоидальных) сигналов.

Литература

1. **Стрижнев А. Г.** Влияние частот входных гармонических сигналов на динамические свойства систем автоматического управления / А. Г. Стрижнев // Информатика. – 2016. – № 2(50). – С. 104–112.

2. **Ловлин С. Ю.** Программируемый формирователь траектории движения следящего привода / С. Ю. Ловлин, М. Х. Цветкова, И. Н. Жданов // Науч.-техн. вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та информац. технологий, механики и оптики. – 2011. – № 2(72). – С. 113–117.

3. **Kim D. N.** On Algorithms for Planning S-curve Motion Profiles / D. N. Kim, N. Teck-Chew, C. I-Ming // Intern. J. of Advanced Robotic Systems. – 2008. – Vol. 5, no. 1. – P. 99–106.

4. **Гостев В. И.** Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами: Справочник / В. И. Гостев, В. К. Стеклов. – К.: Радіоаматор, 1998. – 704 с.

5. **Simulink** Design Optimization: Getting Started Guide [Electronic resource] / Mathworks. – Natick, 2015. – Mode of access: http:// cn. mathworks. com/help/pdf_doc/sldo/sldo_gs. pdf. – Date of access: 24.07.2015.

6. **Стрижнев А. Г.** Применение цифровых регуляторов в канале регулирования потокосцепления ротора в системе векторного управления / А. Г. Стрижнев, Г. В. Ледник // Информатика. – 2011. – № 2(30). – С. 124–133.

7. **Шихов А. А.** Синтез цифровых регуляторов, обеспечивающих желаемый переходной процесс замкнутой системы автоматического управления / А. А. Шихов // Новости науки и технологий. – 2015. – № 3(34). – С. 45–52.

8. **Зайцев Г. Ф.** Теория автоматического управления и регулирования / Г. Ф. Зайцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк., 1989. – 431 с.

9. **Терехин В. В.** Основы моделирования в MATLAB. Simulink: учеб. пособие в 2 ч. Ч. 2 / В. В. Терехин. – Новокузнецк: Кузбассвузиздат, 2004. – 376 с.

10. **Tewari A.** Modern control design with MATLAB and Simulink / A. Tewari. – Weinheim: Wiley, 2002. – 503 p.

11. **Nuruzzaman M.** Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists / M. Nuruzzaman. – Bloomington: Author House, 2005. – 240 p.

References

1. **Stryzhniou A. G.** Influence of Input Harmonic Signal's Frequencies on Control Systems Dynamics / A. G. Stryzhniou // Informatics. – 2016. – no. 2(50). – P. 104–112.

2. **Lovlin S. Y.** Programmed servo drive trajectory shaper / S. Y. Lovlin, M. H. Cvetkova, I. N. Zhdanov // Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics. – 2011. – no. 2(72). – P. 113–117.

3. **Kim D. N.** On Algorithms for Planning S-curve Motion Profiles / D. N. Kim, N. Teck-Chew, C. I-Ming // Intern. J. of Advanced Robotic Systems. – 2008. – Vol. 5, no. 1. – P. 99–106.

4. **Gostev V. I.** Automatic Control Systems within Digital Controllers: handbook / V. I. Gostev, V. K. Steklov. – K.: Radioamator, 1998. – 704 p.

5. **Simulink** Design Optimization: Getting Started Guide [Electronic resource] / Mathworks. – Natick, 2015. – Mode of access: http:// cn. mathworks. com/help/pdf_doc/sldo/sldo_gs. pdf. – Date of access: 24.07.2015.

6. **Stryzhniou A. G.** The Usage of Digital Regulators in the Rotor Flux Linkage Actuating Path in a Vector Control System / A. G. Stryzhniou, G. V. Lednik // Informatics. – 2011. – no. 2(30). – P. 124–133.

7. **Shykhau A. A.** Synthesis of Digital Controllers Providing Required Transient Process of the Closed Loop System / A. A. Shykhau // Science and technology news. – 2015. – no. 3(34). – P. 45–52.

8. **Zaycev G. P.** Automatic Control and Regulation Theory / G. P. Zaycev. – 2-nd edition. – K.: Vuscha shkola, 1989. – 431 p.

9. **Terekhin V. V.** Fundamentals of Modeling in MATLAB Simulink: tutorial in 2 p. P. 2 / V. V. Terekhin. – Novokuznetsk: Kuzbassuvizdat, 2004. – 376 p.

10. **Tewari A.** Modern control design with MATLAB and Simulink / A. Tewari. – Weinheim: Wiley, 2002. – 503 p.

11. **Nuruzzaman M.** Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists / M. Nuruzzaman. – Bloomington: Author House, 2005. – 240 p.

Поступила	*После доработки*	*Принята к печати*
10.10.2016	*25.11.2016*	*28.11.2016*

A. STRIZHNEV

THE METHOD OF IMPARTING DESIRED FILTERING PROPERTIES FOR CLOSED-LOOP CONTROL SYSTEM

Scientific Production Limited Liability Company «OKB TSP»

This article presents a method of imparting desired filtering properties for closed-loop control system. The method is based on using of input rate limiter and synthesis of special digital controllers within ideal low-pass filters. Synthesis of the controllers was made using third-order astatic plant and different ideal low-pass filters. Considering the control objects saturation zone and required bandwidth, input rate limiter was calculated. The digital modeling and comparative analysis are applied. The author offered practical guidelines for using results of investigation.

Александр Гаврилович Стрижнев, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НПООО «ОКБ ТСП». Специалист в области систем автоматического управления с цифровыми регуляторами; цифровых следящих систем; управления гидроприводом, двигателями переменного и постоянного тока; систем стабилизации и горизонтирования. Опубликовано более 70 работ в научных журналах и трудах конференций. Автор ряда изобретений и патентов. Подготовил 1 кандидата наук.

Тел.: + 375 (029) 276-70-07. E-mail: strizhnev.ag@gmail.com

Stryzhnev Aliaksandr Gavrilovich, Cand. Tech. Sci., associate professor, the leading research engineer SPLLC «OKB TSP». The expert in the field of automatic control systems, digital servo systems, hydraulic drives, AC and DC motors control, stabilization and leveling systems. He is author and coauthor more than 70 papers in scientific journals, conference proceedings. He has number of certificates and patents.

Tel.: + 375 (029) 276-70-07. E-mail: strizhnev.ag@gmail.com

УДК 621.43

Р. П. ШАРКОВИЧ

ОПТИМИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА БАЛАНСИРОВКИ LI-ION АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ И ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения» Национальной академии наук Беларуси

В статье рассматривается и обосновывается целесообразность использования предложенной системы балансировки Li-ion батареи, состоящей из множества последовательно-соединенных ячеек, применительно к гибридным и электромобилям. Основной задачей системы, является повышение производительности и времени эксплуатации Li-ion батареи.

Ключевые слова: *аккумуляторная батарея, гибридный автомобиль, несбалансированная аккумуляторная батарея, система балансировки, электромобиль.*

Введение

В настоящее время, важнейшими характеристиками при создании сложных технических объектов становятся их экологичность, экономия энергии и ресурсов. Применительно к автомобилестроению это направление наиболее интенсивно проявляется в разработке и широком распространении гибридных силовых установок (далее ГСУ), практика применения которых на легковых автомобилях показала возможности экономии топлива до 20–30% и значительного снижения токсичности выхлопных газов. Одним из ключевых компонентов этих технологий следует выделить аккумуляторные батареи. В данной статье рассмотрим принципы работы и способы построения схем моделирования устройств балансировки для аккумуляторной батареи.

Устройство аккумуляторной батареи гибридного автомобиля и электромобиля

Аккумуляторная батарея (АБ) гибридного автомобиля и электромобиля состоят из множества последовательно соединенных аккумуляторов, что не позволяет, при массовом производстве, добиться схожести их характеристик – внутренне сопротивление, следовательно, и емкость, будут незначительно, но все же отличаться.

При разбиении АБ на несколько последовательно соединенных аккумуляторов и размещение их в разных отсеках автомобиля (в багажнике, под капотом автомобиля и т. п.), каждая ячейка работает в различных температурных режимах работы, это окажет характерное влияние на их параметры. Для уменьшения разброса параметров, разработчики гибридных и электромобилей изготавливают АБ из аккумуляторов одной производственной партии, а для равномерного распределения температуры на батареях, ищут пути оптимизации конструкции, охлаждения АБ. Однако, данного решения недостаточно, поскольку в процессе эксплуатации возникают проблемы баланса ячеек аккумулятора, что снижает эффективность использования АБ в гибридном автомобиле и электромобиле.

Влияние несбалансированной АБ

Негативное влияние несбалансированной АБ можно рассмотреть на следующем примере: при движении гибридного автомобиля или электромобиля напряжение на одной из ячеек опустится до заданного нижнего уровня, ниже которого может произойти деградация АБ, система обеспечения безопасности автомобиля принудительно разомкнет цепь разряда АБ и гибридный автомобиль или электромобиль

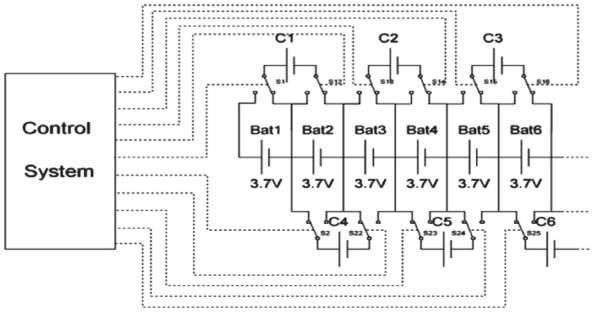


Рис. 1. Структурная схема устройства активной балансировки АБ

не сможет в полной мере функционировать. Напряжение на отдельных ячейках батареи будут выше заданного нижнего допустимого предела, что свидетельствует о наличии неиспользуемого заряда в аккумуляторах. Следовательно, экономия топлива, а так же запас хода будут значительно меньше, чем у гибридного автомобиля и электромобиля со сбалансированной АБ.

Для выравнивания степени заряда и напряжений на отдельных аккумуляторах в АБ используются специальные системы и устройства балансировки. Рассмотрим схему и принцип действия устройства активной балансировки заряда АБ.

Структурная схема этого устройства представлена на рис. 1.

На каждую пару последовательно-соединенных аккумуляторов подключены два коммутационных ключа и конденсатор. Конденсатор переключается между двух аккумуляторов, перенося заряд от аккумуляторов с большим зарядом к аккумуляторам с меньшим зарядом, таким образом, постепенно выравнивая их заряд. При этом происходит управление коммутацией силовых ключей.. Т. к. аккумуляторы B2…Bn-1 делят свой резервный накопитель с двумя соседними аккумуляторами, то заряд может переноситься только от одного конца последовательной цепи до другого. Главным недостатком этой схемы является длительный период времени переноса заряда, в том случае если ячейка АБ с наибольшим зарядом и ячейка с наименьшим находятся с разных сторон последовательной цепи аккумуляторов. В этом случае заряд будет переноситься через каждую последовательно-соединенную ячейку, что приводит к большим затратам времени и эффективности.

