

УДК 51-74
DOI: 10.25559/SITITO.17.202102.392-403

Оригинальная статья

Учебно-исследовательские проекты по анализу динамического качества технических систем и процессов с использованием их математических моделей

С. Н. Стребуляев*, Д. А. Сироткина

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», г. Нижний Новгород, Российская Федерация
603022, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

* sstrebuliaev@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются некоторые аспекты процесса математического моделирования и вычислительного эксперимента. Процесс моделирования рассматривается как метод прогнозирования поведения динамических систем и процессов, позволяющий реализовывать цепочку от натурального эксперимента до вычислительного эксперимента. Особая роль в прогрессе исследований сложных технических, экологических, биологических, химических, социальных и других систем принадлежит развитию вычислительной техники. Все возрастающие возможности вычислительной техники и программного обеспечения позволяют, с использованием адекватных математических моделей, прогнозировать динамику различных систем и процессов и получать улучшенные их варианты. Представленный материал служит для закрепления специального лекционного курса по дисциплинам: «Современные проблемы прикладной математики и информатики», «Использование системы аналитических вычислений Maple для решения задач прикладной математики», «Использование информационных технологий для решения задач устойчивости», «Математические модели в естествознании», «Решение задач технических вычислений» по направлениям подготовки «Прикладная математика и информатика» и «Фундаментальная информатика и информационные технологии». Этот материал способствует более эффективному использованию вычислительной техники при решении конкретных задач динамики систем, теории колебаний и теории устойчивости движения. Решение рассматриваемых задач осуществляется с использованием системы аналитических вычислений Maple.

Ключевые слова: математическая модель, натуральный эксперимент, вычислительный эксперимент

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-41-520002 «Многокритериальные задачи оптимального управления колебаниями механических систем в условиях неопределенности».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Стребуляев, С. Н. Учебно-исследовательские проекты по анализу динамического качества технических систем и процессов с использованием их математических моделей / С. Н. Стребуляев, Д. А. Сироткина. – DOI 10.25559/SITITO.17.202102.392-403 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 392-403.

© Стребуляев С. Н., Сироткина Д. А., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Educational and Research Projects on the Analysis of the Dynamic Quality of Technical Systems and Processes Using their Mathematical Models

S. N. Strebulyaev*, D. A. Sirotkina

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation

*sstrebulyaev@mail.ru

Abstract

Some aspects of the process of mathematical modeling and computational experiment are considered. The modeling process is considered as a method of predicting the behavior of dynamic systems and processes, which allows implementing a chain from a full-scale experiment to a computational experiment. A special role in the progress of research on complex technical, environmental, biological, chemical, social and other systems belongs to the development of computer technology. The increasing capabilities of computer technologies and software make it possible, using adequate mathematical models, to predict the dynamics of various systems and processes and obtain improved versions of them. The presented material serves to consolidate a special lecture course in the disciplines: "Modern problems of applied mathematics and computer science", "Using Maple analytical computing system to solve problems of applied mathematics", "Using information technology to solve problems of sustainability", "Mathematical models in natural science", "Solving problems of technical computing" in the areas of training "Applied Mathematics and computer Science" and "Fundamental computer science and information technology". This material contributes to a more efficient use of computer technology in solving specific problems of system dynamics, oscillation theory and motion stability theory. The solution of the problems under consideration is carried out using the Maple analytical computing system.

Keywords: mathematical models, natural experiment, computer experiment

Funding: The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the research project No. 18-41-520002 "Multicriteria Problems of Optimal Control of Vibrations of Mechanical Systems under Uncertainty".

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Strebulyaev S.N., Sirotkina D.A. Educational and Research Projects on the Analysis of the Dynamic Quality of Technical Systems and Processes Using their Mathematical Models. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2021; 17(2):392-403. DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.17.202102.392-403>



Введение

Основной целью и результатом процесса обучения при современном компетентностном подходе в высшем образовании является формирование у обучающихся универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, необходимых для осуществления профессиональной деятельности [1-6]. Это основное требование современных федеральных государственных образовательных стандартов [7]. Новое понимание целей образовательного процесса требует модернизации образовательных программ [6, 8-10]. Основные методологические подходы такой модернизации были развиты при выполнении ряда образовательных отечественных и международных проектов, в частности, проектов TUNING RUSSIA [11-14] и МЕТА-МАТН [15-16], в которых активное участие принимал Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Опыт выполнения этих проектов послужил основой для разработки собственных образовательных стандартов университета в области информационно-коммуникационных технологий [5, 17-18]. Обязательным условием эффективного формирования профессиональных компетенций является самостоятельная работа обучающихся. Для ее интенсификации активно применяются электронные образовательные технологии [16, 19]. Одну из наиболее эффективных форм активизации самостоятельной работы представляет исследовательское обучение [10]. Основным принципом такого обучения является привлечение студентов к проведению самостоятельной исследовательской работы по актуальной научной проблеме, что способствует сближению образования, науки и производства. В этом случае формирование необходимых компетенций, освоение навыков и умений осуществляется в процессе решения поставленной исследовательской задачи. Для повышения эффективности процесса обучения используется работа как индивидуально с каждым студентом, так и с малыми группами студентов [20-25].

Рассматривается общая схема процесса математического моделирования, которая сформировалась у автора на основе опыта работы при решении конкретных задач прикладной математики в рамках выполненных хозяйственных и научно-технических работ, а также, при проведении лабораторных и лекционных занятий со студентами дневного и вечернего отделений института информационных технологий, математики и механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Приведены примеры решения задач по математическому моделированию и анализу динамического поведения системы металлорежущего станка с устройством числового программного управления (УЧПУ) и системы электропривода. Дается описание колебательных процессов, рассматриваются расчетные схемы, математические модели и программные средства, позволяющие проводить вычислительный эксперимент.

Материалы и методы

Основными этапами в процессе математического моделирования (ММ), с которыми сталкиваются специалисты (Рис. 1) в этой области являются следующие: «натурный эксперимент (экспериментальные исследования изучаемого объекта или

процесса) – расчетная схема – математическая модель – алгоритм и программное обеспечение – идентификация структуры и параметров модели – вычислительный эксперимент (анализ результатов расчета на ЭВМ)».



