

DOI: 10.18721/JEST.25113
УДК 621.865.8 (075.8)

А.Б. Смирнов, В.Л. Жавнер

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В МЕХАТРОНИКЕ

Рассматриваются вопросы подготовки специалистов в области мехатроники и робототехники. Анализируются проблемы, возникающие при изложении дисциплин для студентов-машиностроителей. Формулируются требования к изложению материалов на базе системного подхода к проектированию технологического оборудования в машиностроении. Подчеркивается, что создание проекта высокоэффективного сложного технического изделия базируется на системном анализе, математическом моделировании и оптимизации. Техническая система как одна из разновидностей искусственной системы характеризуется преобразованием массы, энергии и информации. Мехатроника рассматривается как научно-техническое направление, базирующееся на основных естественнонаучных и технических дисциплинах. Утверждается, что следующий этап развития мехатроники – биомехатроника, в которой ведущую роль будут играть нанотехнологии в области биологии и искусственного интеллекта. Рассматриваются структурно-морфологические признаки и функциональные свойства мехатронных систем. Освещается роль технико-экономических показателей при проектировании мехатронных производственных систем, последовательность этапов проектирования.

Ключевые слова: мехатронная система, структурно-морфологические признаки, функциональные свойства, синергетика, последовательность проектирования, подготовка специалистов.

Ссылка при цитировании:

А.Б. Смирнов, В.Л. Жавнер. Научно-методические аспекты в мехатронике // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 134–142. DOI: 10.18721/JEST.25113.

A.B. Smirnov, V.L. Javner

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL ASPECTS IN MECHATRONICS

The issues of training specialists in the field of mechatronics and robotics are considered. The problems arising from teaching this set of disciplines to engineering students are analyzed. We have formulated requirements for presenting materials based on a systematic approach to design of technological equipment in mechanical engineering. It is emphasized that creating a project for a highly efficient complex technical product is based on system analysis, mathematical modeling and optimization. The technical system as one of the varieties of the artificial system is characterized by transformation of mass, energy and information. Mechatronics is considered as a scientific and technical direction based on the main disciplines of science and technology. It is argued that the next stage in development of mechatronics is biomechatronics, where nanotechnologies in the field of biology and artificial intelligence will play a leading role. Structural and morphological features and functional properties of mechatronic systems have been considered. The role of technical and economic indicators in design of mechatronic production systems and the sequence of design stages have been highlighted.

Keywords: mechatronic system, structural and morphological features, functional properties, synergy, design sequence, training specialists.

Citation:

A.B. Smirnov, V.L. Javner, Scientific and methodological aspects in mechatronics, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 134–142, DOI: 10.18721/JEST.25113.

Введение

Во многих технических вузах появляются специальности по мехатронике. Они в основном организуются на факультетах, где готовят либо механиков, либо электромехаников. На машиностроительных факультетах (институтах) для подготовки бакалавров и магистров по мехатронике и робототехнике необходимо повышать уровень подготовки по дисциплинам, связанным с электроникой, программированием и искусственным интеллектом [1–3]. К сожалению, сильные абитуриенты, увлекающиеся этими предметами, идут на профильные специальности таких факультетов, как факультет технической кибернетики или другие аналогичные. По этой причине важно найти методики, позволяющие «подтягивать» уровень знаний механиков для усвоения ими указанных дисциплин.

Цель нашей работы – определение научно-методических основ дисциплин по мехатронике. Один из методов, позволяющих повысить уровень обучения, – это когда студентам в доступной и несколько упрощенной форме показывается системный характер мехатроники [4, 5], что, на наш взгляд, наиболее эффективно можно сделать на занятиях по основам мехатроники и робототехники.

Методические аспекты обучения основам мехатроники. Системный подход в мехатронике

Дисциплина «Основы мехатроники и робототехники» относится к дисциплинам, входящим в федеральный компонент. Обязательный минимум содержания дисциплины в области мехатроники включает следующие разделы:

- предпосылки развития мехатроники и области применения мехатронных систем;
- концепция построения мехатронных систем;
- определения и терминология мехатроники;
- структура и принципы интеграции мехатронных систем;
- мехатронные модули движения;
- современные мехатронные системы;
- проблематика и современные методы управления мехатронными модулями и системами.