Вторым недостатком является наличие большого количества ключей: (n-1)*4, где n – число ячеек батареи.

Но, несмотря на недостатки, схема является достаточно компактной. Для каждой пары АБ система управления, коммутационные ключи и конденсатор могут быть объединены в отдельном модуле напротив аккумуляторов, заряды которых они выравнивают. При добавлении дополнительных батарей в последовательную цепь АБ могут быть добавлены дополнительные резервные накопители, переключаемые парой коммутационных ключей.

Рассмотрим математическую модель устройства активной балансировки в программе MatlabSimulinkSystem. Наглядная схема устройства изображена на рис. 2.

Условия моделирования:

- АБ состоит из 6-ти секций аккумуляторов (Battery1–6);
- Тип аккумулятора Li-Ion;
- Uном= 3,7В;
- Емкость 250Ач.

Установим следующие значения степеней заряда для аккумуляторов (Battery1-Battery6): Battery 1 = 90% Battery 2 = 85% Battery 3 = 75% Battery 4 = 75% Battery 5 = 85% Battery 6 = 70% (АБ разбалансирована на 20%). Заряд должен производиться током 25 А, до тех пора пока напряжение на какой-либо из ячеек не достигнет 4.3 В. Разряд – током 50 А, пока напряжение не опустится до 3,6В, после чего моделирование должно быть приостановлено.

Заряд АБ осуществляется от источника постоянного напряжения Vsource (внутренне сопротивление задается резистором Rint) при открытии ключа SwitchS. Разряд АБ осуществляется при подключении к ней нагрузки Rload, посредством открытия ключа SwitchL. Величины сопротивлений Rint и Rload выбраны так, чтобы заряд АБ от источника Vsource (25В) осуществляется током 25 А, а разряд – током 100 А.

Рассмотрим подсистемы, представленные на схеме (рис. 2):

1. Подсистема SignalDistribution направляет сигналы от аккумуляторов(с информацией о напряжении и степени заряда с мультиплексированных входов In1–4 на осциллограф (мультиплексированные выходы Out5-Out7). На подсистемы Charge/DischargeControl и ControlBalancer она подает сигналы через выходы Out1–4 с информацией о напряжении на аккумуляторах. На выходы Out5 и Out6 подается

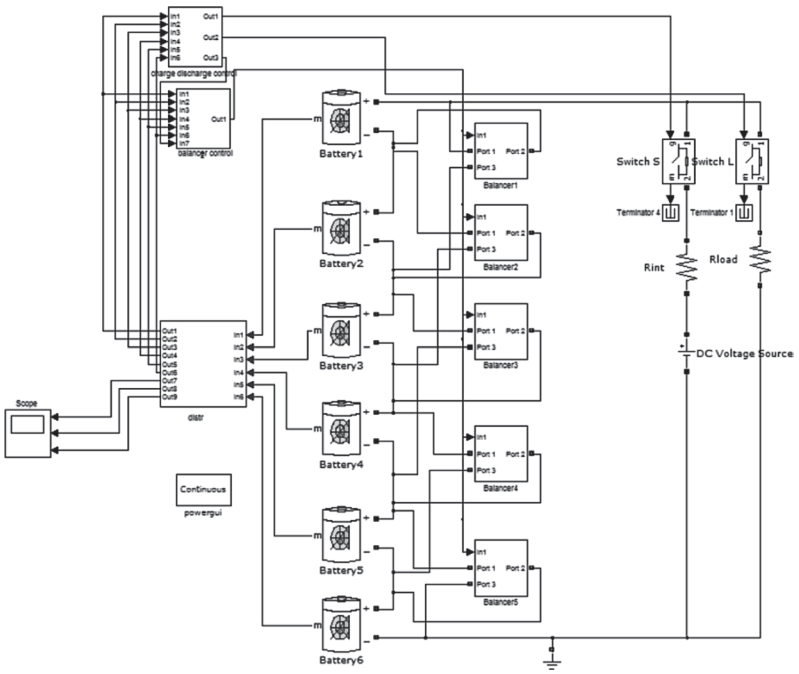


Рис. 2. Математическая модель устройства активной балансировки АБ в среде MatlabSimulink

информация соответственно о степени заряда (SOC,%) и напряжении (V, В). На выход Out7 подается значении разбаланса (максимальная разница между степенями заряда отдельных аккумуляторов)

2. Подсистема Charge/DischargeControl через выходы Out1 и Out2 управляет зарядом и разрядом АБ путем коммутации ключей *S* и *L* (заряд АБ – *S* открыт, *L* закрыт, при разряде – наоборот). При подаче на управляющий вход «g» ключа *S* (или *L*) сигнала лог. «0» – он закрывается, а при подаче сигнала лог. «1» – открывается.

Алгоритм работы этой подсистемы основан на измерении напряжений аккумуляторов Cell1-Cell4 и установлен в соответствии с условиями моделирования. В момент начала моделирования должно соблюдаться условие: на выходах Out1 и Out2 подсистемы должно быть соответственно с выходов Out1 и Out2. Как только (при заряде) напряжение на каком-либо аккумуляторе опустится ниже допустимого уровня 3,6В, подсистема принудительно остановит моделирование.

3. Для балансировки АБ используется 3 одинаковых подсистемы Balancer1-3. Рассмотрим подсистему Balancer1 (рис. 3). В подсистеме Balancer1 конденсатор C1 через порты Port1-Port3 поочередно подключается к аккумуляторам Battery1 и Battery2 (к Battery1 через Port1 и Port2, к Battery2 через Port2 и Port3). За подключение конденсатора к соответствующим портам отвечают ключи Switch1-Switch4, управляемые D-триггером Flip-Flop1, охваченного обратной связью. Частота коммутации ключей задается генератором импульсов PulseGenerator.

4. В подсистеме ControlEqualizer находится логическая схема, которая на основе входных сигналов In1-In4 находит разницу между максимальным и минимальным напряжением на аккумуляторах – DU. Значение DU сравнивается с заданным пределом. Если оно меньше

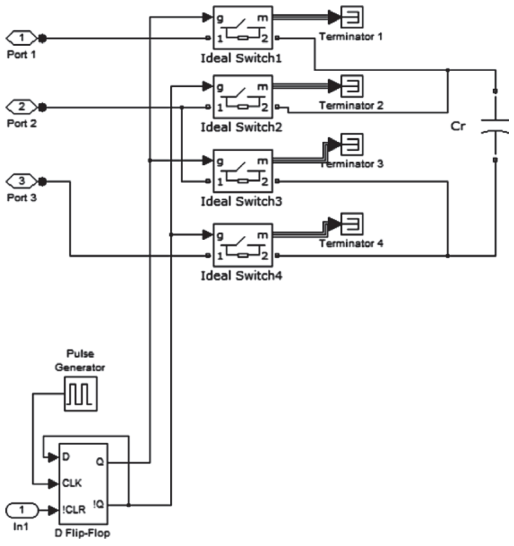


Рис. 3. Блок Balancer в среде Matlab Simulink

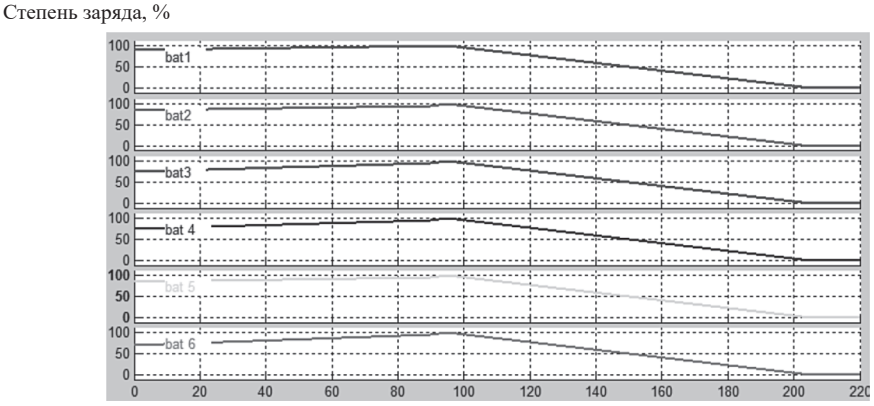


Рис. 4А. Результаты моделирования с устройством балансировки в среде Matlab Simulink

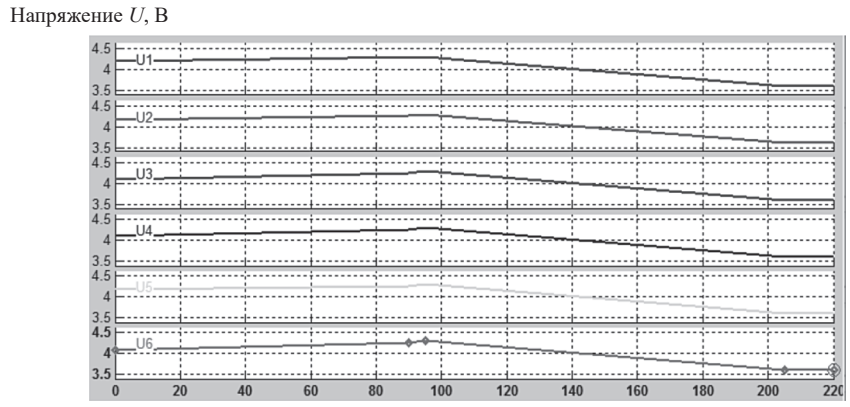


Рис. 4Б. Результаты моделирования с устройством балансировки в среде Matlab Simulink

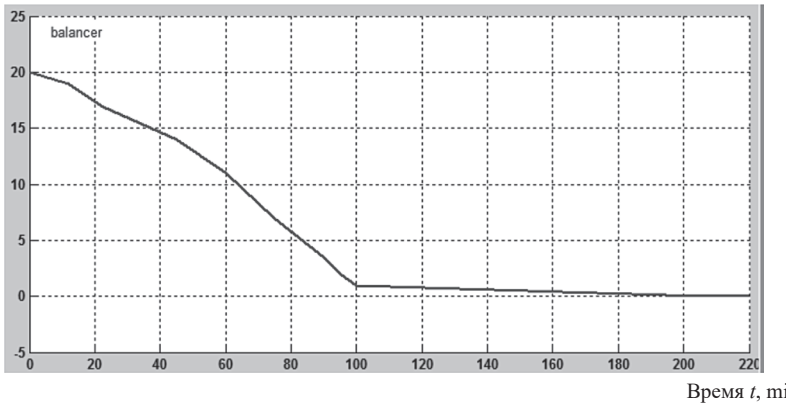


Рис. 4В. Результаты моделирования с устройством балансировки в среде Matlab Simulink

заданного предела (0.1В), то через свой выход подсистема ControlEqualizer выключает подсистема Balancer1-Balancer3. Работа схема осуществляется только по сигналам на вход In5 от подсистемы Charge/ DischargeControl. Эти сигналы подсистемы Charge/DischargeControl посылает в моменты окончания заряда и разряда АБ (из-за нелинейной зависимости напряжения аккумулятора от его степени заряда в такие моменты наблюдается максимальное значение величины DU). Таким образом, эта подсистема принимает решение о включении или выключении подсистем Balancer1-Balancer3 только в моменты достижения максимальных значений DU.