Р и с. 1. Общая схема процесса математического моделирования
F i g. 1. General scheme of the process of mathematical modeling

В настоящее время получило широкое распространения методология математического моделирования и вычислительного эксперимента. Эта методология охватывает многие сферы, от разработки комплексов технических систем и управления ими до анализа сложных экономических, биологических, социальных и ряда других систем и процессов. Математическое моделирование развивается в недрах фундаментальных наук: механике и физике, которые отличает наивысший уровень теоретических исследований. Здесь основное внимание уделяется разработке эффективных, легко программируемых численных методов и созданию диалогового, гибкого программного обеспечения. При исследовании ряда новых процессов и систем необходимо построение адекватных математических моделей и проведение расчетов на ЭВМ, то есть проведение поискового вычислительного эксперимента. Вопрос об адекватности математической модели является очень важным, требующем



высокой квалификации исследователей. Анализ адекватности математической модели реальному изучаемому объекту или процессу должен включаться в алгоритм и разрабатываемое программное обеспечение.

Динамика роста вычислительных возможностей современных компьютеров достаточно высока и позволяет надеяться на успешное решение все более сложных задач. Наряду с языками программирования, появились и системы аналитических вычислений (САВ): Maple, Mathematica, Matlab и другие. Использование САВ (систем компьютерной алгебры с расширенными возможностями в области символьных вычислений) еще в большей степени, чем языки программирования, позволяет автоматизировать процесс написания программного обеспечения. Кроме основного блока, позволяющего рассчитывать с использованием математической модели характеристики изучаемого объекта, необходимо также иметь вычислительные блоки, осуществляющие анализ зависимостей полученных на ЭВМ характеристик от большого количества конструктивных параметров изучаемой системы. В этом случае особо эффективным показал себя способ анимации.

Особое место среди САВ занимает система Maple. Системы компьютерной математики класса Maple были созданы корпорацией Waterloo Maple, Inc. (Канада) как системы компьютерной алгебры с расширенными возможностями в области символьных вычислений. Maple — типичная интегрированная система. Она объединяет в себе:

- мощный язык программирования;
- редактор для подготовки и редактирования документов и программ;
- современный многооконный пользовательский интерфейс с возможностями работы в диалоговом режиме;
- мощную справочную систему со многими тысячами примеров;
- ядро алгоритмов и правил преобразования математических выражений;
- численный и символьный процессоры;
- систему диагностики;
- библиотеки встроенных и дополнительных функций;
- пакеты функций сторонних производителей и поддержку некоторых других языков программирования и программ.

При рассмотрении большого числа публикаций, посвященных описанию САВ Maple, часто употребляется термин «...мощный язык, справочная система...» и другие, что на самом деле соответствует действительности. Опыт работы автора настоящей работы подтверждает это. Например, при решении ряда сложных задач динамики систем, связанных с преобразованием громоздких выражений, пришлось отказаться от использования языка программирования Fortran в пользу системы аналитических вычислений Maple.

Как правило, при работе с заказчиком проекта, ставится задача об улучшении показателей качества уже функционирующего объекта или процесса (прототипа) с использованием математических моделей. При этом показатели качества, которые необходимо улучшить и параметры конструкции, подлежащие изменению, частично определяет заказчик. Хотя в процессе работы могут возникнуть совершенно неожиданные варианты при выборе указанных выше параметров. Кроме того, часто, отдельные рассчитываемые показатели вступают в противоречие друг с другом (например, жесткость и виброустойчивость металлорежущего станка и его масса), что приводит к необходимости использовать методы многокритериальной, многопараметрической оптимизации, когда в результате исследований получаем конечное множество оптимальных вариантов конструкции объекта или процесса. С учетом большого количества варьируемых параметров, даже при возросших возможностях средств вычислительной техники, хорошо себя зарекомендовал метод поиска чувствительных параметров. При этом определяются параметры системы, вносящие наибольший вклад в изменение того или иного показателя качества, что уменьшает пространство варьируемых параметров и позволяет более эффективно использовать методы многокритериальной многопараметрической оптимизации.

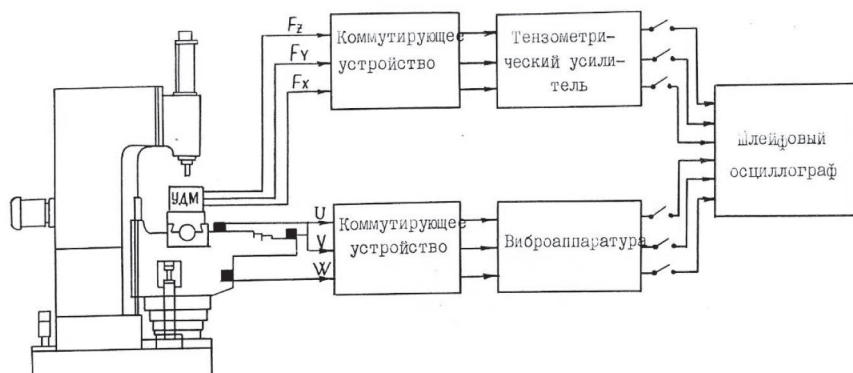
Результаты

Реализация схемы (Рис. 1) процесса моделирования проведена на примере математического моделирования колебательных процессов, возникающих при работе вертикально-фрезерного консольного станка (ВФКС) с устройством числового программного управления (УЧПУ). Из всего парка станочного оборудования эти станки наиболее сильно подвержены вибрациям из-за специфики их компоновки и периодичности процесса фрезерования, что препятствует повышению качества обработанной поверхности и производительности. Особенность работы станков с УЧПУ состоит в том, что их динамические характеристики должны учитываться не только при проектировании и изготовлении станка, но и в процессе его эксплуатации при подготовке управляющих программ.

