

3. Гулия Н. В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980. 152 с.
4. Кинетические накопители энергии для электроэнергетики // Школа для электрика. URL: <http://electricalschool.info/spravochnik/eltehustr/1887-kineticheskie-nakopiteli-jenergii-dlja.html> (дата обращения: 25.01.2019).
5. Соколов В. С., Красных О. В., Косторной Г. В. Использование маховиков на транспорте // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2009. № 4 (12). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-mahovikov-na-transporte> (дата обращения: 25.01.2019).
6. Характеристики и сферы применения маховичных накопителей энергии // Умей вертеться. URL: <http://www.energovector.com/energoznanie-umey-vertetsya.html> (дата обращения: 25.01.2019).
7. Диски высокой энергии: маховичный накопитель // Умей вертеться. URL: <http://magspace.ru/blog/185231.html> (дата обращения: 25.01.2019).
8. Маховики для маховичного накопителя // Маховичный накопитель. URL: <http://sersalaev.narod.ru/index.files/flyweel4.htm> (дата обращения: 25.01.2019).
9. Пат. 132850 Российская Федерация, МПК F 16 F 15/315. Накопитель энергии на основе маховика с вертикальной осью вращения / Гулия Н. В., Лаврентьев А. И., Юрков С. А., № 2013123661/11; заявл. 23.05.2013; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27.
10. Проведены испытания накопителя кинетической энергии для подъемно-транспортного оборудования // Кинемак. URL: <http://www.kinemak.ru/?p=190> (дата обращения: 25.01.2019).
11. Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоемкости // Наука и техника. URL: <http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm> (дата обращения: 25.01.2019).
12. Кинетические накопители энергии для электроэнергетики // Управление и автоматизация. URL: <https://vk.com/@controlsys-kineticheskie-nakopiteli-energii-dlya-elektroenergetiki> (дата обращения: 25.01.2019).
13. Разработка электромеханического накопителя энергии для систем бесперебойного электропитания. URL: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/49131/1/TPU570245.pdf> (дата обращения: 25.01.2019).
14. Начато производство гибридного привода с маховиком «Gyrodrive»// icarbio. URL: <http://icarbio.ru/news/2014/november/gyrodrive.html> (дата обращения: 25.01.2019).
15. Başaran S., Sivrioğlu S. Adaptive control of a novel hybrid magnetic bearing flywheel system for use in momentum exchange devices // IEEE. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). 2013. P. 55–60. DOI: 10.1109/RAST.2013.6581272.
16. Характеристики и сферы применения маховичных накопителей энергии // Перспективные технологии. URL: <http://www.energovector.com/files/ev02-2017.pdf> (дата обращения: 25.01.2019).
17. Попов А. Ю., Госина К. К., Петров И. В., Макарова А. Е., Балова Д. Г., Пепеляев А. В. Классификация, состав, достоинства и недостатки многокомпонентных композитных материалов // Омский научный вестник. 2015. № 3 (143). С. 42–46.
18. Рогов В. А., Шкарупа М. И., Велис А. К. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 2. 41–49.
19. Сеницын В. Ф., Джафаров М. Н., Оганисян М. А. Имитационная модель машины для сводки древостоя // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 11. С. 162–166.
20. Сохранение энергии при помощи маховика // Ресурсосбережение и энергоэффективность на строительном форуме. URL: <http://building-forum.ru/energoberezhenie/mahovik.php> (дата обращения: 25.01.2019).

УДК 62-83:681.532.55

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБОБЩЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

А. В. Бубнов, А. Н. Четверик, А. Н. Чудинов
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация. В статье приведена разработанная обобщенная компьютерная модель электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости. Модель разработана с использованием модели импульсного частотно-фазового дискриминатора с дополнительными функциональными возможностями. Это позволяет исследовать наиболее эффективные, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования, способы управления данным электроприводом. Приведена классифика-

ция способов синхронизации и фазирования. Приведена классификация вариантов применения импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями.