Результаты моделирования

На рис. 4А–4В получены в ходе моделирования характеристики степени заряда, напряжения и величины дисбаланса по степени за-

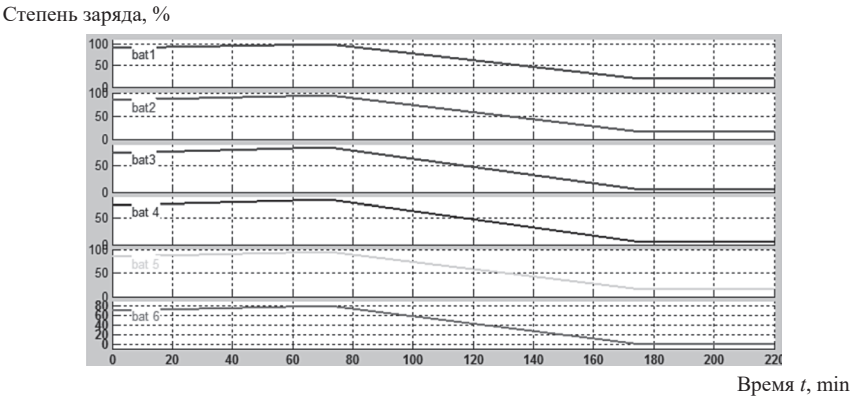


Рис. 5А. Результаты моделирования без устройства балансировки в среде Matlab Simulink

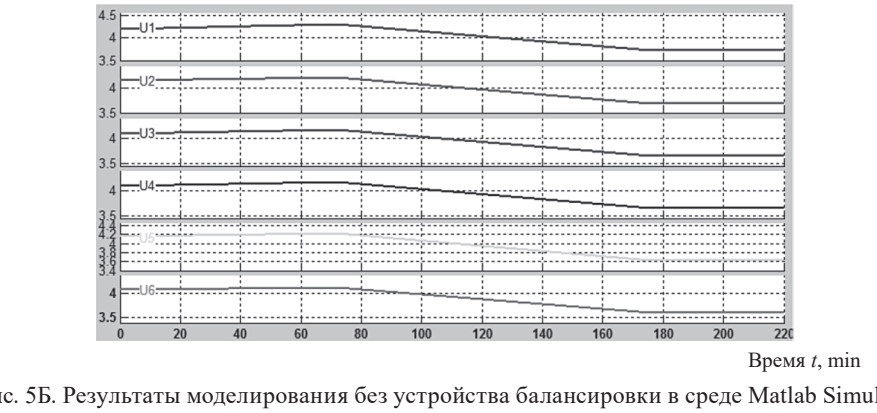


Рис. 5Б. Результаты моделирования без устройства балансировки в среде Matlab Simulink

Рис. 5В. Результаты моделирования без устройства балансировки в среде Matlab Simulink

ряда при работающем устройстве балансировки. Как видно из осциллограммы, время заряда АБ до момента, когда напряжение на одном из аккумуляторов (Cell1) достигло 4,3 В, составило 95мин. За это время величина дисбаланса снизилась с 20% до 1%. Время разряда АБ составило 110 мин.

На рисунках 5А–5В представлены полученные в ходе моделирования характеристики степени заряда, напряжения и величины дисбаланса по степени заряда без работающего устройства балансировки. На осциллограмме видно, время заряда АБ до момента, когда напряжение на одном из аккумуляторов (Cell1) достигло 4,3 В, составило 72 мин. Величина дисбаланса осталась постоянной. Время разряда 104 мин.

Заключение

1. Использование устройств балансировки повышает баланс напряжений и заряда ячеек АБ, что позволяет в полной мере использовать емкость аккумуляторов.

2. Поскольку, время заряда АБ при использовании устройства балансировки значитель-

но возрастает, то активную балансировку следует производить не каждый цикл заряда/разряда, а по мере необходимости.

3. Производить балансировку аккумуляторов эффективнее на конечном этапе заряда/разряда АБ, когда разница между напряжениями на аккумуляторе увеличивается. При средней степени заряда АБ напряжения на разбалансированных аккумуляторах практически одинаковы.

4. Устройство балансировки с коммутируемым конденсатором может использоваться для АБ гибридного автомобиля и электромобиля, так как ячейки АБ за каждый цикл работы проходят полный цикл заряда/разряда. Такие условия значительно повышают эффективность метода.

Литература

1. **Уэн С.** Выравнивание заряда батарей обеспечивает долгое время работы и продлевает срок службы. /***Уэн*** С. – США: Техас Инструментс,2010. **–** ***14с***.

2. **Marozka A. A.** Structure Development and Simulation of Plug-in Hybrid Electric Vehicle /A. A. Marozka, Y. N. Petrenko. – System Analysis and Applied Information Science. 2013, № 1–2, pp. 17–26.

3. **Морозько О. А.** Matlab simulation and user satisfaction assessment of PHEV. /О. А. Морозько, Ю. НПетренко. [Электронныйресурс]. – 2015 – Режимдоступа: http:// rep. bntu. by/handle/data/12043. – Датадоступа: 07.07.2016. – 6. с

4. **Иншаков А. П.** Проблема мониторинга и балансировки аккумуляторных батарей транспортных средств./А. П. Иншаков, Ю. Б. Федотов, С. С. Десяев, Д. В. Байков. – Россия, Саранск: ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н. П. Огарёва»,2016. – 9 с.

5. **Рыкованов А. С.** Активные и пассивные системы баланса Li-ionаккумулятор- ных батарей./ А. С. Рыкованов, С. А. Беляев, – Россия: Силовая электроника, Статья, 2009. – 4 с.

6. **Аносов В. Н.** Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств./ Аносов В. Н., -Новосибирск: Автореферат диссертации., 2008. – 2 с.

7. **Варламов Д. О.** Моделирование устройства балансировки Li – Ion батареи с коммутируемыми конденсаторами для электромобиля./ Варламов Д. О., – Россия, Москва: МГТУ МАМИ, 2008. – 7 с.

8. **Шаркович Р. П.** Анализ векторного управления синхронных двигателей с постоянными магнитами. / Шаркович Р. П., – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2015–8 с.

Refernces

1. **Wen S.** Equation of battery for a long operating work time and extend the battery life. /Wen S. – США: Texas Instruments, 2010. – 14 p.

2. **Marozka O. A.** Structure Development and Simulation of Plug-in Hybrid Electric Vehicle /A. A. Marozka, Y. N. Petrenko. – System Analysis and Applied Information Science. 2013, № 1–2, pp. 17–26.

3. **Marozka O. A.** Matlab simulation and user satisfaction assessment of PHEV./ O. A. Marozka, Ju. N Petrenko. [Jelektronnyjresurs]. – 2015 – Rezhimdostupa: http:// rep. bntu. by/handle/data/12043. – Data dostupa: 07.07.2016. – 6. s

4. **Inshakov A. P.** The problem of monitoring and balancing batteries vehicles. / A. P. Inshakov, U. B. Fedotov, S. S. Desyaev, D. V. Baykov. – Russia, Saransk: MSU, 2016. – 9 p.

5. **Rykovanov A. S.** Active and passive systems balance Li-ion batteries. /A. S. Rykovanov, S. A. Belyaev, – Russia: Power electronics, Article, 2009. – 4 p.

6. **Ansonov V. N.** Methods and means of improving the efficiency of the systems of traction electric drive autonomous vehicles. /AnsonovV. N., – Novosibirsk: Abstract of the thesis.,2008. – 2 p.

7. **Varlamov D. O., Modeling** of balancer Li – Ion battery with switched capacitors for electric vehicle. / Varlamov D. O. – Russia, Moscow: MSTU MAMI, 2008. – 7 p.

8. **Sharkovich R. P.** An analysis of vector control of synchronous motors with permanent magnets. / Sharkovich R. P. – Minsk: UIMNASBelarus, 2015–8 p.

Поступила *08.10.2016*

После доработки *08.11.2016*

Принята к печати *28.11.2016*

Sharkovich R. P.

OPTIMIZATION BALANCING DEVICES LI-ION BATTERIES FOR HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES

The article discusses and proves the feasibility of using the proposed system balancing Li-ion battery consisting of a plurality of series-connected cells, applied to hybrid and electric transportation. The main objective of the system is to increase the performance and operating time of Li-ion batteries.

Keywords: *battery, hybrid car, unbalanced battery balancing system, electric.*

Шаркович Роман Петрович, младший научный сотрудник Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси. В 2015 г. окончил Белорусский национальный технический университет по специальности «Автоматизированный электропривод». С 2015 г – магистрант Международного института дистанционного образования Белорусского национального технического университета по специальности «Распределенная автоматизация на основе промышленных компьютерных сетей».

E-mail: rsharcovich@yahoo.com.

Sharkovich Roman Petrovich, Junior Researcher of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus. In 2015 graduated from the Belarusian National Technical University on a specialty «Automatic Electric.» From 2015 and currently enrolled in the «Belarusian National Technical University» in «Distributed automation based on industry computer networks».

E-mail: rsharcovich@yahoo.com

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING

УДК 629.7

А. А. ЛОБАТЫЙ, Ю. Н. ПЕТРЕНКО, А. С. АБУФАНАС, IMAD ELZEIN

ИМПУЛЬСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Белорусский национальный технический университет

Рассматриваются особенности математического моделирования гибридной электротехнической системы, к классу которых относятся системы, содержащие в своем составе как непрерывные, так и дискретные элементы. Управление гибридными системами является актуальной задачей, обусловленной широким использованием дискретной обработки сигналов в силовой электронике, в промышленных системах, в электрифицированном транспорте (электромобили, троллейбусы, трамваи).

Предлагается решать задачу оптимального управления гибридной системой на основе формирования такого сигнала управления на выходе контроллера (регулятора), который минимизирует заданный интегральный функционал качества, в качестве которого рассматривается линейный квадратичный функционал Летова-Калмана. Метод поиска оптимального управления зависит от вида математической модели системы управления. В данном случае рассматривается линейная детерминированная модель системы управления, характерная для большинства гибридных электротехнических систем.

В качестве примера гибридной системы рассмотрен понижающий импульсный преобразователь постоянного тока, который находит широкое применение в различных электротехнических системах: в качестве источника бесперебойного питания, зарядного устройства для электромобилей, преобразователя в составе солнечных фотоэлектрических станций.. Представлена качественная иллюстрация изменения прогнозируемого сигнала управления в виде последовательности управляющих импульсов и выходного сигнала объекта управления.