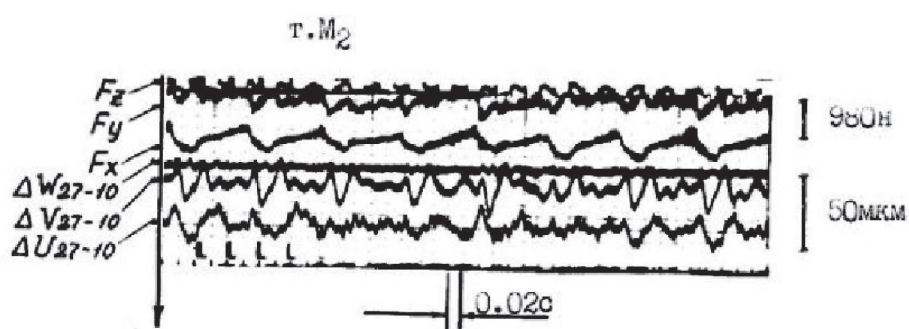
На первом этапе процесса математического моделирования проводятся экспериментальные исследования (Рис. 2) по определению колебательных характеристик объекта в целом и его отдельных узлов, а также выявлению особенностей его поведения в различных режимах. При этом фиксация его характеристик проводится путем ввода информации (Рис. 3) в ЭВМ и последующего анализа.

Были получены осциллограммы абсолютных и относительных колебаний, а также распределения силовых нагрузок в зоне резания (Рис. 3).

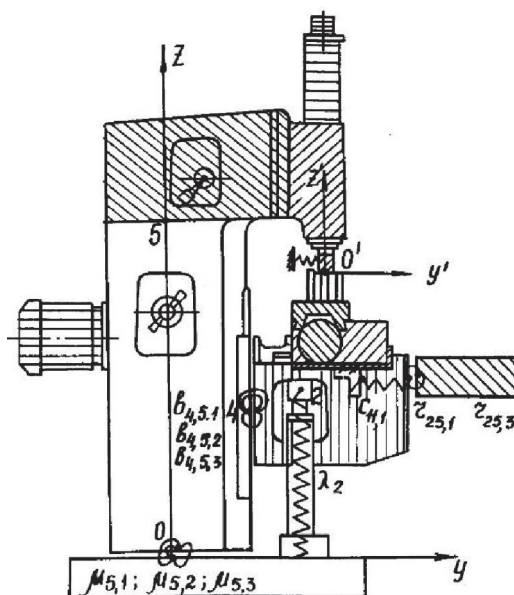




Р и с. 2. Блок-схема установки для экспериментальных исследований
F i g. 2. Block diagram of the setup for experimental studies



Р и с. 3. Осциллограмма колебаний
F i g. 3. Oscillogram of oscillations



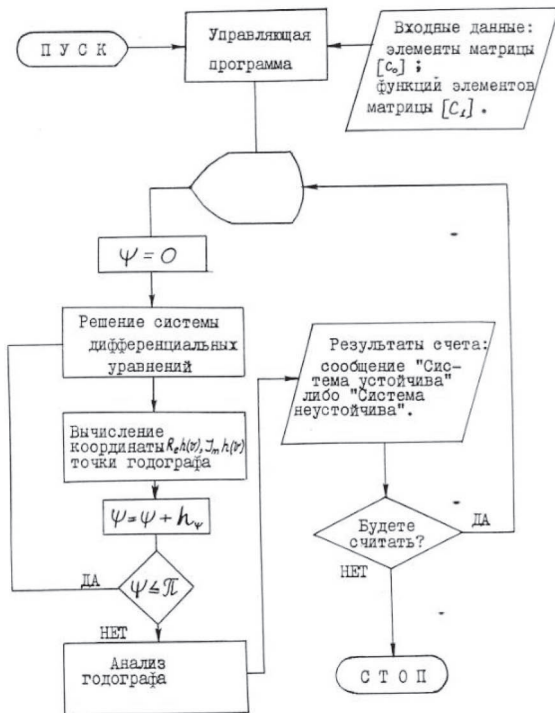
Р и с. 4. Расчетная схема
F i g. 4. Design scheme



При построении математической модели, как правило, системы дифференциальных уравнений, учитываются характеристики объекта или процесса, полученные на предыдущих этапах. Математическая модель может представлять собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений

в частных производных, уравнений с отклонением аргумента (например, задача об устойчивости процесса фрезерования, задача об устойчивом горении в камере сгорания ракеты) и других, например:

$$\begin{aligned}
 I_1 \cdot \ddot{\phi}_1 + h_1 \cdot (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_p) + h_2 \cdot (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) + \frac{1}{e_1} \cdot (\phi_1 - \phi_p) + \frac{1}{e_2} \cdot (\phi_1 - \phi_2) &= 0 \\
 I_2 \cdot \ddot{\phi}_2 + h_2 \cdot (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_1) + h_3 \cdot (\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3) + R_2 \cdot h_{П31} \cdot (R_2 \cdot \dot{\phi}_2 - R_4 \cdot \dot{\phi}_4) + \frac{1}{e_2} \cdot (\phi_2 - \phi_1) + \frac{1}{e_3} \cdot (\phi_2 - \phi_3) + \frac{R_2}{e_{П31}} \cdot (R_2 \cdot \phi_2 - R_4 \cdot \phi_4) &= 0 \\
 I_3 \cdot \ddot{\phi}_3 + h_2 \cdot (\dot{\phi}_3 - \dot{\phi}_2) + \frac{1}{e_3} \cdot (\phi_3 - \phi_2) &= 0 \\
 I_4 \cdot \ddot{\phi}_4 + R_4 \cdot h_{П31} \cdot (R_4 \cdot \dot{\phi}_4 - R_2 \cdot \dot{\phi}_2) + h_4 \cdot (\dot{\phi}_4 - \dot{\phi}_5) + \frac{R_4}{e_{П31}} \cdot (R_4 \cdot \phi_4 - R_2 \cdot \phi_2) + \frac{1}{e_4} \cdot (\phi_4 - \phi_5) &= 0 \\
 I_5 \cdot \ddot{\phi}_5 + h_4 \cdot (\dot{\phi}_5 - \dot{\phi}_4) + h_5 \cdot (\dot{\phi}_5 - \dot{\phi}_6) + R_5 \cdot h_{П32} \cdot (R_5 \cdot \dot{\phi}_5 - R_8 \cdot \dot{\phi}_8) + \frac{1}{e_4} \cdot (\phi_5 - \phi_4) + \frac{1}{e_5} \cdot (\phi_5 - \phi_6) + \frac{R_5}{e_{П32}} \cdot (R_5 \cdot \phi_5 - R_8 \cdot \phi_8) &= 0 \\
 I_6 \cdot \ddot{\phi}_6 + h_5 \cdot (\dot{\phi}_6 - \dot{\phi}_5) + h_6 \cdot (\dot{\phi}_6 - \dot{\phi}_7) + \frac{1}{e_5} \cdot (\phi_6 - \phi_5) + \frac{1}{e_6} \cdot (\phi_6 - \phi_7) &= 0 \\
 I_7 \cdot \ddot{\phi}_7 + h_6 \cdot (\dot{\phi}_7 - \dot{\phi}_6) + \frac{1}{e_6} \cdot (\phi_7 - \phi_6) &= 0 \\
 I_8 \cdot \ddot{\phi}_8 + R_8 \cdot h_{П32} \cdot (R_8 \cdot \dot{\phi}_8 - R_5 \cdot \dot{\phi}_5) + h_7 \cdot (\dot{\phi}_8 - \dot{\phi}_9) + \frac{R_8}{e_{П32}} \cdot (R_8 \cdot \phi_8 - R_5 \cdot \phi_5) + \frac{1}{e_7} \cdot (\phi_8 - \phi_9) &= 0 \\
 I_9 \cdot \ddot{\phi}_9 + h_7 \cdot (\dot{\phi}_9 - \dot{\phi}_8) + h_8 \cdot (\dot{\phi}_9 - \dot{\phi}_{10}) + \frac{1}{e_7} \cdot (\phi_9 - \phi_8) + \frac{1}{e_8} \cdot (\phi_9 - \phi_{10}) &= 0 \\
 I_{10} \cdot \ddot{\phi}_{10} + h_8 \cdot (\dot{\phi}_{10} - \dot{\phi}_9) + h_9 \cdot (\dot{\phi}_{10} - \dot{\phi}_{12}) + \frac{1}{e_8} \cdot (\phi_{10} - \phi_9) + \frac{1}{e_9} \cdot (\phi_{10} - \phi_{11}) + \frac{1}{e_{10}} \cdot (\phi_{10} - \phi_{12}) &= 0
 \end{aligned}$$