Ключевые слова: ошибка по частоте вращения, фазовая автоподстройка частоты вращения, электропривод.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-59-64

I. ВВЕДЕНИЕ

Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ) и электроприводы с фазовой синхронизацией (ЭПФС) широко используются в робототехнических комплексах, обзорно-поисковых и сканирующих системах и устройствах, регистрирующих и лентопротяжных устройствах, копировальных установках, полиграфических машинах. В основе ССЭ и ЭПФС лежит принцип фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Применение указанных электроприводов, в основном определяется высокой точностью в широком диапазоне регулирования угловой скорости (точность регулирования по углу – единицы угловых секунд, точность по угловой скорости – порядка 0,001%) [1].

Для реализации принцип фазовой автоподстройки частоты в качестве задающего сигнала используются импульсный частотный сигнал $f_{оп}$, который генерируется с помощью кварцевого генератора, в качестве сигнала обратной связи применяют частотный сигнал $f_{ос}$, который генерируется на выходе импульсного датчика частоты (ИДЧ) вращения; а для организации процесса сравнения этих сигналов используют логическое устройство сравнения (ЛУС), реализуемый в виде импульсного частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД).

Применение указанного принципа фазовой автоподстройки частоты [2, 3], позволяет обеспечить высокую точность стабилизации угловой скорости, при относительно более простой схеме управления и не такой высокой стоимости компонентов системы управления, как при применении полностью цифровых систем управления электроприводом [4].

Функциональная схема ССЭ, использующего принцип ФАПЧ, приведена на рис.1, где БЗЧ – блок задатчика частоты, КУ – корректирующее устройство, БОФР – блок определения фазового рассогласования, СП – силовой преобразователь, ЭД – электродвигатель, ИДЧ – импульсный датчик частоты вращения, ФР – фазированный регулятор, ДП – датчик положения, ЛУС – логическое устройство сравнения, БР – блок регулирования.

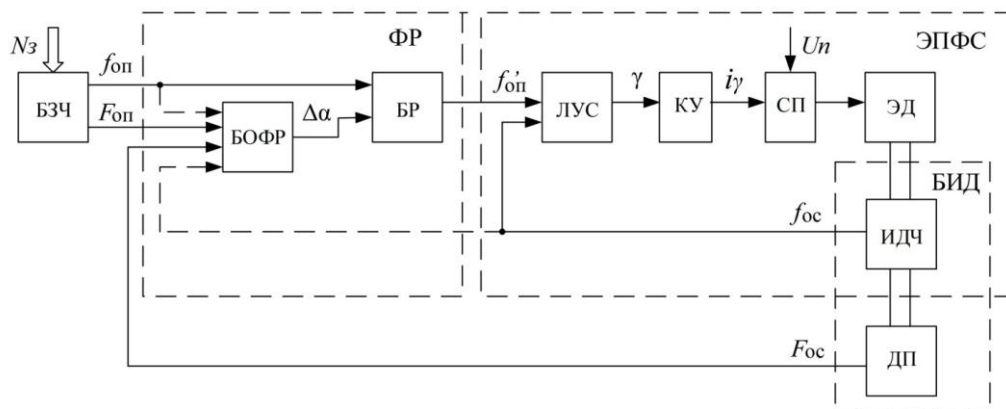


Рис. 1. Функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В процессе синхронизации на заданной угловой скорости в ЭПФС и ССЭ происходит перерегулирование по угловой скорости, что негативно влияет на динамику электропривода. Для уменьшения перерегулирования по и повышения быстродействия ЭПФС и ССЭ используются различные способы управления электроприводом.

Для реализации наиболее эффективных, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования ССЭ, способов управления электроприводом в качестве ЛУС необходимо использовать импульсный частотно-фазовый дискриминатор с дополнительными функциональными возможностями: индикацией

режима работы ИЧФД, моментов времени прохождения двух импульсов одной частоты между двумя импульсами другой частоты (моментов изменения углового рассогласования на – угловое расстояние между метками импульсного датчика частоты, где z – число меток ИДЧ) и возможностью принудительной установки ИЧФД в требуемый режим работы.