В одном из самых известных учебных пособий по основам мехатроники [6], написанном Ю.В. Подураевым, этим разделам уделяется большое внимание, во многих разделах фигурируют такие понятия, как мехатронная система, анализ мехатронных систем, синергетика и т. д. Однако для усвоения концепции построения мехатронных систем и принципов интеграции у студентов-механиков явно отсутствуют знания по теории систем и системному анализу. По этой причине на одной из первых лекций желательно давать элементы этой теории. Среди серьезных работ по этому предмету можно указать на книги [7, 8]. К сожалению, мощный логический и математический аппарат теории систем невозможно в полном объеме дать нашим студентам. Важно подчеркнуть, что знания по системному анализу пригодятся студентам при работе над дипломным проектом, т. к. обычно в задании на выпускную квалификационную работу необходимо разработать какую-либо сложную техническую систему, дать ее анализ, применив метод декомпозиции.

Для любого сложного изделия применимо понятие *системы*. Под системой понимают определенное во времени и пространстве множество элементов с известными свойствами и упорядоченными связями между элементами [9]. Система функционирует, взаимодействуя с другими объектами, объединенными понятием «*внешняя среда*». Техническая система как одна из разновидностей искусственной (т. е. созданной человеком) системы характеризуется преобразованием массы, энергии и информации (рис. 1). Основным действием технической системы является преобразование того или иного объекта или свойства. Концепция системного подхода к проектированию заключается в том, что система не должна рассматриваться как простая сумма элементов или подсистем. Создание проекта высокоэффективного сложного технического изделия (космический корабль, автомобиль, технологический автомат и т. д.) имеет в основе [10]:

- системный анализ;
- математическое моделирование;
- оптимизацию.

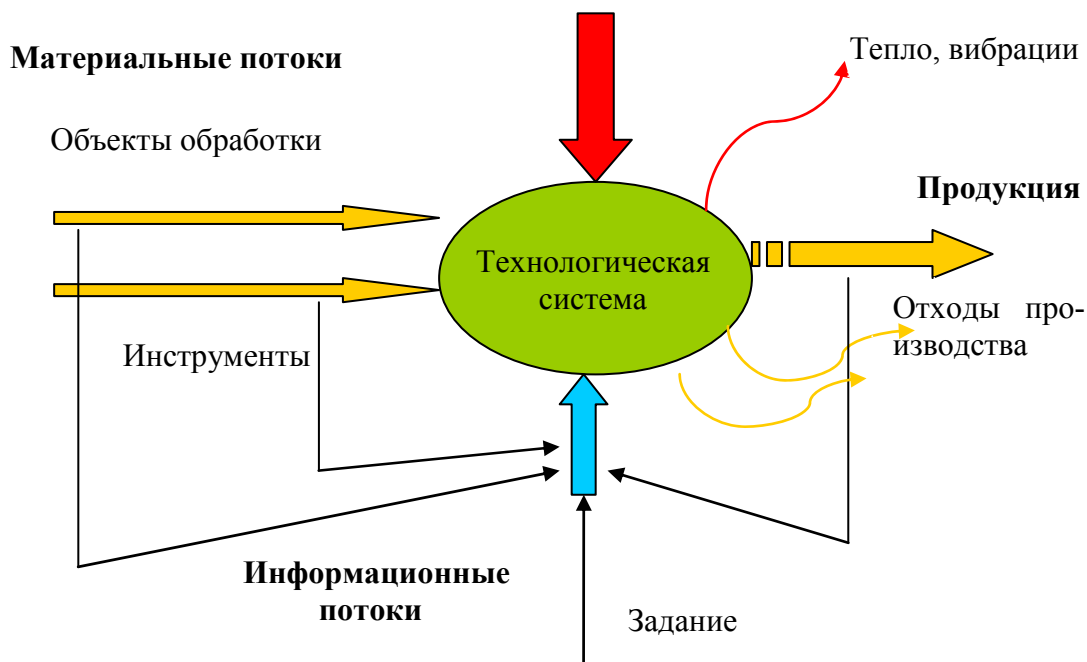


Рис. 1. Поток в технологической системе
 Fig. 1. Flow in the process system

После усвоения этого материала можно легко перейти к понятиям «мехатронная система», «синергетическое объединение» и др. Например, как приведено в [11], мехатронным объектам характерно иерархическое построение. Все мехатронные объекты можно разделить на следующие: мехатронные узлы, мехатронные модули, мехатронные агрегаты, мехатронные системы. *Мехатронный модуль* – основная единица мехатронной системы; это унифицированный мехатронный объект, служащий для реализации одной из функций создаваемой системы (например, мехатронный модуль подачи инструмента, мотор-шпиндель).