Р и с. 5. Фрагмент алгоритма
F i g. 5. Algorithm fragment

Следующий этап – процесс разработки программного обеспечения, требует знаний не только в области информационных технологий, но и в предметной области. К программному обеспечению предъявляются повышенные требования при работе с ним пользователя: удобный интерфейс, высокая скорость при проведении расчетов, наличие синтаксического и семантического контроля при задании входных параметров и другие.

Приведем фрагмент программного обеспечения:

```

assign(FF);
q(t);
- 821719 · e-1/10 · t · sin(6/5 · √21 · t) · √21 + 4571/13710 · e-1/10 · t · cos(6/5 · √21 · t) -
- 320/1371 · cos(5 · t) + 560/457 · sin(5 · t)
q1(t) := diff(q(t), t);
q1(t) := - 2600197/1371 · e-1/10 · t · sin(6/5 · √21 · t) · √21 - 27543/4570 · e-1/10 · t · cos(6/5 · √21 · t) +
+ 1600/1371 · sin(5 · t) + 2800/457 · cos(5 · t)
    
```

Завершающий этап – проведение вычислительного эксперимента, то есть анализ характеристик изучаемого процесса на ЭВМ. Работа не с самим объектом, а с его моделью дает возможность быстро и без существенных затрат исследовать его свойства и поведение в ситуациях, ограниченных степенью

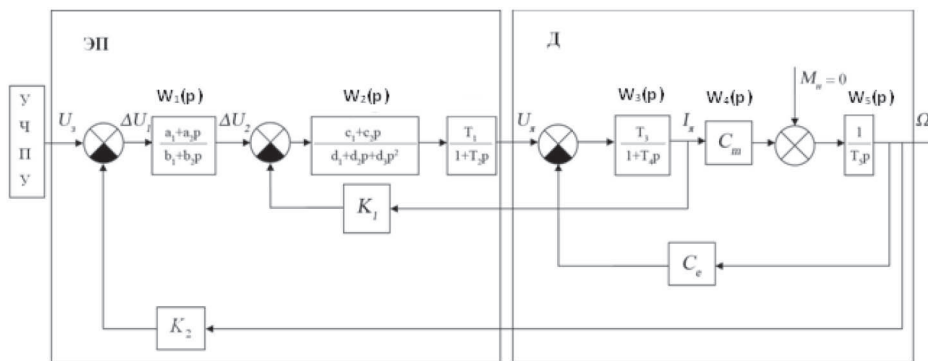


идеализации. При этом достигается более полное получение информации об объекте. На этом этапе возможно подключение к разработанной программе расчета характеристик объекта алгоритмов и программного обеспечения многокритериальной, многопараметрической оптимизации, поиска чувствительных параметров и других. Это процесс в итоге позволит получить параметры конструкции станка с УЧПУ с улучшенными показателями качества, позволит повысить его конкурентоспособность.

В дальнейшем рассмотрена структурная схема (Рис. 6) системы электропривода (ЭП). Получена общая передаточная функция изучаемой системы и характеристическое уравнение в символьном виде. Для рассматриваемой системы характеристическое уравнение представляет собой полином шестого порядка. Коэффициенты этого полинома сложным образом зависят от всех восемнадцати параметров исследуемой системы. Проведен анализ влияния параметров системы на коэффициенты полинома. Результаты исследований показали

необходимость введения радиуса робастной устойчивости для изучаемого класса систем. Был проведен массивный вычислительный эксперимент по определению радиуса в плоскостях и пространствах различных параметров системы. Анализ отдельных областей устойчивости показал, что они являются односвязными и выпуклыми. Из полученного массива радиусов устойчивости было найдено минимальное значение – радиуса робастной устойчивости.

Электропривод является составной частью почти любой современной машины или оборудования. Рассматриваемая система электропривода является сложной многоконтурной системой с несколькими цепями обратной связи и большим количеством регулируемых параметров (Рис. 6). Значения этих параметров не всегда известны точно или могут варьироваться в процессе эксплуатации. Актуальна задача построения математических моделей и расчета границ областей устойчивости с учетом возможной вариации отдельных параметров.