Ключевые слова: *математическая модель, гибридная система, функционал качества, интервал оптимизации, сигнал управления.*

Введение

Существует широкий класс систем, у которых одна часть элементов функционирует непрерывно во времени, а другая часть элементов функционирует дискретно во времени. Математические модели таких систем представляют собой совокупность дифференциальных и разностных уравнений или дифференциальных уравнений, включающих специальные функции, учитывающие дискретность. Такие системы называются непрерывно-дискретными или гибридными [1, 2]. Они получили широкое распространение в различных отраслях промышленности, на транспорте, в энергетике и других отраслях, где имеются электротехнические системы, работа которых основана на использовании как непрерывной, так и дискретной обработки сигналов. В частности, к этому классу систем относятся преобразователи постоянного тока в постоянный или в переменный ток, имеющие значительное многообразие схемно-технических решений.

Рассмотрим обобщенную структурную схему гибридной следящей системы управления (рис. 1). Особенностью данной системы является то, что сигнал на выходе регулятора представляет собой последовательность импульсов переменной скважности или периода повторения, воздействующих на объект управления, на выходе которого имеет место непрерывный сигнал.

Общая постановка задачи. В общем случае задача управления сводится к формированию такого сигнала на выходе регулятора, который минимизирует заданный функционал качества (целевую функцию), дающий количественную оценку основным требованиям, предъявляемым к системе.

Для большинства практических задач такой функционал представляет собой сумму терминальной и интегральной составляющих, характеризующих цель управления и текущие потери (задача Больца) [1–5]. При решении практических инженерных задач синтеза оп-

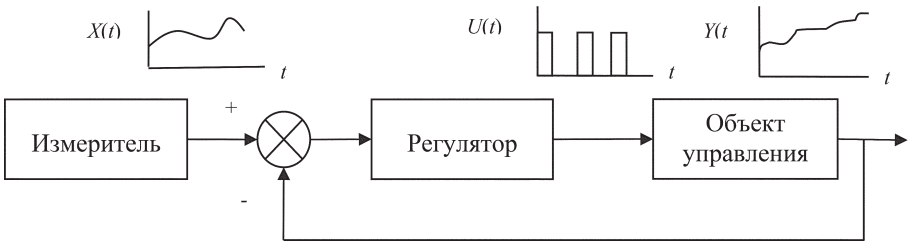


Рис. 1. Структурная схема гибридной системы управления

тимального управления широкое распространение имеет линейный квадратичный функционал Летова-Калмана вида [1–3]

$$J_0 = e^T(t_k)De(t_k) + \int_{t_0}^{t_k}\left[e^T(t)Q(t)e(t) + U^T(t)K^{-1}(t)U(t)\right]dt. \quad (1)$$

В выражении (1) $e(t) = Y(t) - Y_T(t)$ – вектор ошибки управления, $Y_T(t)$ и $Y(t)$ векторы требуемого и текущего состояния объекта управления, $U(t)$ – вектор управления, t_0 и t_k начальный и конечный моменты времени управления. В частном случае при $Y_T(t) = 0$, $e(t) = Y(t)$. D, $Q(t)$ – заданные положительно определенные, как правило, диагональные матрицы. $K(t)$ – заданная диагональная матрица положительных коэффициентов. Временной интервал оптимизации $[t_0, t_k]$ может быть различным в зависимости от конкретной постановки задачи.

Метод поиска оптимального управления $U(t)$ выбирается в соответствии с постановкой задачи и видом математической модели, описывающей состояние системы (объекта управления). Рассмотрим линейную детерминированную модель системы управления, которая характерна для описания большинства электротехнических систем [1, 3]

$$\dot{Y}(t) = A(t)Y(t) + B(t)U(t),\ Y(t_0) = Y_0. \quad (2)$$

$A(t)$ и $B(t)$ – заданные матрицы коэффициентов, имеющие размерности соответственно $n \times n$ и $r \times n$ при $r \le n$.

Для линейной модели системы управления (2) и функционала качества (1) задача определения оптимального управления $U(t)$ имеет конкретное аналитическое решение (задача аналитического конструирования оптимального регулятора) [1, 2]. В этом случае выражение для определения $U(t)$ имеет вид:

$$U(t) = -K(t)B^T(t)\Lambda(t)Y(t). \quad (3)$$

$\Lambda(t)$ – матрица коэффициентов, вычисляемая путем решения уравнения

$$\dot{\Lambda}(t) = -\Lambda(t)A(t) - A^T(t)\Lambda(t) + \Lambda(t)B(t)K(t)B^T(t)\Lambda(t) - Q(t). \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой нелинейное уравнение типа Риккати, для которого заданы конечные условия $\Lambda(t_k) = D$. Решение уравнения (4) можно получить численно, интегрируя его в «обратном времени» [3, 6].

Управление гибридной электротехнической системой. В качестве примера гибридной системы рассмотрим импульсный преобразователь постоянного тока (понижающий) [7–11], который находит широкое применение в различных электротехнических системах в качестве источника бесперебойного питания, или в качестве зарядного устройства для электромобилей, содержащих в своем составе солнечные фотоэлектрические станции (рис. 2).

В схеме, представленной на рис. 2, управление напряжением *Uc* осуществляется путем периодического подключения электрической схемы к источнику постоянного тока *Us* с по-

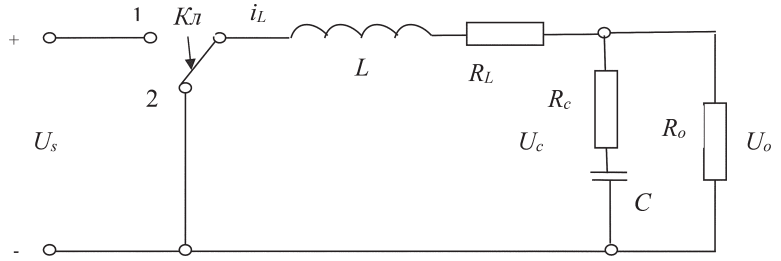


Рис. 2. Импульсный преобразователь постоянного тока

мощью ключа *Кл*. Математическая модель импульсного преобразователя представляет собой систему дифференциальных уравнений второго порядка вида (2), в которой вектор состояния и матрицы $A(t)$, $B(t)$ имеют вид (индекс t для упрощения записи не используется) [12–14]:

$$Y=\begin{bmatrix} i_L \\ U_c \end{bmatrix},\ A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix}.$$

В соответствии с приведенными на рисунке обозначениями заданы коэффициенты: $a_{11}=R_L/L$, $a_{12}=a_{21}=0$, $a_{22}=-1/C(R_0+R_c)$, $b=1/L$.

Обозначив $i_L=y_1$, $U_c=y_2$, перепишем систему уравнений (2) в скалярной форме в виде

$$\dot{y}_1=a_{11}y_1+a_{12}y_2+bu,\ y_1(t_0)=y_{10}, \quad (5)$$

$$\dot{y}_2=a_{21}y_1+a_{22}y_2,\ y_2(t_0)=y_{20}. \quad (6)$$

Управление $u=u(t)$ представим в виде последовательности импульсов [15, 16]

$$u(t)=\sum_{i=0}^{n}\mu_i(Y,t)\delta(t-t_i), \quad (7)$$

где $\delta(t-t_i)$ – δ-функция Дирака вида

$$\delta(t-t_i)=\begin{cases} 0, & t\neq t_i, \\ \infty, & t=t_i. \end{cases}$$

$\mu_i(Y,t)$ – функции, зависящие от времени и вектора фазовых координат системы $Y(t)$, t_i – момент времени появления i-го управляющего импульса.

Минимизируемый квадратичный функционал в соответствии с (1) для данной постановки задачи имеет вид

$$J_0=Dy_2^2(t_k)+\int_{t_0}^{t_k}\left[Qy_2^2(t)+K^{-1}(t)u^2(t)\right]dt. \quad (8)$$

Для получения допустимых уровней величин $y_1(t)$, $y_2(t)$, $u(t)$ должен быть произведен подбор соответствующих коэффициентов D, Q, K, которые удобно выбирать исходя из возможных максимальных значений, входящих в минимизируемый функционал качества переменных [3]. В данном случае примем

$$D=\frac{1}{y_{2\max}^2},\ Q=\frac{1}{(t_k-t_0)y_{2\max}^2},$$

$$K^{-1}=\frac{1}{(t_k-t_0)u_{\max}^2}.$$

При этом производится нормировка входящих в (8) величин, имеющих различный физический смысл.

Для системы управления (5)–(6) и функционала качества (8) в соответствии с формулой (3) и с учетом того, что $\Lambda_{21}=\Lambda_{12}$ оптимальное управление вычисляется по формуле

$$u=-Kb[\Lambda_{11}y_1+\Lambda_{12}y_1]=u(t). \quad (9)$$

Входящие в (9) коэффициенты Λ_{11} и Λ_{12} в соответствии с (4) вычисляются путем решения системы уравнений

$$\dot{\Lambda}_{11}=-2a_{11}\Lambda_{11}-2a_{21}\Lambda_{12}+Kb^2\Lambda_{11}^2,\quad \Lambda_{11}(t_k)=0, \quad (10)$$

$$\dot{\Lambda}_{12}=-(a_{22}+a_{11})\Lambda_{12}-a_{12}\Lambda_{11}-a_{21}\Lambda_{22}+Kb^2\Lambda_{11}\Lambda_{12},\quad \Lambda_{12}(t_k)=0, \quad (11)$$

$$\dot{\Lambda}_{22}=-2a_{12}\Lambda_{12}-2a_{22}\Lambda_{22}+Kb^2\Lambda_{12}^2-Q,\quad \Lambda_{22}(t_k)=D. \quad (12)$$

Для вычисления входящих в закон управления (9) коэффициентов Λ_{11} и Λ_{12} уравнения (10)–(12) решаются в «обратном времени». При этом функционал качества (8) минимизируется на скользящем интервале $[t_0+T_{\text{опт}}\ldots t_k+T_{\text{опт}}]$ [2]. Величину интервала оптимизации $T_{\text{опт}}$ выберем равной времени переходного процесса в системе, определяемым максимальной постоянной времени $T_{\max}$ элементов системы [1, 3].