Классификация вариантов применения дополнительных возможностей импульсного частотно-фазового дискриминатора в системах управления ЭПФС и ССЭ приведена на рис. 2.



Рис. 2. Классификация вариантов применения импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями

III. ТЕОРИЯ

Эффективным методом исследования электроприводов является метод имитационного компьютерного моделирования [5]. Особенности компьютерного моделирования ССЭ определяются наличием в модели ЭПФС многозначной статической нелинейности. При формировании компьютерной модели ЭПФС и внутреннего контура регулирования в ССЭ могут быть использованы две модели импульсного частотно-фазового дискриминатора:

- с представлением ИЧФД в виде многозначной статической нелинейности с линеаризацией широтно-импульсного модулятора в области высоких частот вращения;
- с представлением ИЧФД в виде логической структуры, учитывающей импульсный характер сравниваемых частотных сигналов.

У каждого из подходов к разработке компьютерной имитационной модели есть свои отличительные особенности. При создании компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора, за основу берется полная модель [11] ИЧФД. При этом отсутствует модель нелинейного элемента, которая бы позволяла моделировать известные способы управления ЭПФС, т.к. в существующих моделях нет индикации состояния нелинейного элемента, (моментов изменения углового рассогласования на) и удобного способа его принудительной установки в требуемый режим.

Целью работы является разработка обобщенной компьютерной модели электропривода, построенного на основе принципа ФАПЧ, с использованием модели ИЧФД (многозначной статической нелинейности с линеаризованным широтно-импульсным модулятором), позволяющей моделировать известные способы управления данным электроприводом при минимизации затрачиваемого на процесс компьютерного имитационного моделирования машинного времени.

На рис. 3 представлена разработанная в Simulink программного пакета Matlab модель нелинейного элемента (ИЧФД) с дополнительными функциональными возможностями: индикацией режима работы нелинейного элемента, моментов изменения углового рассогласования на и с возможностью принудительной установки ИЧФД в требуемый режим.