Р и с. 6. Структурная схема системы электропривода

F i g. 6. Structural diagram of the electric drive system

Характеристическое уравнение системы есть полином шестого порядка вида:

$$Q_6(p) = q_0 \cdot p^6 + q_1 \cdot p^5 + q_2 \cdot p^4 + q_3 \cdot p^3 + q_4 \cdot p^2 + q_5 \cdot p + q_6 = 0,$$

где коэффициенты полинома являются функциями от восемнадцати конструктивных параметров системы

$$q_i = q_i(\alpha_{1..18}) \text{ и имеют сложный вид: } q_0 = T_2 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_3$$

$$q_1 = T_2 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_3 + T_2 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_2 + T_2 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_3 + T_4 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_3$$

$$q_2 = C_e \cdot C_m \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot b_2 \cdot d_3 + T_2 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_2 + T_2 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_1 + T_2 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_3 + T_2 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_2 + T_4 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_3 + T_4 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_2 + T_5 \cdot b_2 \cdot d_3$$

$$q_3 = C_e \cdot C_m \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot b_1 \cdot d_3 + C_e \cdot C_m \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot b_2 \cdot d_2 + K_1 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot c_2 + C_e \cdot C_m \cdot T_3 \cdot b_2 \cdot d_3 + T_2 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_1 + T_2 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_2 + T_2 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_1 + T_4 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_2 + T_4 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_1 + T_5 \cdot b_1 \cdot d_3 +$$

$$q_4 = T_2 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot d_3 + C_e \cdot C_m \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot b_1 \cdot d_2 + C_e \cdot C_m \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot b_2 \cdot d_1 + C_m \cdot K_2 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot a_2 \cdot c_2 + K_1 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot c_2 + K_1 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot T_5 \cdot b_2 \cdot c_1 + C_e \cdot C_m \cdot T_3 \cdot b_1 \cdot d_3 + C_e \cdot C_m \cdot T_3 \cdot b_2 \cdot d_2 + T_2 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_1 + T_4 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot d_1 + T_5 \cdot b_1 \cdot d_2 + T_5 \cdot b_2 \cdot d_1$$

$$q_5 = C_e \cdot C_m \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot b_1 \cdot d_2 + C_m \cdot K_2 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot a_1 \cdot c_2 + C_m \cdot K_2 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot a_2 \cdot c_1 + K_1 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot T_5 \cdot b_1 \cdot c_1 + C_e \cdot C_m \cdot T_3 \cdot b_1 \cdot d_2 + C_e \cdot C_m \cdot T_3 \cdot b_2 \cdot d_1 + T_5 \cdot b_1 \cdot d_1$$

$$q_6 = C_m \cdot K_2 \cdot T_1 \cdot T_3 \cdot a_1 \cdot c_1 + C_e \cdot C_m \cdot T_3 \cdot b_1 \cdot d_1$$

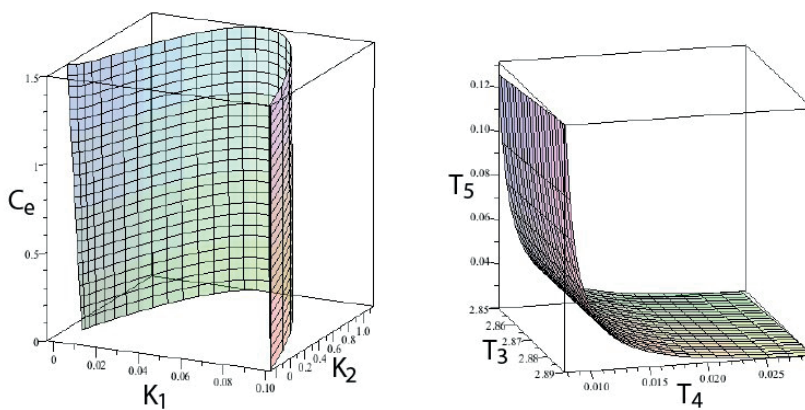


На первом этапе исследований коэффициенты характеристического полинома приводились к безразмерному виду:

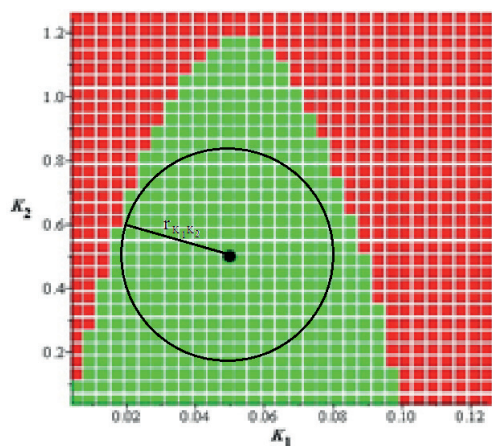
$$\begin{aligned}
 W(p) := & 7.2 \cdot 10^{-12} \cdot \pm_{14} \cdot \pm_4 \cdot \pm_9 \cdot \pm_{11} \cdot \pm_{13} \cdot p^6 + \\
 & + \left(1.1 \cdot 10^{-8} \cdot \pm_4 \cdot \pm_8 \cdot \pm_{11} \cdot \pm_{13} \cdot \pm_{14} + 2.3 \cdot 10^{-10} \cdot \pm_4 \cdot \pm_9 \cdot \pm_{11} \cdot \pm_{14} + 2.2 \cdot 10^{-9} \cdot \pm_4 \cdot \pm_9 \cdot \pm_{13} \cdot \pm_{14} \right) \cdot p^5 + \\
 & + \left(5.7 \cdot 10^{-8} \cdot \pm_{18} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_4 \cdot \pm_9 \cdot \pm_{11} + 7.0 \cdot 10^{-8} \cdot \pm_{14} \cdot \pm_4 \cdot \pm_7 \cdot \pm_{11} \cdot \pm_{13} + 6.8 \cdot 10^{-8} \cdot \pm_{14} \cdot \pm_4 \cdot \pm_9 \right) \cdot p^4 + \\
 & + \left(3.5 \cdot 10^{-7} \cdot \pm_{14} \cdot \pm_4 \cdot \pm_8 \cdot \pm_{11} + 0.0000034 \cdot \pm_{14} \cdot \pm_4 \cdot \pm_8 \cdot \pm_{13} \right. \\
 & \left. + 0.000089 \cdot \pm_{18} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_4 \cdot \pm_8 \cdot \pm_{11} + 0.015 \cdot \pm_{15} \cdot \pm_{10} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_{14} \cdot \pm_6 \cdot \pm_4 + 0.000021 \cdot \pm_{14} \cdot \pm_4 \cdot \pm_7 \cdot \pm_{13} \right) \cdot p^3 + \\
 & + \left(0.0000022 \cdot \pm_{14} \cdot \pm_4 \cdot \pm_8 \cdot \pm_{11} + 0.00011 \cdot \pm_{14} \cdot \pm_4 \cdot \pm_8 + 0.000017 \cdot \pm_{18} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_4 \cdot \pm_9 \right. \\
 & \left. + 0.027 \cdot \pm_{18} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_4 \cdot \pm_8 + 1.4 \cdot \pm_{16} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{10} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_2 \cdot \pm_6 + 0.00056 \cdot \pm_{18} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_4 \cdot \pm_7 \cdot \pm_{11} \right) \cdot p^2 + \\
 & + \left(0.17 \cdot \pm_{18} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_4 \cdot \pm_7 + 120 \cdot \pm_{16} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{10} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_1 \cdot \pm_6 + 85 \cdot \pm_{16} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{10} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_2 \cdot \pm_5 \right) \cdot p + \\
 & + 7100 \cdot \pm_{16} \cdot \pm_{17} \cdot \pm_{10} \cdot \pm_{12} \cdot \pm_1 \cdot \pm_5
 \end{aligned}$$