Любая система характеризуется входом и выходом. У мехатронных объектов на входе – информационное задание, на выходе – полезное *механическое* воздействие на внешнюю среду (к таким воздействиям можно отнести не только силы и моменты, перемещения, но и давление газа и жидкости, дозы веществ и т. д.). Для понимания этих терминов можно привести следующий пример. В любом компьютере винчестер – это типичный мехатрон-

ный модуль. Встает вопрос: является ли компьютер мехатронной системой? Очевидно, что компьютер нельзя считать мехатронной системой, так как в нем полезным выходным воздействием на внешнюю среду является информация, а не механическое воздействие.

Данную классификацию можно дополнить терминами, применяемыми в приборостроении. *Мехатронный аппарат* – это мехатронный объект, который осуществляет физическое (механическое) воздействие на внешнюю среду (например, аппарат искусственного кровообращения, рентгеновский томограф, где необходимы сложные согласованные движения излучающей головки). *Мехатронный прибор* – это мехатронный объект, осуществляющий измерение механических параметров внешней среды.

По поводу термина «синергетика», которое пришло из медицины, можно считать следующее. *Синергетика* (от греческого «synergos» – «вместе действующий») – совместное и однородное функционирование элементов и систем, при комбинированном действии которых эффект превышает сумму действий всех

в отдельности. Например, известные лекарства тетрациклин и нистатин дают хороший эффект при лечении только при одновременном применении, устраняя нежелательные эффекты. Иными словами, соединение в единую систему элементов дает эффект больший, чем использовании всех этих элементов по отдельности. В качестве технического примера можно привести следующее. Что нового дает совмещение в единую систему автомашины, предназначенной для перевозки тяжелых грузов, и подъемного крана для подъема тяжелых грузов? Автокран имеет новое качество – мобильность производства подъемно-транспортных работ. Также по аналогии мехатронные системы должны давать новое качество.

В «Основах мехатроники и робототехники» важно показать, что мехатроника как научно-техническое направление базируется на основных естественнонаучных и технических дисциплинах (рис. 2). Очевидно, что в XXI веке следующим этапом развития мехатроники станет биомехатроника, в которой огромную

роль будут играть нанотехнологии в области биологии и искусственного интеллекта.

С методической точки зрения существенно понимание основных признаков и свойств мехатронных объектов. Поэтому необходимо показать различия между ними. Для любых сложных систем признаки и свойства являются важнейшими информационными блоками, характеризующими систему. *Признак* – это качество, внешнее проявление, по которому можно отличить объект от других. Совокупность признаков позволяет идентифицировать, выделить данный объект, систему среди других объектов, имеющих множество качеств. *Свойство* – это качество, присущее данному объекту, системе. Свойства системы можно количественно описать параметрами и характеристиками объекта, системы. *Параметры* – это величины, характеризующие признаки и свойства объекта, системы. *Характеристики* – это в общем смысле описание свойств объекта; для описания технических характеристик объекта используют зависимости (или функции) одних параметров объекта (системы) от других.