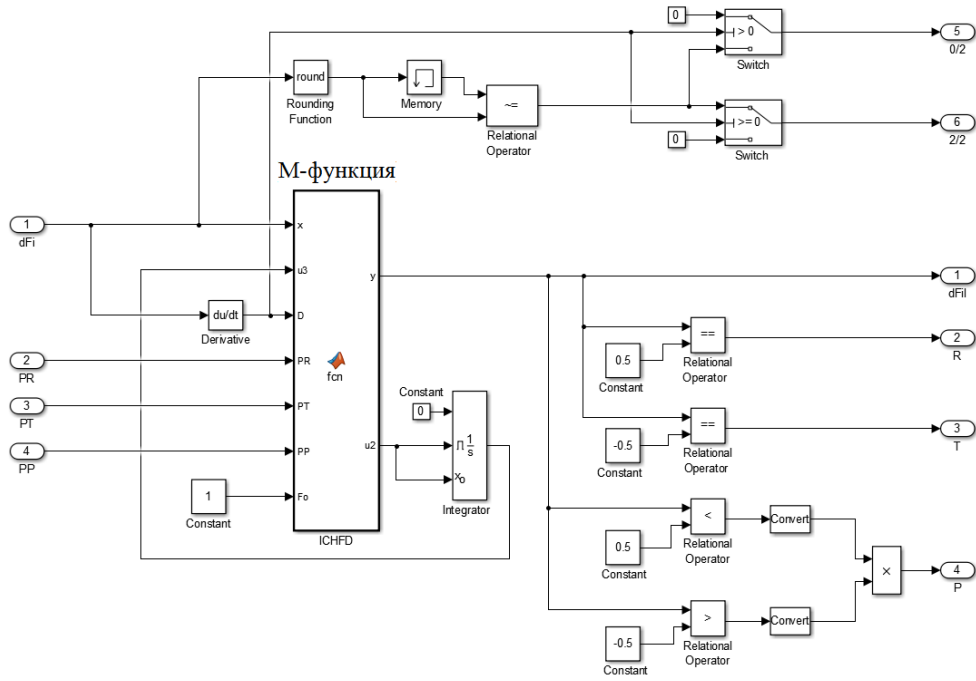


Рис. 3. Модель ИЧФД с дополнительными функциональными возможностями

На рис.4 представлен алгоритм работы программной части (М-функция) созданной компьютерной модели ИЧФД.

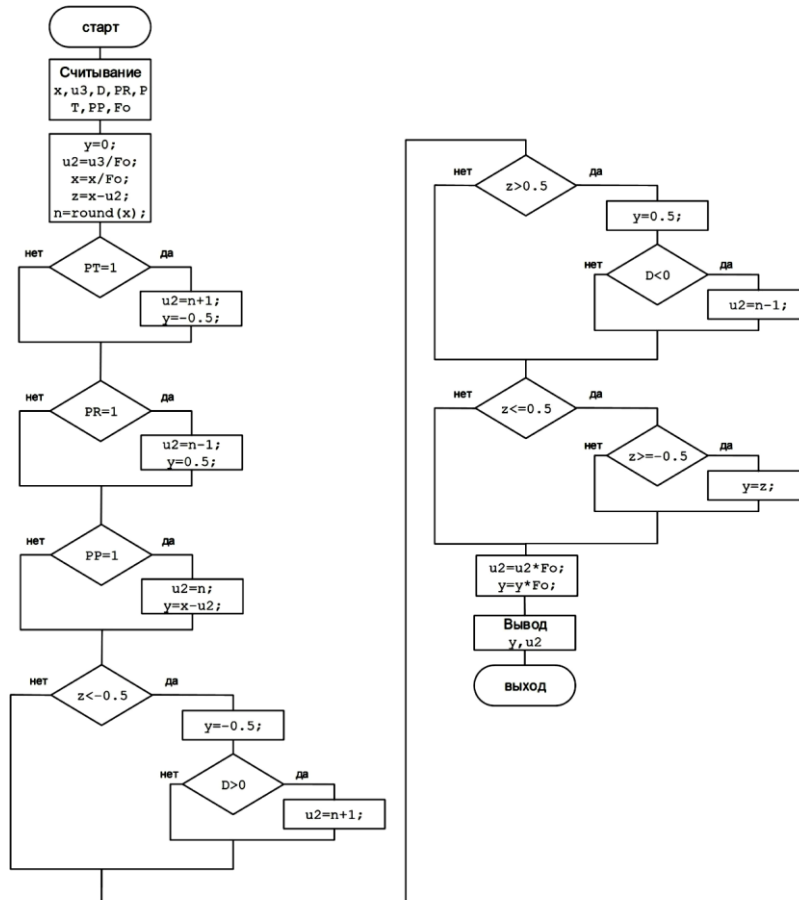


Рис. 4. Алгоритм программы М-функции ИЧФД

Данный алгоритм позволяет принудительно устанавливать импульсный частотно-фазовый дискриминатор в требуемый режим работы (режимы насыщения и пропорциональный режим работы).

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки разработанной модели ИЧФД, было проведено имитационное моделирование оптимального по быстродействию способа регулирования ССЭ с помощью модели представленной на рис.8, построенной на базе линеаризованной математической модели [6].

В результате моделирования получены: фазовый портрет (рис. 5), временная диаграмма углового рассогласования (рис. 6) и временная диаграмма индикации моментов изменения углового рассогласования на величину Φ_0 (рис. 7), соответствующую прохождению двух импульсов одной частоты между двумя импульсами другой частоты. Полученные результаты полностью соответствуют теории прецизионного ССЭ и результатам компьютерного имитационного моделирования оптимального по быстродействию способа регулирования ССЭ с применением модели учитывающей импульсный характер системы управления.