На втором этапе проводился вычислительный эксперимент по расчету границ областей устойчивости в 2D и 3D пространствах параметров. В процессе расчетов на ЭВМ использовался

критерий Раунса-Гурвица. Фрагменты результатов вычислительного эксперимента приведены на рисунках 7, 8.



Р и с. 7. Границы областей устойчивости в пространствах параметров (K_1, K_2, C_e) и (T_3, T_4, T_5)
F i g. 7. Boundaries of Stability Regions in Parameter Spaces (K_1, K_2, C_e) and (T_3, T_4, T_5)



Р и с. 8. Область устойчивости в плоскости параметров (K_1, K_2)
F i g. 8. Stability region in the parameter plane (K_1, K_2)

Заключение

Полученные результаты и программное обеспечение могут быть использованы при проектировании и разработке новых конструкций металлорежущих станков и систем электроприводов. Предложенный подход с использованием программных средств – системы аналитических вычислений Maple может быть эффективно использован для анализа показателей динамического качества и более сложных систем. При этом, вероятно, появится необходимость использования значительных ресурсов вычислительной техники и компьютерных станций. При проведении исследований были развиты основные методологические подходы, описанные в ряде образовательных, отечественных и международных проектах [11-16]. Особое место при проведении вычислительного эксперимента принадлежит самостоятельной работе студентов на ЭВМ. Разработанные программные средства позволяют эффективно проводить вычислительный эксперимент. При проведении этих исследований в полной мере используются основные принципы программной инженерии.



Список использованных источников

- [1] Pohjolainen, S. Modern Mathematics Education for Engineering Curricula in Europe A Comparative Analysis of EU, Russia, Georgia and Armenia / S. Pohjolainen, T. Myllykoski, Ch. Mercat, S. Sosnovsky. – DOI 10.1007/978-3-319-71416-5. – Birkhäuser Basel: Cham Springer International Publishing, 2018. – 196 p.
- [2] Gonzales, H. Universities contribution to Bologna Process / H. Gonzales, R. Wangenaar. – Bilbao: University of Deusto, 2008. – 164 p.
- [3] Smirnova, E. V. Handbook of Research on Engineering Education in a Global Context / E. V. Smirnova, R. P. Clark. – DOI 10.4018/978-1-5225-3395-5. – University of Warwick, UK: IGI Global, 2018. – 543 p.
- [4] Teachers' opinions on quality criteria for Competency Assessment Programs / L. K. J. Baartman, T. J. Bastiaens, P. A. Kirschner, C.P.M. Van der Vleuten. – DOI 10.1016/j.tate.2006.04.043 // Teaching and Teacher Education. – 2007. – Vol. 23, issue 6. – Pp. 857-867.
- [5] Гергель, В. П. Разработка образовательного стандарта Нижегородского госуниверситета по направлению «Фундаментальная информатика и информационные технологии» / В. П. Гергель, Е. В. Гугина, О. А. Кузенков // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2010. – Т. 6, № 1. – С. 51-60. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24172758> (дата обращения: 24.03.2021).
- [6] Кузенков, О. А. Модернизация математических программ на основе российских и международных стандартов / О. А. Кузенков, И. В. Захарова. – DOI 10.25559/SITITO.14.201801.233-244 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2018. – Т. 14, № 1. – С. 233-244. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35050063> (дата обращения: 24.03.2021).
- [7] Захарова, И. В. Опыт реализаций требований образовательных и профессиональных стандартов в области ИКТ в Российском образовании / И. В. Захарова, О. А. Кузенков // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Т. 1761. – С. 17-31. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1761/paper02.pdf> (дата обращения: 24.03.2021). – Рез. англ.
- [8] Soldatenko, I. S. Modernization of math-related courses in engineering education in Russia based on best practices in European and Russian universities / I. S. Soldatenko [и др.] // Proceedings of the 44th SEFI Annual Conference 2016 – Engineering Education on Top of the World: Industry University Cooperation (SEFI 2016). – Finland: SEFI, 2016. – 16 p. – URL: <http://sefibenvwh.cluster023.hosting.ovh.net/wp-content/uploads/2017/09/soldatenko-modernization-of-math-related-courses-in-engineering-education-in-russia-based-133.pdf> (дата обращения: 24.03.2021).
- [9] Захарова, И. В. Опыт актуализации образовательных стандартов высшего образования в области ИКТ / И. В. Захарова, О. А. Кузенков. – DOI 10.25559/SITITO.2017.4.510 // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – Т. 13, № 4. – С. 46-57. – Рез. англ.
- [10] Бедный, Б. И. Интегрированные программы подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации / Б. И. Бедный, О. А. Кузенков. – DOI 10.15507/1991-9468.089.021.201704.637-650 // Интеграция образования. – 2017. – Т. 21, № 4. – С. 637-650. – Рез. англ.
- [11] Петрова, И. Ю. Ключевые ориентиры для разработки и реализации образовательных программ в предметной области «Информационно-коммуникационные технологии» / И. Ю. Петрова [и др.]; под ред. И. Дюкарева, Е. Караваевой, Е. Ковтун. – Бильбао: Университет Деусто, 2013. – 86 с. – URL: <http://www.deusto-publicaciones.es/deusto/pdfs/tuning/tuning37.pdf> (дата обращения: 24.03.2021).
- [12] Кузенков, О. А. Взаимосвязь между проектом MetaMath и продолжающейся реформой высшего образования в России / О. А. Кузенков, И. В. Захарова // Образовательные технологии и общество. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 279-291. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29438091> (дата обращения: 24.03.2021). – Рез. англ.
- [13] Bednyi, A. Modernising educational programmes in ICT based on the Tuning methodology / A. Bednyi, L. Erushkina, O. Kuzenkov. – DOI 10.18543/tjhe-1(2)-2014pp387-404 // Tuning Journal for Higher Education. – 2014. – Vol. 1, issue 2. – Pp. 387-404.
- [14] Кузенков, О. А. Использование методологии TUNING при разработке национальных рамок компетенций в области ИКТ / О. А. Кузенков, В. В. Тихомиров // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2013. – № 9. – С. 77-87. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23020512> (дата обращения: 24.03.2021).
- [15] Zakharova, I. V. Using SEFI framework for modernization of requirements system for mathematical education in Russia / I. V. Zakharova [и др.] // Proceedings of the 44th SEFI Annual Conference 2016 – Engineering Education on Top of the World: Industry University Cooperation (SEFI 2016). – Finland: SEFI, 2016. – 15 p. – URL: <http://sefibenvwh.cluster023.hosting.ovh.net/wp-content/uploads/2017/09/zakharova-using-sefi-framework-for-modernization-of-requirements-system-for-mathematical-education-155.pdf> (дата обращения: 24.03.2021).
- [16] Кузенков, О. А. Разработка фонда оценочных средств с использованием пакета Math-Bridge / О. А. Кузенков, Г. В. Кузенкова, Р. С. Бирюков // Образовательные технологии и общество. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 465-478. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27163069> (дата обращения: 24.03.2021).
- [17] Гергель, В. П. Разработка самостоятельно устанавливаемых образовательных стандартов Нижегородского госуниверситета в области информационно-коммуникационных технологий / В. П. Гергель, О. А. Кузенков // Школа будущего. – 2012. – № 4. – С. 100-105. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17926157> (дата обращения: 24.03.2021).
- [18] Гугина, Е. В. Образовательные стандарты Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского / Е. В. Гугина, О. А. Кузенков // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2014.