Определив $u(t)$ на интервале оптимизации $[t_0\ t_k]$, проинтегрируем выражение (9) по времени, считая, что на этом интервале имеется один прямоугольный управляющий импульс.

$$\int_{t_0}^{t_k}u(t)dt=\int_{t_0}^{t_k}\mu_i(Y,t)\delta(t-t_i)dt. \quad (13)$$

В соответствии с определением интеграла свертки [1, 2] из выражения (13) получаем

$$\int_{t_0}^{t_k}u(t)dt=\mu_i(Y,t_i)=A_ut_u, \quad (14)$$

где A_u – амплитуда управляющего импульса на i-м интервале оптимизации, t_u – длительность управляющего импульса на i-м интервале. При заданной в соответствии с рис. 2 постоянной амплитуде $A_u=U_s$ длительность управляющего импульса вычисляется по формуле:

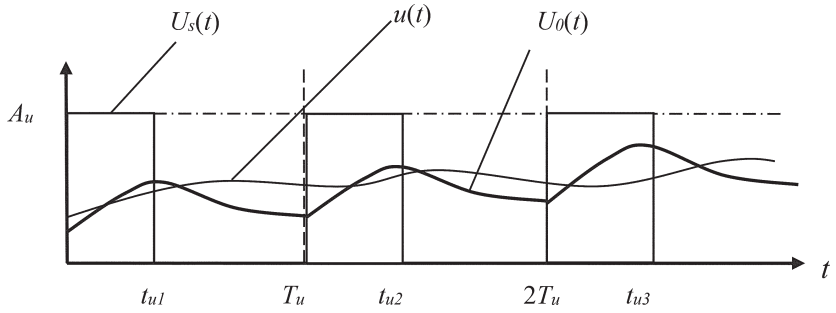


Рис. 3. Процесс управления системой

$$t_u = \frac{1}{A_u}\int_{t_0}^{t_k} u(t)dt\,. \qquad (15)$$

Таким образом, управление гибридной системой (преобразователем постоянного тока) в данном случае осуществляется последовательностью прямоугольных импульсов с постоянной амплитудой и периодом следования, но с переменной длительностью, зависящей от величины прогнозируемого на интервале оптимизации сигнала управления. На рис. 3 представлена качественная иллюстрация изменения прогнозируемого сигнала управления, последовательности управляющих импульсов и выходного сигнала объекта управления (преобразователя).

На рис. 3 изображены следующие процессы, происходящие в гибридной электротехнической системе: $U_s(t)$, – последовательность управляющих импульсов, $u(t)$ – прогнозируемый сигнал оптимального управления, $U_0(t)$ – выходной сигнал гибридной системы, A_u – амплитуда управляющих импульсов.

Из рис. 3 видно, что при изменении величины прогнозируемого на интервале оптимизации сигнала управления, изменяется длительность управляющих импульсов при постоянном периоде следования.

Заключение

Решается задача управления гибридной системой, к классу которых относятся системы, содержащие в своем составе как непрерывные, так и дискретные элементы. Предлагается решать задачу оптимального управления гибридной системой на основе формирования такого управляющего сигнала управления на выходе контроллера (регулятора), который минимизирует заданный интегральный функционал качества, в качестве которого рассматривается линейный квадратичный функционал Летова-Калмана. В качестве примера решения задачи управления гибридной системой в данном случае рассматривается линейная детерминированная модель системы управления, характерная для большинства гибридных электротехнических систем. Для такой постановки задача поиска оптимального управления представляет собой задачу аналитического конструирования оптимального регулятора, которая имеет конкретное решение.

Управление гибридной системой (преобразователем постоянного тока) осуществляется в данном случае последовательностью прямоугольных импульсов с постоянными амплитудой и периодом следования, но с переменной длительностью, зависящей от величины прогнозируемого на интервале оптимизации сигнала управления. Представлена качественная иллюстрация изменения прогнозируемого сигнала управления, последовательности управляющих импульсов и выходного сигнала объекта управления (преобразователя). Данный подход может найти применение для решения широкого круга прикладных задач.

Литература

1. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 4 т.

2. **Справочник** по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

3. **Брайсон А.** Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю– ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.

4. **Методы** оптимизации / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 440 с.

5. **Теория** систем автоматического управления / под. ред. В. Л. Бесекерского, Е. П. Попова. – М.: Изд. Санкт–Петербург, 2003. – 747 с.

6. **Казаков И. Е.** Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

7. **Utkin V. I.** Скользящее управление электромеханическими системами. / V. I. Utkin, V. J. Guldner, J. X. Shi.-London, U. K.: Taylor & Francis, 1999.-350 p.

8. **Мелешин В. И.** Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.

9. **Priewasser R.** Моделирование, управление и реализация импульсных преобразователей постоянного тока с переменной частотой работы. / R. Priewasser, M. Agostinelly, C. Unterrieder, M. Stefano, M. Huemer// IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, no. 1, Jan. 2014, P. 287–301.

10. **Белов Г. А.** Структурные модели и исследование динамики импульсных преобразователей / Г. А. Белов // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 47–49.

11. **Bass R. M.** Частотно-зависимая усредненная модель преобразователей постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией / R. M. Bass, B. Lehman // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, no. 3, Mar. 1996, P. 89–98.

12. **Imad Elzein, Petrenko Yu. N.** Модель упреждающего управления системой обеспечения максимальной выходной мощности солнечной батареи // Системный анализ и прикладная информатика, № 4, 2015, С. 17–25.

13. **Geyer T., Parafotiou G., Frasca R., Morari M.** Оптимальное управление преобразователями постоянного тока, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, Sept. 2008, pp. 2454–2464.

14. **Сотникова М. В.** Синтез робастных алгоритмов управления с прогнозирующими моделями / М. В. Сотникова // Системы управления и информационные технологии. – Т. 50, № 4. – 2012. – С. 99–102.

15. **Казаков И. Е.** Анализ систем случайной структуры / И. Е. Казаков, В. М. Артемьев, В. А. Бухалев. – М.: Наука, 1993. – 270 с.

16. **Лобатый А. А.** Аналитическое моделирование дискретных систем с фазовым управлением / А. А. Лобатый, В. Л. Бусько, Л. В. Русак // Доклады БГУИР. – 2008. – № 3 (33). – С. 103–110.

17. **Лобатый А. А.** Математическое моделирование гибридных электротехнических систем / А. А. Лобатый, Ю. Н. Петренко, А. Эльзейн, А. С. Абуфанас // Наука и техника. – 2016. – № 4, т. 15. – С. 322–328.

18. **Imad Elzein,** DC-DC power converters modeling: from averaging to hybrid systems // В Сб. «Наука-образованию, производству, эконо мике». Мат 13-й МНТК, Т. 1, 2015, С. 222.

References

1. **Metody** klassicheskoj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija: Vol. 5 t. / pod red. K. A. Pupkova i N. D. Egupova. – M.: Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Baumana, 2004. – 4 t.

2. **Spravochnik** po teorii avtomaticheskogo upravlenija / pod red. A. A. Krasovskogo. – M.: Nauka, 1987. – 712 s.

3. **Brajson A.** Prikladnaja teorija optimal'nogo upravlenija / A. Brajson, Ho Ju– shi. – M.: Mir, 1972. – 544 s.

4. **Metody** optimizacii / pod red. V. S. Zarubina, A. P. Krishhenko. – M.: Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Baumana, 2003. – 440 s.

5. **Teorija** sistem avtomaticheskogo upravlenija / pod. red. V. L. Besekerskogo, E. P. Popova. – M.: Izd. Sankt-Peterburg, 2003. – 747 s.

6. **Kazakov I. E.** Metody optimizacii stohasticheskih sistem / I. E. Kazakov, D. I. Gladkov. – M.: Nauka, 1987. – 304 s.

7. **Utkin V. I.** Skol'zjashhee upravlenie jelektromehanicheskimi sistemami. / V. I. Utkin, V. J. Guldner, J. X. Shi.-London, U. K.: Taylor & Francis, 1999. – 350 p.

8. **Meleshin V. I.** Tranzistornaja preobrazovatel'naja tehnika / V. I. Meleshin.-M.: Tehnosfera, 2005. – 632 s.

9. **Priewasser R.** Modelirovanie, upravlenie i realizacija impul'snyh preobrazovatelej postojannogo toka s peremennoj chastotoj raboty. / R. Priewasser, M. Agostinelly, C. Unterrieder, M. Stefano, M. Huemer // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, no. 1, Jan. 2014, P. 287–301.

10. **Belov G. A.** Strukturnye modeli i issledovanie dinamiki impul'snyh preobrazovatelej / G. A. Belov // Jelektrichestvo. – 2008. – № 4. – S. 47–49.

11. **Bass R. M. Chastotno**-zavisimaja usrednennaja model' preobrazovatelej postojannogo toka s shirotno-impul'snoj moduljaciej / R. M. Bass, B. Lehman // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, no. 3, Mar. 1996, P. 89–98.

12. **Imad Elzein, Petrenko Yu. N.** Model' uprezhdajushhego upravlenija sistemoj obespechenija maksimal'noj vyhodnoj moshhnosti solnechnoj batarei // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika, № 4, 2015, S. 17–25.

13. **Geyer T., Parafotiou G., Frasca R., Morari M.** Optimal'noe upravlenie preobrazovateljami postojannogo toka, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, Sept. 2008, pp. 2454–2464.

14. **Sotnikova M. V.** Sintez robastnyh algoritmov upravlenija s prognozirujushhimi modeljami / M. V. Sotnikova // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii. – T. 50, № 4. – 2012. – S. 99–102.

15. **Kazakov I. E.** Analiz sistem sluchajnoj struktury / I. E. Kazakov, V. M. Artem'ev, V. A. Buhalev. – M.: Nauka, 1993. – 270 s.

16. **Lobatyj A. A.** Analiticheskoe modelirovanie diskretnyh sistem s fazovym upravleniem / A. A. Lobatyj, V. L. Bus'ko, L. V. Rusak // Doklady BGUIR. – 2008. – № 3 (33). – S. 103–110.

17. **Lobatyj A. A.** Matematicheskoe modelirovanie gibridnyh jelektrotehnicheskih sistem / A. A. Lobatyj, Ju. N. Petrenko, A. Jel'zejn, A. S. Abufanas // Nauka i tehnika. – 2016. – № 4, t. 15. – S. 322–328.

18. **Imad Elzein, DC**-DC power converters modeling: from averaging to hybrid systems // V Sb. «Nauka-obrazovaniju, proizvodstvu, jekonomike». Mat 13-j MNTK, T. 1, 2015, S. 222.

Поступила	*После доработки*	*Принята к печати*
09.09.2016	*14.11.2016*	*28.11.2016*

Lobaty A. A., Petrenko Y. N., Abufanas A. S., Imad Elzein

IMPULSE CONTROL HYBRID ELECTRICAL SYSTEM

Belarusian National Technical University

This paper extends the recently introduced approach for modeling and solving the optimal control problem of fixed-switched mode DC-DC power converter. DC- DC converters are a class of electric power circuits that used extensively in regulated DC power supplies, DC motor drives of different types, in Photovoltaic Station energy conversion and other applications due to its advantageous features in terms of size, weight and reliable performance. The main problem in controlling this type converters is in their hybrid nature as the switched circuit topology entails different modes of operation, each of it with its own associated linear continuous-time dynamics.

This paper analyses the modeling and controller synthesis of the fixed-frequency buck DC-DC converter, in which the transistor switch is operated by a pulse sequence with constant frequency. In this case the regulation of the DC component of the output voltage is via the duty cycle. The optimization of the control system is based on the formation of the control signal at the output.

It is proposed to solve the problem of optimal control of a hybrid system based on the formation of the control signal at the output of the controller, which minimizes a given functional integral quality, which is regarded as a linear quadratic Letov-Kalman functional. Search method of optimal control depends on the type of mathematical model of control object. In this case, we consider a linear deterministic model of the control system, which is common for the majority of hybrid electrical systems. For this formulation of the optimal control problem of search is a problem of analytical design of optimal controller, which has the analytical solution.