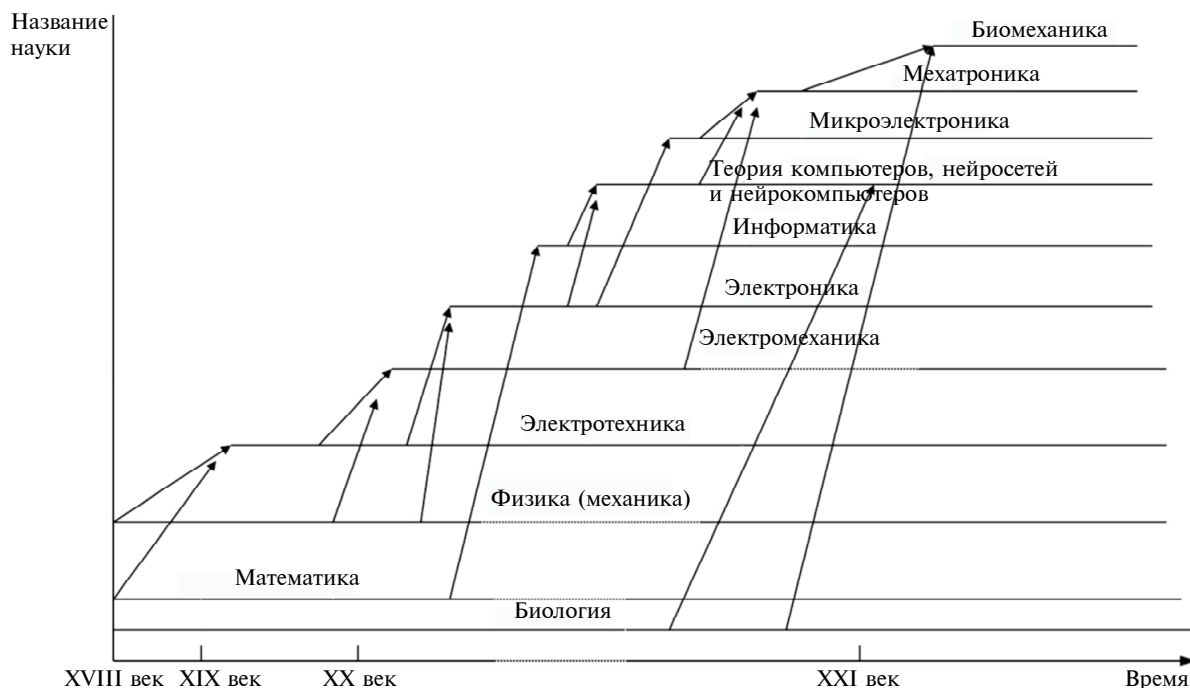


Рис. 2. Базовые науки и дисциплины мехатроники
 Fig. 2. The emergence of basic sciences and disciplines mechatronics in time

Проще всего понятия признака и свойств формируется в медицине. Так, признаками начинающегося гриппа служат головная боль, слабость, озноб, повышенная температура, ощущение сухости в носу и т. д. Объективными параметрами признаков являются температура, повышенная скорость оседания эритроцитов. Здесь важно отметить, что для такой сложной системы, как человек, эти признаки могут быть в наличии не все одновременно, а только некоторые из них. К свойствам гриппа можно отнести заразность, возможные осложнения. Характеристикой протекания болезни является график зависимости температуры пациента от времени, параметром – период времени, когда больной заразен.

Признаки и функциональные свойства мехатронных систем

Анализ признаков мехатронной системы лучше всего начинать со *структурно-морфологических признаков*, т. е. признаков, отличающих структуру и строение элементов мехатронной системы от другой технической системы, построенной по другим принципам [12]. Для этих систем характерно следующее:

1. Главный признак – интеграция (структурно-функциональная и структурно-компоновочная) подсистем: механической, электро-механической, микропроцессорной и информационно-измерительной при программном обеспечении и управлении всей системы.

2. Как правило, имеет место большое количество элементов и обратных связей в системе управления, т. е. наличие большого числа датчиков, дающих информацию о различных параметрах состояния системы.

3. Иерархическая структура системы управления, включая возможность внешнего управления через различные средства электронной связи (в том числе через интернет).

4. Модульность всех элементов системы и высокая степень унификации (в том числе возможность наращивания программных модулей).

5. Укороченные и упрощенные кинематические цепи механической и электро-механической подсистем, а также использование параллельных кинематических цепей.

6. Использование высокоточных механических передач в механической подсистеме.

7. Применение разнообразных видов преобразователей энергии, основанных на различных физических эффектах.

8. Использование новых материалов с повышенными механическими и электро-механическими характеристиками.

9. Часто число степеней подвижности в системе превышает необходимое, определяемое наличием дополнительных приводов.

10. Использование электронных миниатюрных компонентов со сверхплотным монтажом.

11. Наличие высокоинформационного интерфейса «человек–машина».

12. Использование бионических принципов построения системы.