- № 3-4. – С. 39-44. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22862964> (дата обращения: 24.03.2021). – Рез. англ.
- [19] Кузенков, О. А. Использование электронных средств обучения при модернизации курса «Математическое моделирование процессов отбора» / О. А. Кузенков, Г. В. Кузенкова, Т. П. Киселева // *Образовательные технологии и общество*. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 435-448. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32253185> (дата обращения: 24.03.2021). – Рез. англ.
- [20] Кузенков, О. А. Компьютерная поддержка учебно-исследовательских проектов в области математического моделирования процессов отбора / О. А. Кузенков, Г. В. Кузенкова, Т. П. Киселева // *Образовательные технологии и общество*. – 2019. – Т. 22, № 1. – С. 152-163. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37037790> (дата обращения: 24.03.2021). – Рез. англ.
- [21] Кузенков, О. А. Проектный подход при изучении математического анализа студентами инженерных специальностей / О. А. Кузенков, Е. А. Рябова // *Образовательные технологии и общество*. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 225-232. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41233717> (дата обращения: 24.03.2021).
- [22] Kuzenkov, O. Information Technologies of Evolutionarily Stable Behavior Recognition / O. Kuzenkov. – DOI 10.1007/978-3-030-46895-8_20 // *Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*; ed. by V. Sukhomlin, E. Zubareva. – Springer, Cham. – 2020. – Vol. 1201. – Pp. 150-157.
- [23] Development of Problem Solving Skills with Maple in Higher Education / C. Fissore, M. Marchisio, F. Roman, M. Sacchet. – DOI 10.1007/978-3-030-81698-8_15 // *Maple in Mathematics Education and Research. MC 2020. Communications in Computer and Information Science*; ed. by R. M. Corless, J. Gerhard, I. S. Kotsireas. – Springer, Cham. – 2021. – Vol. 1414. – Pp. 219-233.
- [24] Sicilia, M.-A. Digital skills training in Higher Education: insights about the perceptions of different stakeholders / M.-A. Sicilia [и др.]. – DOI 10.1145/3284179.3284312 // *Proceedings of the Sixth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM'18)*. – Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018. – Pp. 781-787.
- [25] Pokholkov, Y. Overview of Engineering Mathematics Education for STEM in Russia / Y. Pokholkov [и др.]. – DOI 10.1007/978-3-319-71416-5_3 // *Modern Mathematics Education for Engineering Curricula in Europe*; ed. by S. Pohjolainen, T. Myllykoski, C. Mercat, S. Sosnovsky. – Birkhäuser, Cham, 2018. – Pp. 39-53.
- ники, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» (603022, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23), кандидат технических наук, доцент, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3152-3168>**, ssstrebulyaev@mail.ru
Сироткина Дарья Александровна, студент Института информационных технологий, математики и механики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» (603022, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6592-4779>**, d-sirotkina@mail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

- [1] Pohjolainen S., Myllykoski T., Mercat Ch., Sosnovsky S. *Modern Mathematics Education for Engineering Curricula in Europe: A Comparative Analysis of EU, Russia, Georgia and Armenia*. Birkhäuser Basel: Cham Springer International Publishing; 2018. 196 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71416-5>
- [2] Gonzales H., Wangenaar R. *Universities contribution to Bologna Process*. Bilbao: University of Deusto; 2008. 164 p. (In Eng.)
- [3] Smirnova E.V., Clark R.P. *Handbook of Research on Engineering Education in a Global Context*. University of Warwick, UK: IGI Global; 2018. 543 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3395-5>
- [4] Baartman L.K.J., Bastiaens T. J., Kirschner P.A., Van der Vleuten C.P.M. Teachers' opinions on quality criteria for Competency Assessment Programs. *Teaching and Teacher Education*. 2007; 23(6):857-867. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tate.2006.04.043>
- [5] Gergel V.P., Gugina E.V., Kuzenkov O.A. *Razrabotka obrazovatel'nogo standarta Nizhegorodskogo gosuniversiteta po napravleniju "Fundamental'naja informatika i informacionnye tehnologii"* [Development of the educational standard of the Nizhny Novgorod State University in the direction of "Fundamental informatics and information technologies"]. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2010; 6(1):51-60. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24172758> (accessed 24.03.2021). (In Russ.)
- [6] Kuzenkov O.A., Zakharova I.V. *Mathematical Programs Modernization Based on Russian and International Standards. Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2018; 14(1):233-244. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201801.233-244>
- [7] Zakharova I., Kuzenkov O. Experience in implementing the requirements of the educational and professional standards in the field of ICT in Russian Education. *CEUR Workshop Proceedings*. 2016; 1761:17-31. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-1761/paper02.pdf> (accessed 24.03.2021).