As an example of the hybrid system is considered a step-down switching DC-DC converter, which is widely used in various electrical systems: as an uninterruptible power supply, battery charger for electric vehicles, the inverter in solar photovoltaic power plants.. A qualitative change in the projected illustration of the control signal, a sequence of control pulses and output management object (inverter).

Keywords: *mathematical model, the hybrid system, the quality of the functional optimization interval control signal.*

Lobaty A. A. Doctor of science, professor. In 2000 he established chair «Information systems and technologies» in Belorussian National Technical University, department of «International Institute of Distance Education». His research interests include algorithms, concepts, and architecture for digital signal processing systems. He has extensive consulting experience in control of unmanned aerial vehicles. He is author and coauthor of many papers in scientific magazines, conference proceedings, and a number of books. He has number of university and state awards for achievements in teaching and research. E-mail: lobaty@tut.by

Yury N. Petrenko, IEEE member, graduated from Metallurgical College (Enakievo, Ukraine), and began working career in 1954 as a steelworker at open-hearth Steel Works Plant in Donetsk; he received the Engineer degree (with honors) in electrical engineering from the Belarusian Polytechnic Institute (now Belarusian National Technical University – BNTU) in 1962 and PhD in 1971. In 1965–66, he was a research fellow at the University of California, Berkeley. Since 1974, he has been an Associate professor (in 1995–2005 professor) at the department of Automatic Control of Electrical Drive Systems of BNTU. In 1972–73 he was a UN (UNIDO) expert in Automation in Sofia (Bulgaria) and Vienna. In 1985 he was honored as inventor of the USSR. In 1980–90th, he was a visiting lecturer and research fellow in Syria (Tishrin University, Latakia and Aleppo University), Czechoslovakia, Lebanon and Cuba. He has been teaching Automatic Control of Electric Drives, Numerical Control Systems and Programmable Logic Controllers.

He is an author, Editor and Co-Author of 7 books, recommended by Ministry of Education for University and College -level engineering education and 2 Monographs (in coop). His main research interests in recent years include data signal processing, new control techniques applied to power electronics and electric drives. E-mail: ypetrenko@bntu.by

Imad Elzein – professional electronics/telecom and networking engineer and IT consultant, who finished a series of certificates, diplomas, undergraduate and graduate studies, with a remarkable GPA's of 4.0 out of 4.0 at the university level. A total of 17 + years of hands-on experience in electronics, telecommunication, computers, and networks.

Research Interests: Network engineering: A high interest and research in the Virtualization environment, such as VMWARE, V. sphere, Fuel cells, solar panels, and DC-DC applications, Predictive control, and Maximum Power point tracking (MPPT)

Teaching Profile: Computer Organization & Architecture, Computer Networks, Data Communications, Microprocessors&assembly language.

Educational Background: **Bachelor of Science** in Electrical/Electronic Engineering, Wayne State University, Michigan-USA.

Master of Science in Electronics Engineering Technology, Wayne State University, Michigan-USA

Title: Advanced diploma in CCNA & servers technologies. Simulation of a virtual ESX server in HP blade environment. Institute: Willis College-Ottawa-Canada.

Certified Cisco Academy instructor in CCNA1, CCNA2, CCNA3, CCNA4.

Lebanese University-Beirut-Lebanon, Special Courses and Trainings.

2008 Cisco Certified Network Professional-Switching Networks (CCNP) & Cisco certified Network Associate (CCNA), 2009 Microsoft Gold partner for innovation, 2008 Microsoft Certified IT Professional – Enterprise Server Administrator 2008 track (MCITP).

Affiliations:

Member of the Electrical and Electronic Engineers IEEE (USA). Member in the POET Professional Order of Engineers (USA), Secretary and active member in the Tau Alpha PI engineering society (USA), Member of the Phi Beta Delta chapter of Michigan for outstanding scholars (USA), Certified member of the Engineering Council (UK),

Абуфанас А. С. – аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», факультета информационных технологий и робототехники БНТУ. Научное направление – системный анализ и обработка информации.

УДК 004.9:681.3

В. Г. МИХАЙЛОВ

СЧИТЫВАНИЕ, ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА УСКОРЕНИЙ И УГЛОВ НАКЛОНА С MPU-6050 И ЗАПИСЬ ИХ НА SD КАРТУ ARDUINO DUE

ООО «Мидивисана», г. Минск

Дан краткий обзор микроконтроллеров семейства Arduino, их характеристик и областей применения. Отмечена важность записи параметров исследуемого объекта для отладки систем управления на микроконтроллерах Arduino. Единственной возможностью регистрации параметров в семействе Arduino является запись на SD-карту в текстовом режиме с использованием функций **print()**, **write()**. *Рассмотрены проблемы, связанные с записью бинарных данных на SD-карту на микроконтроллере Arduino Due. Проведен анализ способов записи бинарных данных на SD-карту Arduino Due, возникающих проблем с неочисткой памяти от предыдущей программы, приводящей к возможности дублирования данных на SD-карте, наличие ошибочной точки зрения об ограничении объемов записи данных и необходимости использования устаревших SD-карт. Рассмотрены пути устранения отмеченных недостатков. Проведена оценка быстродействия различных подходов записи информации на SD-карту. На основании проведенных исследований предложен подход уплотнения записываемой информации за счет преобразования бинарных данных побайтно в символьный массив в коде ASCI без увеличения их объема и записи блоками по 240 байт. Это позволяет максимально использовать возможности стандартной функции write() Arduino и специфику организации памяти SD-карт и увеличить быстродействие более чем в 1100 раз по сравнению с записью в символьном виде по одному байту.*

Отмечено, что использование предлагаемых на форумах решений исключения дублирования данных из-за неочистки памяти не обеспечивает полноты их устранения. Для Arduino Due для очистки памяти необходимо использования специального программатора или установка новой программы загрузки.

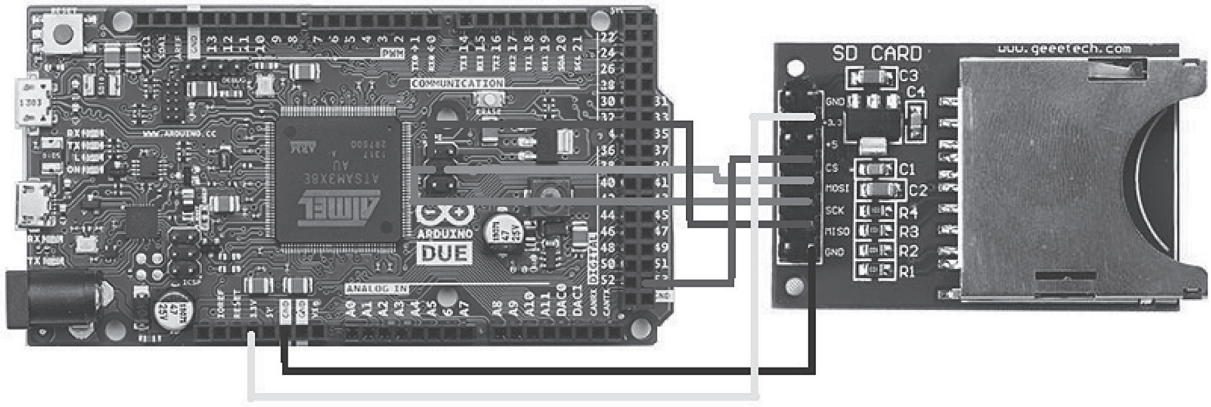
Ключевые слова: *Микроконтроллер Arduino Due, SD карта, запись бинарных данных, программа.*

Введение

Сейчас все более широко для задач автоматизации различных объектов применяются микроконтроллеры (МК) семейства Arduino [1, 2]. В следствии их производства в КНР, они имеют низкую стоимость (15–25 $), благодаря чему они получают все более широкое применение.

Линейка микроконтроллеров Arduino включает 8-ми, 32-ти разрядные модули. Они имеют малые габариты и малое потребление тока. И широко используются в различных системах управления игрушек, роботов, квадрокоптеров, систем умного дома и других устройств. Имеют неплохие перспективы для использования и в других областях. Наиболее производительным является ArduinoDue, представляющий собой 32-ти разрядный микроконтроллер с тактовой частотой 84 МГц, показанный на рис. 1.

Он имеет габариты 53x103x15 мм, масса – 35 г. В Arduino Due имеется 12 аналоговых входов АЦП и два аналоговых выхода 12-битного цифро-аналогового преобразователя. Необходимо также отметить, что плата Arduino Due имеет еще 54 цифровых вывода, которые могут работать в качестве входа или выхода сигналов, а также выводить 8-битные аналоговые значения в виде ШИМ-сигнала. Программирование модулей Arduino осуществляется с помощью языка C, C++ в среде Windows, Linux, Perl. Имеются большое количество различных датчиков и устройств для Arduino



\ Рис. 1. Общий вид ArduinoDue с SD модулем и схема их соединения

и бесплатных библиотек для них. Вместе с тем следует, отметить, что программные средства написаны в основном под 8-ми битные микроконтроллеры. Это не в полной мере пока позволяет использовать возможности 32-ти разрядного Arduino Due.

Кроме того для Arduino Due нет стандартного устройства (SD Shield), устанавливаемого сверху на плату. Из-за чего приходится использовать более простое устройство SD-карты с подключением проводами. Следует также отметить, что на Arduino Due не работает очистка памяти от предыдущей программы, что приводит к ее запуску и возможно дублирование данных в одноименных файлах.

Важную роль в процессе отладки систем управления на микроконтроллерах играет регистрация параметров исследуемого объекта, которую можно осуществить путем записи их на SD-карту. Однако запись бинарных данных на SD-карту [3–9] на микроконтроллерах представляет определенные трудности из-за ограниченных возможностей стандартной библиотеки SD, более рассчитанной на использование старых карт объемом 2, 4 Гб класса 2–4 и запись текстовой информации. А сейчас все больше распространены SD-карты (10 класс) стандарта SDHC и SDXC объемом соответственно до 32 Гб и более 64 Гб.

В Arduino запись на SD-карту в текстовом режиме производится с использованием функций **print()**, **write()** [3–8]. Максимальная длина записываемой строки соответственно 127, 255 байт. В тоже время многие регистрируемые параметры имеют бинарный вид (**int** 2 байта на 8-ми и 4 байта на 32 битных МК и **float, long** – 4 байта. Низкая скорость записи на SD-карту существенно ограничивает производительность системы управления. Если их (например, float) преобразовать в текстовый формат, то 4 байта **float** будут в среднем соответствовать 11–12 байтам текста с разделителем. И если необходимо произвести запись блока из 4 параметров, то реально в текстовом режиме можно записать блок кратный только 5-ти. В тоже время при использовании бинарных данных кратность могла быть равна 15-ти (при записи блока 240 байт).