Свойства мехатронных систем сильно зависят от их назначения, однако можно найти и общие свойства. *Функциональные свойства* следующие:

повышение доли функций системы, относящихся к системе управления, и уменьшение доли функций, приходящихся на механическую подсистему;

увеличение вариативности функций, выполняемых системой за счет программного обеспечения;

автоматизация переналадки системы;

автоматизация технической диагностики и мониторинг работоспособности всех подсистем;

повышение интеллектуальности программного обеспечения, внедрение искусственного интеллекта.

К свойствам *надежности и качества* мехатронных систем можно отнести следующие:

1. Высокое качество исполнения сложных и точных движений благодаря применению методов адаптивного и интеллектуального управления.



Рис. 3. Последовательность проектирования мехатронного технологического оборудования
 Fig. 3. The sequence of the design of mechatronic process equipment

2. Высокая помехозащищенность за счет модульности подсистем.

3. Компактность мехатронных модулей вследствие миниатюризации и укорочения кинематических цепей.

4. Повышение удельной мощности и улучшение динамических характеристик машин благодаря укорочению кинематических цепей и исключению многоступенчатого преобразования энергии и информации.

5. Возможность быстрого комплектования функциональными модулями мехатронных систем, допускающих простую реконфигурацию в зависимости от технических требований.

6. Повышение надежности системы в целом за счет сокращения доли механических подсистем и изменения программным путем функций механической и электромеханической подсистем, а также за счет мониторинга состояния всех элементов системы.

7. Относительно низкая стоимость в силу высокой степени интеграции, унификации и стандартизации всех компонентов мехатронных систем.

Последовательность проектирования и эффективность мехатронных систем

В курсе лекций по мехатронике и робототехнике необходимо подчеркнуть, что для разработки мехатронных систем с указанными качествами важно правильно выбрать последовательность действий (рис. 3). Для производственных машин на первом этапе задаются технологические задачи и определяются цели проектирования. На втором этапе разрабатывается технологический процесс. На третьем этапе производится моделирование процесса, определение его численных характеристик и допустимых предельных отклонений, поиск и выбор особых или критических точек. На четвертом этапе разрабатываются требования к системам: измерительно-информационной (ИИС), приводов (СП), управления (СУ) и к программному обеспечению (ПО). Пятый этап связан с разработкой перечисленных выше систем и программного обеспечения. Кроме того, на этом этапе разрабатываются и отдельные специальные модули, в том числе и мехатронные

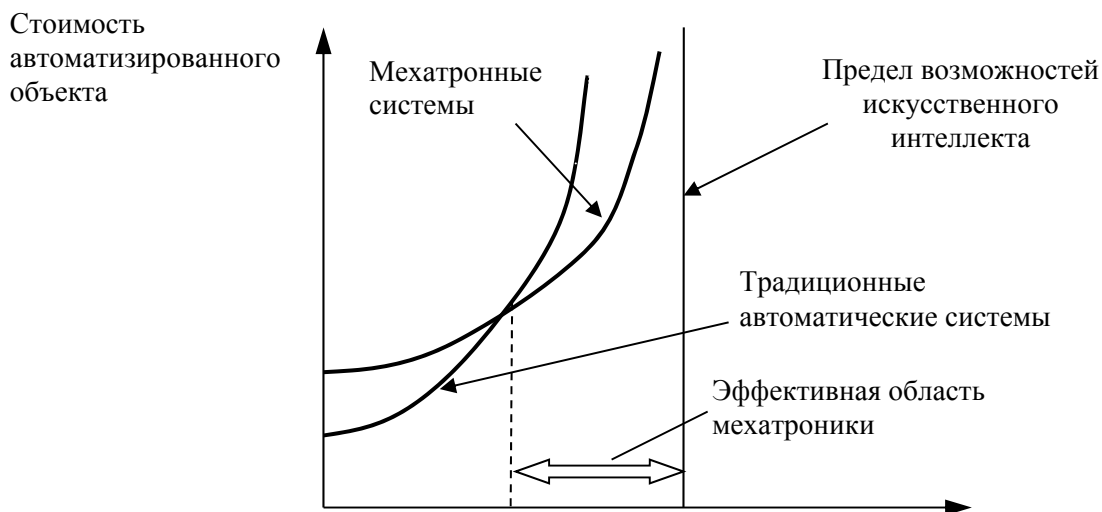


Рис. 4. Область эффективного применения мехатронных систем
 Fig. 4. Scope of effective application of mechatronic systems

предназначенные только для данного конкретного оборудования. На последнем этапе производится конструктивное оформление изделия в соответствии со стандартными нормами [13].