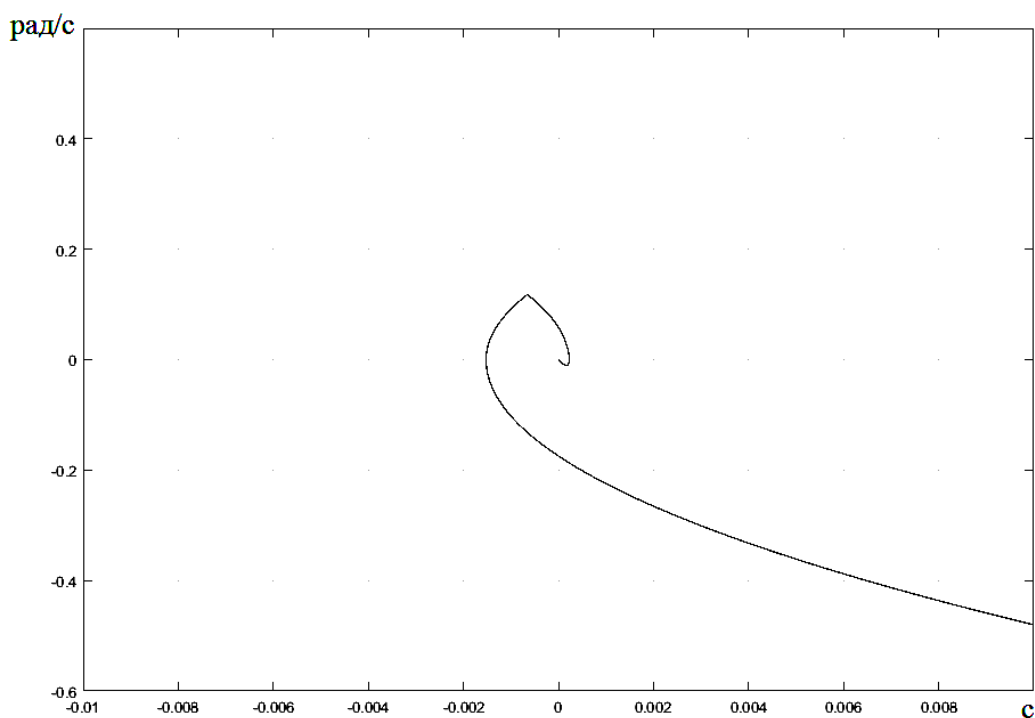


Рис. 5. Фазовые портрет синхронизации

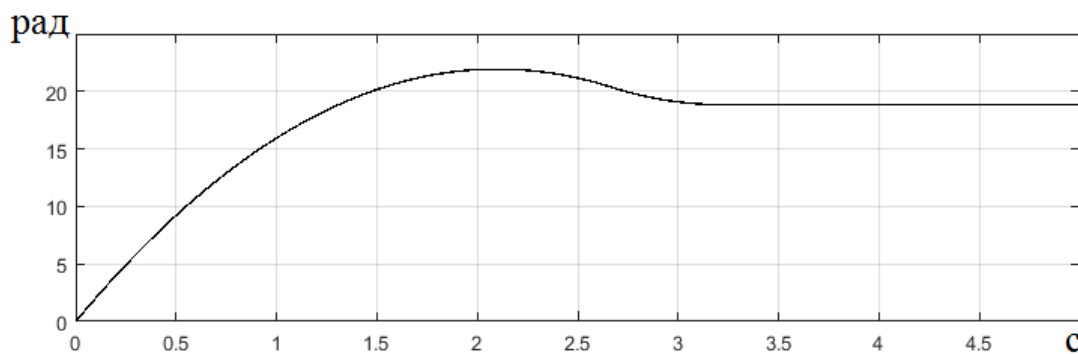


Рис. 6. Временная диаграмма углового рассогласования

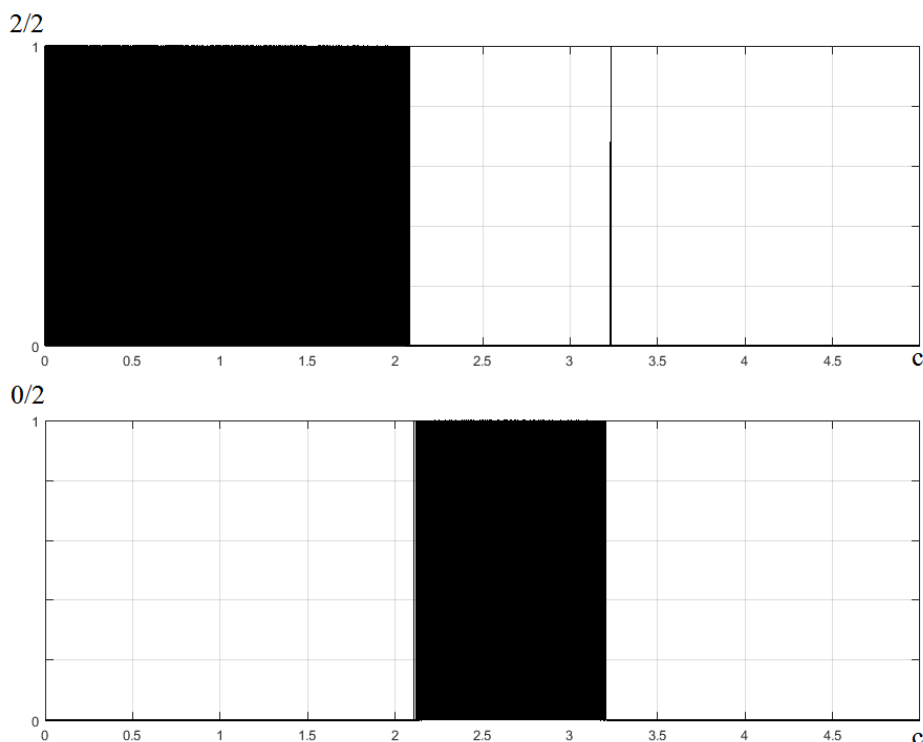


Рис. 7. Временная диаграмма индикации моментов изменения углового рассогласования на Φ_0

На рис. 7 область закрашенная черным – это несколько тысяч импульсов, появляющихся на выходах 2/2 и 0/2 блока ИЧФД при изменении рассогласования по углу на Φ_0 . Эти импульсы могут использоваться для определения углового положения и угловой скорости электродвигателя.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная компьютерная модель электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости, созданная на основе модели ИЧФД с дополнительными функциональными возможностями, позволяет исследовать наиболее эффективные, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования ССЭ и ЭПФС, способы управления электроприводом. При этом затрачивается на порядок меньше машинного времени, что ускоряет исследование ССЭ и ЭПФС в областях высоких частот вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнов А. В. Вопросы теории и проектирования прецизионных синхронно-синфазных электроприводов постоянного тока: моногр. Омск, 2005. 190 с.
2. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-locked loop in constant speed control system for the flywheel motor //Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 129. P. 323–330.
3. Lanza P. T., Shtessel Y. B., Stensby J. L. Improved acquisition in a phase-locked loop using sliding mode control techniques // Journal of the Franklin Institute. 2015. № 352 (10). С. 4188–4204.
4. Балковой А. П., Цаценкин В. К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: МЭИ, 2010. 328 с.
5. Ramirez-Figueroa F. D., Pacas M. Model based control of a PMSM with variable switching frequency and torque ripple control // Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE. Yokohama, Japan, 2015. С. 1418–1423.
6. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Федоров В. Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 104 с.