Для управления быстродействующими объектами, такими как БЛА, квадрокоптеры важную роль играет быстродействие системы управления, зависящее, как от тактовой частоты микроконтроллера, его разрядности, так и времени записи на SD-карту. По данным работы [3], чтобы считать 6 байт из 3-х осевого акселерометра, библиотека гироскопа посылает адрес читаемого регистра и затем ждет. Шина I2C большинства гироскопов и акселерометров/магнетометров работает на частоте 100 КГц. В то же время сами сенсоры могут отдавать данные, например, 5000 раз в секунду. При такой частоте опроса сенсоров на 8-битном МК с рабочей частотой 16 МГц (Arduino Uno, Mega и другие) времени на обработку данных сенсоров, поступающих на огромной скорости практически не остается. При большой частоте опроса гироскопа или акселерометра Arduino можно использовать только как транслятор сигналов от сенсора через UART (аппаратно-последовательный порт) на внешний компьютер. Рассчитывать на выполнение каких-либо 32-ти битных вычислений, включая численное интегрирование и фильтрацию сигнала с датчиков ускорений гироскопа MPU6050 для определения угла наклона на самой Arduino (16 МГц, 8-ми битной) в та-

кой ситуации не приходится. Поэтому возникла необходимость поиска путей повышения скорости записи на SD-карту, чтобы последняя не тормозила процесс управления быстродействующим объектом. Исходя из соображений быстродействия в своих исследованиях ориентировался на Arduino Due (84 МГц). Учитывалась тенденция, что в ближайшем будущем полностью произойдет переход на 32-разрядные микропроцессоры, чья большая вычислительная мощность позволит создавать новые интересные устройства, платы типа Arduino Due станут еще более востребованными.

С учетом всего этого в работе было акцентировано внимание на исследование путей записи бинарных данных на SD и возможности повышения производительности процесса записи, представляющих существенный практический интерес.

1. Особенности записи данных на SD-карты для МК Arduino Особенностью записей на большинство SD-картах на МК, не использующих файловую систему, является специфическая организация их структуры хранения данных, при которой в начале ищется свободный блок (512 Кб либо 1024 Кб), в него вносятся данные и затем перезаписывается весь этот блок. С учетом этого целесообразно готовить и записывать данные на SD-карту блоком 512 Кб, а не по одному байту. Также следует учитывать, что используемые в Arduino функции **write()**, print() могут записывать информацию только в символьном виде. Функции **write()** может записать символьную строку объемом только 255 байт, а print() – 127 байт в коде ASCI. Это связано с использование в функции **size_t write(const uint8_t *buf, size_t size)** переменной **uint8_t *buf (**8-ми битного **числа)**. Исходя из этого вытекает, что информацию целесообразно записывать с помощью функции **write()** блоком максимальным близким к 255 байт. Запись по одному байту, как предлагается в работах [7–10] нерациональна и непроизводительна. Она не обеспечивает требуемое минимальное время регистрации данных и управления быстродействующим объектом, например, квадрокоптером – 26 ms. И тем более 4-х, 6-ти, 8-ми параметров. Поэтому рассмотрим возможные пути уплотнения информации и повышения быстродействия записи на SD-карте, тем более что большинство регистрируемых параметров носят бинарный характер, а символьную информацию или режим можно закодировать в цифровом виде.

2. Запись информации в символьном виде Для записи информации в символьном виде на один параметр (float, long) требуется 11–12 символов с разделителем. Отсюда получается, в строке 255 байт можно записать только 5 блоков по 4 параметра ($4\times11 - 12 = 220–240$ символов). Наиболее худшим вариантом является запись по одному байту, что снижает производительность более чем в 1100 раз, т. к. для каждого символа требуется вначале найти блок, изменить его, а затем перезаписать. Это не позволяет использовать такой подход при регистрации данных и управления квадрокоптером, БЛА, роботом, станками.

3. Запись информации в бинарном виде Бинарные данные (float, long, int) на 32-хразрядном Arduino Due занимают 4 байта. Более целесообразным представляется для них использовать запись в символьный массив с преобразованием бинарных данных путем считывания побайтно в коде ASCI, при котором float, long, int будет занимать те же 4 байта, а четыре параметра 16 байт. Благодаря чему можно сократить объем информации в 3 раза по сравнению с символьным видом. Дополнительно можно уплотнить запись, если записывать информацию блоками, максимально приближаясь к объему символьной строки 255 байт. Для float (long, int) это 240 байт. Преобразование можно реализовать с помощью разработанной функции **zfl_bs** (см. исходный текст программы).

При заполнении символьной строки до максимально возможного (240 байт), она записывается на SD-карту с помощью стандартной функции write() и цикл повторяется.

Для удобства преобразования данные организованы в виде структуры **struct**. Это позволяет облегчить их обработку, преобразование через ссылочный механизм, не увеличивая объема информации.

Записанный на SD-карте массив в дальнейшем может быть считан с помощью функции языка С **fread**() и занесен в структуру. И далее при необходимости соответствующий образом обработан и использован. Например, использован в качестве исходных данных и сравнения при моделировании на Matlab/

Simulink. И таким образом может быть проверена и отлажена система управления реальным объектом.

Программа реализации считывания 4-х параметров, записи их на SD-карту приведена ниже.

Таблица 1. **Программа записи 4-х значений float на SD-карту**

```
#include <SPI. h>
#include <SD. h>
#include <string. h>
#include <stdio. h>
struct dd {
float d1;
float d2;
float d3;
float d4;
byte bs[240];
int blz;
int kbz;
int zsb;
long kbf;
};
struct dd fd;
void zfl_bs(struct dd *d);
void zbl_sd(struct dd *d);
int j, ibl, kbf, kw, nf, mkf, kd;
//kf count write file
unsigned long time1, time2;
File mF;
char nfl[24];
char s1[24];
//------------------------------
void setup() {
//------------------
int i;

//----  Clear memory MC
/* Serial. begin(1200);
 while(Serial. available())
  Serial. read();
   Serial. end();
delay(5000);
*/

j=0;
nf=0; //number file
kbf=500; // count block in file
mkf=3; //  max count file
kw=0; // count write
fd. blz=240;
fd. kbz=16; // 4*4;
time1=0;
kd=0;
pinMode(53, OUTPUT);
//fd. bs[fd. blz]=0;
// Open serial communications and wait for port to open:
  Serial. begin(250000);
  while (! Serial) {
  ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB
port only
}
  Serial. print("Initializing SD card...");
//---------------------
void loop() {
// my program
char s1[20];
int i;
//--------------------
//---------- incrise number file
while (j<=mkf)
{
if (kd==0)
{
  nfl[0]='\0';
itoa(j, nfl,10);
strcat(nfl,"test. txt");
mF = SD. open(nfl, FILE_WRITE);
kd=1;
Serial. println("File open");
if (j>0)
fd. d1=j;
}

//if (kw%kbf==0&&kw==kbf)
if (kw==kbf)
{
j++;
//nf=0;
mF. close();
Serial. println("File close");
kd=0;
kw=0;
time2 = millis();
Serial. print("Time write - ");
Serial. println(time2);
}
 fd. d1=1;
 fd. d2=2;
 fd. d3=3;
 fd. d4=4;
//------------
//fd. bs[0]='\0';
//fd. zsb=0;
//------------

for (i=0; i<ibl; i++)
{
fd. d1+=0.001;
fd. d2+=0.001;
fd. d3+=0.001;
fd. d4+=0.001;
zfl_bs(&fd);
}

zbl_sd(&fd);
//if (kj%kbf==0)
//mF. close();
```

```
  if (! SD. begin(53)) {
    Serial. println("initialization failed!");
    return;
}
  else
  Serial. println("initialization done.");
//while (! Serial);
time2=0;
ibl=fd. blz/fd. kbz;
sprintf(s1,"%ld%ld%ld\n", ibl, fd. zsb, fd. blz);
Serial. print(s1);

//-------------
if (j==mkf)
{
time2 = millis();
Serial. print("Time write - ");
Serial. println(time2);
Serial. println("Record File done.");
}
} // End Setup
```

```
//j++;
}
//mF. close();
}

//----------------------------
// Record float in struct bs
void zfl_bs(struct dd *d)
{
int i;
byte *yf, *ys;
yf=(byte *)&d->d1;
ys=(byte *)&d->bs[0] + d->zsb;
if (d->zsb!=d->blz)
{
for (i=0; i<d->kbz; i++)
*ys++=*yf++;
d->zsb= d->zsb + d->kbz;
}
else
{
d->bs[0]='\0';
d->zsb=0;

}
}

//-----------------
// Record data in File
void zbl_sd(struct dd *d)
{
int i, t, m;
byte *yf, *ys;
byte z;
//bl=d->blz;
z=240;
 if (d->zsb==d->blz)
 {
mF. write((const uint8_t *)d->bs, z);
kw++;
} //  if (d->zsb==d->blz)

}
//----------------------------
```

Алгоритм программы следующий: считываются данные с датчиков (в данном случае имитатора), их параметры заносятся в структуру, преобразуются и записываются в символьный массив блоками по 16 байт. При заполнении массива 240 байт производится запись на SD карту и цикл повторяется. При достижении определенного объема файла, он закрывается, открывается новый файл с соответствующим номером и так далее. Такой подход позволяет повысить надежность регистрации данных и сохранить большую часть информации при сбоях аппаратуры.

4. Оценка эффективности предлагаемого способа записи данных на SD-карту

Исследование проводилось с помощью SD карт 2 класса (512 кб, неизвестный производитель, 2004 г. вып), 4 класса (4 Гб, 133 mb/c, Transcend, 2008 г. вып.), 10 класса (32 Гб, 200 mb/c, Transcend, 2016 г. вып.).

Результаты предлагаемого способа записи бинарных данных на SD-карту сведены в таблицу. Здесь же для сравнения приведены данные по записям в виде символьной информации 4-х параметров и влияние типа SD карты на быстродействие записи.

Таблица 2. **Сравнительные результаты записи на SD-карты**

Время записи файла 240000 байт, ms	В бинарном виде блоком 16 байт * 15, 60000 параметров, ms	В символьном виде, блоком 4 параметра (46 байт) * 5, 20000 параметров, ms	В символьном виде по одному байту, для файла 240000 байт, ms
На SD-карте 32 Гб			
Полное время, ms	2581	2620	1032400
Приведенное время записи на один параметр float, ms	0,043	0,131	47,3
На SD-карте 4 Гб			
Полное время, ms	7701	8020	3080400
Приведенное время записи на один параметр float, ms	0,128	0,401	141,2
На SD-карте 512 кб			
Полное время, ms	10258	10270	4103200
Приведенное время записи на один параметр float, ms	0,172	0,51	188

Как видно из таблицы наиболее эффективным способом является запись бинарных данных блоком кратным 15-ти. Приведенное время на один параметр составляет 0,043 ms. При символьной форме записи время одного параметра составляет 0,128 ms. При бинарном и символьном способах записи данных блоком время минимально и не нарущает управление быстродействующим объектом (например, квадрокоптером – 26 ms.).