В «Основах мехатроники» желательны осветить экономические аспекты использования мехатронных объектов. Для любых отраслей хозяйства встает вопрос об *экономической целесообразности* разработки и использования мехатронных систем. Для разработки новых технических систем, в том числе мехатронных, необходимо иметь потребность в них, т. е. должна быть экономическая целесообразность их создания и производства [14, 15]. Она в первую очередь зависит от степени использования функциональных возможностей объектов, т. е. от того, насколько рационально выбрана та или иная концепция автоматической системы. Анализ экономических показателей при создании новых технических объектов дает следующую качественную зависимость стоимости объекта от его технических возможностей (рис. 4).

Предел технических возможностей определяется возможностями искусственного интеллекта. Мехатронные системы становятся более эффективными по сравнению с традиционными автоматическими системами только при

высоких функциональных и технических требованиях к ним. Логический вывод: современном этапе экономически выгодно использовать принципы мехатроники для технических систем, выполняющих сложные задачи, в простых же случаях внедрять интегрированные системы не всегда целесообразно.

Заключение

Изложенные аспекты методики позволяют, на наш взгляд, улучшить понимание принципов построения мехатронных систем. Необходимо четко структурировать основные понятия мехатроники, признаки и свойства мехатронных систем. Анализ базисных наук, на которые опирается мехатроника, дает возможность составить объективную картину развития мехатроники как научно-технического направления в целом, предсказать наиболее перспективные технические решения. Важным фактором эффективности применения мехатронных систем служит оценка экономической целесообразности применения мехатронных систем. Рациональная последовательность их проектирования позволяет грамотно использовать ресурсы автоматизации машиностроения и ускорить процесс разработки.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mechatronics Technology – LabVolt [Электр. ресурс]. URL: https://www.labvolt.com/downloads/89804_00.pdf (Дата обращения 01.12.2018).
2. Development of Mechatronics Engineering Degree Program – IJEE [Электр. ресурс]. URL: <https://www.ijee.ie/articles/Vol19-4/IJEE1423.pdf> (Дата обращения 01.12.2018).
3. **Krasinsky A.Ya., Krasinskaya E.M.** The role of theoretical mechanics in training specialists in the field of mechatronics and robotics [Электр. ресурс]. URL: <http://engjournal.ru/articles/1346/eng/1346.pdf> (Дата обращения 01.12.2018).
4. **Memis Acar.** Mechatronics Challenge for the Higher Education World [Электр. ресурс]. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/27170/1/Mechatronics%20Challenge%20for%20HE%20World.pdf> (Дата обращения 01.12.2018).
5. **Yevhenii O. Modlo, Serhiy O. Semerikov, Ekaterina O. Shmeltzer.** Modernization of Professional Training of Electromechanics Bachelors: ICT-based Competence Approach [Электр. ресурс]. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2257/paper15.pdf> (Дата обращения 01.12.2018).
6. **Подураев Ю.В.** Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2007. 256 с.
7. **Klaus Janschek.** Mechatronic Systems Design: Methods, Models, Concepts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 805 p.
8. **Волкова В.Н., Денисов А.А.** Теория систем и системный анализ. М.: Изд-во Юрайт, 2017. 462 с.
9. **Дитрих Я.** Проектирование и конструирование: Системный подход / Пер. с польск. М.: Мир, 1981. 456 с.
10. **Гайкович А.И.** Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Т 1. СПб.: НИЦ «МОРИНТЕХ», 2014. 822 с.
11. **Аршанский М.М., Шалобаев Е.В.** Мехатроника: основы глоссария // Мехатроника. 2003. № 4. С. 47–48.
12. **Жавнер В.Л., Смирнов А.Б.** Мехатронные системы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 131 с. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/3879.pdf/view> (Дата обращения 01.12.2018).
13. **Жавнер В.Л., Смирнов А.Б.** Мехатронные принципы проектирования технологического оборудования // Конструктор-машиностроитель. 2008. № 3. С. 12–15.
14. **Patrick O.J.** Kaltjob. Mechatronic Systems and Process Automation: Model-Driven Approach and Practical Design Guidelines. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018. 447 p.
15. **Harald Sporer.** Mechatronic System Development: an Automotive Industry Approach for Small Teams: Doctoral Thesis / Graz, March 2016. [Электр. ресурс]. URL: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=5891c8351e03a&location=browse> (Дата обращения 01.12.2018).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СМИРНОВ Аркадий Борисович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: 123smirnov@list.ru

ЖАВНЕР Виктор Леонидович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: vjavner@outlook.com

Дата поступления статьи в редакцию: 25.01.2019

REFERENCES

- [1] Mechatronics Technology – LabVolt : https://www.labvolt.com/downloads/89804_00.pdf (Accessed 01.12.2018).
- [2] Development of Mechatronics Engineering Degree Program – IJEE : <https://www.ijee.ie/articles/Vol19-4/IJEE1423.pdf> (Accessed 01.12.2018).
- [3] **Krasinsky A.Ya., Krasinskaya E.M.** The role of theoretical mechanics in training specialists in the field of mechatronics and robotics. URL : <http://engjournal.ru/articles/1346/eng/1346.pdf> (Accessed 01.12.2018).
- [4] **Memis Acar.** Mechatronics Challenge for the Higher Education World URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/27170/1/Mechatronics%20Challenge%20for%20HE%20World.pdf> (Accessed 01.12.2018).
- [5] **Yevhenii O. Modlo, Serhiy O. Semerikov, Ekaterina O. Shmeltzer.** Modernization of Professional Training

of Electromechanics Bachelors: ICT-based Competence Approach. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2257/paper15.pdf> (Accessed 01.12.2018).

[6] **Podurayev Yu.V.** Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye [Mechatronics: bases, methods, application]. M.: Mashinostroyeniye, 2007. 256 s. (rus.)

[7] **Klaus Janschek.** Mechatronic Systems Design: Methods, Models, Concepts. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. 805 p.

[8] **Volkova V.N., Denisov A.A.** Teoriya sistem i sistemnyy analiz [Systems Theory and Systems Analysis]. M.: Izdatelstvo Yurayt, 2017. 462 s. (rus.)

[9] **Ditrikh Ya.** Proyektirovaniye i konstruirovaniye: Sistemnyy podkhod [Design and construction: a systematic approach]. Per. s polsk. M.: Mir, 1981. 456 s. (rus.)

[10] **Gaykovich A.I.** Teoriya proyektirovaniya vodoizmeshchayushchikh korably i sudov. T1 [Theory of designing displacement ships and vessels. T1]. SPb.: NITs «MORINTEKh», 2014. 822 s. (rus.)

[11] **Arshanskiy M.M., Shalobayev Ye.V.** Mekhatronika: osnovy glossariya [Mechatronics: glossary basics]. *Mekhatronika*. 2003. №4. S. 47–48. (rus.)

[12] **Zhavner V.L., Smirnov A.B.** Mekhatronnyye sistemy [Mechatronic systems]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. 131 s. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/3879.pdf/view> (Data obrashcheniya 01.12.2018). (rus.)

[13] **Zhavner V.L., Smirnov A.B.** Mekhatronnyye printsipy proyektirovaniya tekhnologi-cheskogo oborudovaniya [Mechatronic Design Principles for Technological Equipment]. *Konstruktor-mashinostroyitel*. 2008. № 3. S. 12–15. (rus.)

[14] **Patrick O.J.** Kaltjob. Mechatronic Systems and Process Automation: Model-Driven Approach and Practical Design Guidelines. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2018. 447 p.

[15] **Harald Sporer.** Mechatronic System Development: an Automotive Industry Approach for Small Teams: Doctoral Thesis. / Graz, March 2016. URL: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=5891c8351e03a&location=rowse> (Accessed 01.12.2018).

THE AUTHORS

SMIRNOV Arkadii B. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: 123smirnov@list.ru

JAVNER Viktor L. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*
E-mail: vjavner@outlook.com

Received: 25.01.2019