Как было выяснено существенное влияние на время записи оказывает тип и класс используемой CD-карты. Наиболее лучшие результаты показывает SD-карта 10 класса. У SD-карты 2 класса (512 мб) наиболее низкие результаты. SD-карта 4 класса (4 Гб) имеет несколько лучшие результаты по сравнению с SD-картой 4 класса (4 Гб). И все же они (SD карты 2, 4 класса) считаю менее годятся для регистрации быстродействующих процессов управления (БЛА, квадрокоптерами и т. п.). Последние лучше использовать для регистрации более медленных процессов, например, станками, роботами.

Как показали проведенные эксперименты SDHC-карты 10 класса (32 Гб, 200 ms/c) прекрасно работают с модулями Arduino. И непонятна ошибочная точка зрения, что для Arduino подходят только устаревшие SD-карты до 4 Гб, которые сейчас уже не выпускаются. Возможно причиной такого утверждения является неправильный подсчет объема памяти из-за ограничения значности типа long [6] при использовании стандартной программы CardInfo. ino, показывающей объем памяти менее 2 Гб на картах более 4 Гб. Необходимо также учитывать, что SDHC-карты рассчитаны на напряжение питания 3,3 В, в то время как устаревшие на 5 В. И чтобы не вывести из строя SD-карту необходимо питать ее от отдельного стабилизатора либо использовать делитель напряжения на сопротивлениях. У Arduino Due имеется собственный стабилизатор на 3,3 В, с помощью которого питался блок SD. На SDHC-карты можно записать до 32 Гб информации, что вполне достаточно для многих задач. SDXC карты (> 64 Гб) на Arduino не работают.

Необходимо упомянуть об имеющейся нерешенной проблеме очистки памяти от ранее загруженной программы в Arduino Due [9]. На сайтах для очистки памяти от ранее загруженной предыдущей программы (применительно в основном для Arduino Uno) предлагалось:

использование кнопки очистки памяти, удерживая ее 5 сек;

введение в программу задержки delay(5000);

запуск программы-пустышки;

использовать USB-порт для программирования в силу некоторых особенностей процесса очистки памяти микроконтроллера.

Но на Arduino Due все это не работает. Единственным решением является использование специального программатора для очистки памяти либо обновление программы загрузки МК [3]. В качестве временного решения можно рекомендовать использование записи в различные каталоги для отладочной и рабочей программы.

Заключение

1. С модулями Arduino целесообразно использовать современные карты SDHC 10 клас-

са, 32 Гб, которые обеспечивают наибольшее быстродействие и могут записывать до 32 Гб информации.

2. Устаревшие SD-карт 2, 4 класса имеют более низкое быстродействие (в 3–4 раза ниже чем у SDHC-карт).

3. Запись информации на SD-карты в символьном виде менее эффективна. Она приводит к снижению быстродействия в 3 раза по сравнению с бинарным способом.

4. На основании проведенных исследований предлагается подход уплотнения записываемой информации за счет преобразования бинарных данных побайтно в символьный массив в коде ASCI без увеличения их объема и записи блоками по 240 байт. Это позволяет максимально использовать возможности стандартной функции write() Arduino и специфику организации памяти SD-карт и увеличить быстродействие более чем в 1100 раз по сравнению с записью в символьном виде по одному байту.

5. Предложена и апробирована программа циклического считывания информации с датчиков и записи их параметров на SD-карты в бинарном виде, которая обеспечивает наибольшее быстродействие их записи и уплотнение информации.

Литература

1. **32-разрядные** платы Arduino [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://mcucpu.ru/index.php/platformy-8-bit/arduino/95-arduino32bit. – Дата доступа: 12.05.2016.

2. **ArduinoDue** Общие сведения [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://arduino.ua/ru/hardware/Due. – Дата доступа: 17.05.2016.

3. **Материалы** форума «Вопросы по гироскопу MPU 6050» [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://forum.amperka.ru/threads/%D0%92%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%8B-%D0%BF%D0%BE-%D0%B3%D0%B8%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D1%83-mpu-6050.1467/. – Дата доступа: 22.05.2015.

4. **Модуль** SD **карты и А**rduino [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://arduino-diy.com/arduino-SD-karta. – Дата доступа: 19.05.2016.

5. **Материалы** форума. Запись данных с датчика DHT11 на SD карту? [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://arduino.ru/forum/programmirovanie/zapis-dannykh-s-datchika-dht11-na-sd-kartu. – Дата доступа: 25.10.2016.

6. **Подключение и использование SD карты с А**rduino [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: https://uscr.ru/podklyuchenie-i-ispolzovanie-sd-karty-c-arduino/. – Дата доступа: 24.05.2016.

7. **Запись**/чтение на SD-карт**у с А**rduino [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://cxem.net/arduino/arduino2.php. – Дата доступа: 24.05.2016.

8. **Подключение** SD-карт к Arduino [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://www.poprobot.ru/home/podkluceniesdkartkarduino. – Дата доступа: 24.05.2016

9. **Проблема** загрузки в плату. Помощь по загрузке: [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://www.arduino.cc/en/Guide/Troubleshooting#upload. – Дата доступа: 20.05.2016.

10. **Arduino**: Работаем с SD-картами [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://zhitenev.ru/arduino-rabotaem-s-sd-kartami/. – Дата доступа: 20.05.2016.

References

1. **32-bit** boards Arduino [the Electronic resource]. – 2016. – the Mode доступа: <http://mcucpu.ru/index.php/platformy-8-bit/arduino/95-arduino32bit> – Access Date: 5/12/2016.

2. **Arduino** Due the general convergence [the Electronic resource]. – 2016. – the Mode доступа: http://arduino.ua/ru/hardware/Due. – Access Date: 5/17/2016.

3. **Materials** of a forum Questions on gyroscope MPU 6050 [the Electronic resource]. – 2010. – the Access mode: http://forum.amperka.ru/threads/%D0%92%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%8B-%D0%BF%D0%BE-%D0%B3%D0%B8%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF%D1%83-mpu-6050.1467/. – Access Date: 5/22/2015.

4. **SD** unit of a card and Arduino [the Electronic resource]. – 2016. – the Mode доступа: http://arduino-diy.com/arduino-SD-karta. – Access Date: 5/19/2016.

5. **Materials** of a forum Data record from sensor DHT11 on SD a card? [An electronic resource]. – 2016. – the Mode доступа: http://arduino.ru/forum/programmirovanie/zapis-dannykh-s-datchika-dht11-na-sd-kartu. – Access Date: 10/25/2016.

6. **Connection** and usage SD of a card with Arduino [the Electronic resource]. – 2016. – the Access mode: https://uscr.ru/podklyuchenie-i-ispolzovanie-sd-karty-c-arduino/. – access Date: 5/24/2016.

7. **Record**/reading on a SD-card with Arduino [the Electronic resource]. – 2016. – the Access mode: http://cxem.net/arduino/arduino2.php. – Access Date: 5/24/2016.

8. **Connection** SD of cards to Arduino [the Electronic resource]. – 2016. – the Access mode: <http://www.poprobot.ru/home/podkluceniesdkartkarduino>. – Access Date: 5/24/2016

9. **A** loading problem in a board of Arduino. The help on loading: [the Electronic resource]. – 2016. – the Access mode: http://www.arduino.cc/en/Guide/Troubleshooting#upload. – Access Date: 5/20/2016.

10. **Arduino**: Working with SD-Card: [the Electronic resource]. – 2016. – the Access mode: http://zhitenev.ru/arduino-rabotaem-s-sd-kartami/. – Access Date: 5/20/2016.

Поступила	*После доработки*	*Принята к печати*
15.10.2016	*16.11.2016*	*28.11.2016*

Vladimir Mikhailov

READING, PREPROCESSING OF ACCELERATIONS AND CORNERS INCLINATION WITH MPU-6050 I RECORD THEM ON SD-CARD THE ARDUINO DUE

Open Stock Company «Midivisana» Minsk, Republic Belarus

The short review of microcontrollers of family Arduino, their characteristics and application fields is given. Importance of record of parameters of researched object is marked to produce debugging of control systems on microcontrollers Arduino. Unique possibility of registration of parameters in family Arduino is record on SD a card in an alpha mode with usage of functions **print ()**, **write ()**. *The problems connected to record of the binary data on SD a card on microcontroller Arduino Due are considered. The analysis of methods of record of the binary data on SD-card Arduino Due, originating problems with neocleaning of memory from the previous program leading to possibility of duplication of the data on SD to a card, presence of the erratic point of view about restriction of volumes of data record and necessity of usage become outdated SD-cards is carried out. Ways of elimination of the marked lacks are considered. The estimation of high-speed performance of various approaches of a data recording on SD a card is led. On the basis of the led researches the approach of multiplexing of the writeable information at the expense of conversion of the binary data is offered is byte-serial in a character array in code ASCI without magnification of their volume and record by units on 240 byte. It allows to use as much as possible standard function possibilities write () Arduino and specificity of the organization of memory SD of cards and to increase high-speed performance more than in 1100 times in comparison with record in a character type on one byte.*

It is marked that usage of decisions of an exception of duplication of the data offered at forums does not provide completeness of their elimination. For Arduino Due for storage cleaning it is necessary usages of the special programmator or setting of the new program of loading.

Keywords: *Microcontroller Arduino Due, SD-Card, record of the binary data, the program.*

Владимир Георгиевич Михайлов, канд. техн. наук 05.05.03, 220005, Минск, ул. Пугачевская 24–8, ведущий инженер ООО «Мидивисана», г. Минск.

Специалист в области разработки систем CALS/PLM (PDM, ERP), программирования, автомобилестроения, моделирования динамических систем в пакетах MATLAB\SIMULIK, оценки напряженно-деформированного состояния в пакете ANSYS, испытаний подвесок, рам ТС, пневматики, гидравлики, тензометрирования,

Tel.: + 375-(029)785-09-16. E-mail: sapr7@mail.ru.

Mikhailov Vladimir (S'72–M'76–SM'80) received the D. degree (Cand. Tech. Sci., mechanical Engineering) from the Belarussian Polytechnical institute of Belarus, Minsk, in 1982.

He was a Senior Research and Engineer-designer at Minsk Automobile plant, from 1972 to 1984, Leading Research, Chief of Research laboratory in CenterSystem, Minsk (design and development ERP) from 1984 to 1991, and was leading Engineer-designer at Minsk Wheel plant from 1994 to 2010, now a leading engineer of Open Stock Company «Midivisana», Republic Belarus, Minsk. His research interests include design and development of Software PDM, ERP, application Oracle on C++, PL/SQL, Java, programming MC, modeling dynamic systems, vibration.

The expert in the field of system engineering CALS/PLM (PDM, ERP), programming MC, motor industry, modeling of dynamic systems in packets MATLAB\SIMULIK (with S-Function Builder), estimations of the intense-deformed state in packet ANSYS, to tests of suspension, frames of the vechicle, a pneumatics, hydraulics.

Tel.: + 375-(029)785-09-16. E-mail: sapr7@mail.ru.