Поступила 24.03.2021; одобрена после рецензирования 12.05.2021; принята к публикации 03.06.2021.

Об авторах:

Стребуляев Сергей Николаевич, доцент кафедры дифференциальных уравнений, математического и численного анализа, Институт информационных технологий, математики и меха-



- (In Russ., abstract in Eng.)
- [8] Soldatenko I.S., et al. Modernization of math-related courses in engineering education in Russia based on best practices in European and Russian universities. *Proceedings of the 44th SEFI Annual Conference 2016 – Engineering Education on Top of the World: Industry University Cooperation (SEFI 2016)*. Finland: SEFI; 2016. 16 p. Available at: <http://sefibenvwh.cluster023.hosting.ovh.net/wp-content/uploads/2017/09/soldatenko-modernization-of-math-related-courses-in-engineering-education-in-russia-based-133.pdf> (accessed 24.03.2021). (In Eng.)
- [9] Zakharova I., Kuzenkov O. The Experience of Updating the Educational Standards of Higher Education in the Field of ICT. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2017; 13(4):46-57. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25559/SITITO.2017.4.510>
- [10] Bednyi B.I., Kuzenkov O.A. Integrated programmes for master's degree and PhD students. *Integratsiya obrazovaniya = Integration of Education*. 2017; 21(4):637-650. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/1991-9468.089.021.201704.637-650>
- [11] Petrova I.Yu. *Kljuchevye orientiry dlja razrabotki i realizacii obrazovatel'nyh programm v predmetnoj oblasti "Informacionno-kommunikacionnye tehnologii"* [Key reference points for development and implementation of educational programs in subject domain "Information and Communication Technologies"]. In: Ed. by I. Djukarev, E. Karavaeva, E. Kovtun. Universitet Deusto, Bilbao; 2013. 86 p. Available at: <http://www.deusto-publicaciones.es/deusto/pdfs/tuning/tuning37.pdf> (accessed 24.03.2021). (In Russ.)
- [12] Kuzenkov O. A., Zakharova I. V. The relationship between the MetaMath project and the ongoing reform of higher education in Russia. *Educational Technology & Society*. 2017; 20(3):279-291. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29438091> (accessed 24.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [13] Bednyi A., Erushkina L., Kuzenkov O. Modernising educational programmes in ICT based on the Tuning methodology. *Tuning Journal for Higher Education*. 2014; 1(2):387-404. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.18543/tjhe-1\(2\)-2014pp387-404](https://doi.org/10.18543/tjhe-1(2)-2014pp387-404)
- [14] Kuzenkov O. A., Tikhomirov V.V. *Ispol'zovanie metodologii TUNING pri razrabotke nacional'nyh ramok kompetencij v oblasti IKT* [Using the TUNING methodology in the development of national ICT competency frameworks]. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie = Modern Information Technologies and IT-Education*. 2013; (9):77-87. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23020512> (accessed 24.03.2021). (In Russ.)
- [15] Zakharova I.V., et al. Using SEFI framework for modernization of requirements system for mathematical education in Russia. *Proceedings of the 44th SEFI Annual Conference 2016 – Engineering Education on Top of the World: Industry University Cooperation (SEFI 2016)*. Finland: SEFI; 2016. 15 p. Available at: <http://sefibenvwh.cluster023.hosting.ovh.net/wp-content/uploads/2017/09/zakharova-using-sefi-framework-for-modernization-of-requirements-system-for-mathematical-education-155.pdf> (accessed 24.03.2021). (In Eng.)
- [16] Kuzenkov O.A., Kuzenkova G.V., Biryukov R.S. *Razrabotka fonda ocenочnyh sredstv s ispol'zovaniem paketa Math-Bridge* [Development of an evaluation fund using the Math-Bridge package]. *Educational Technology & Society*. 2016; 19(4):465-478. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27163069> (accessed 24.03.2021). (In Russ.)
- [17] Gergel V.P., Kuzenkov O.A. *Razrabotka samostojatel'no ustanavlivaemyh obrazovatel'nyh standartov Nizhegorodskogo gosuniversiteta v oblasti informacionno-kommunikacionnyh tehnologij* [Development of independently established educational standards of the Nizhny Novgorod State University in the field of information and communication technologies]. *School of the Future*. 2012; (4):100-105. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17926157> (accessed 24.03.2021). (In Russ.)
- [18] Gugina E.V., Kuzenkov O.A. Educational Standards of the Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2014; (3-4):39-44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22862964> (accessed 24.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [19] Kuzenkov O., Kuzenkova G., Kiseleva T. The use of electronic teaching tools in the modernization of the course "Mathematical modeling of selection processes". *Educational Technology & Society*. 2018; 21(1):435-448. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32253185> (accessed 24.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [20] Kuzenkov O., Kuzenkova G., Kiseleva T. Computer support of training and research projects in the field of mathematical modeling of selection processes. *Educational Technology & Society*. 2019; 22(1):152-163. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37037790> (accessed 24.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
- [21] Kuzenkov O.A., Ryabova E.A. *Proektnyj podhod pri izuchenii matematicheskogo analiza studentami inzhenernyh special'nostej* [Project approach in the study of mathematical analysis by students of engineering specialties]. *Educational Technology & Society*. 2019; 22(4):225-232. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41233717> (accessed 24.03.2021). (In Russ.)
- [22] Kuzenkov O. Information Technologies of Evolutionarily Stable Behavior Recognition. In: Ed. by V. Sukhomlin, E. Zubareva. *Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*. 2020; 1201:150-157. Springer, Cham. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_20
- [23] Fissore C., Marchisio M., Roman F., Sacchet M. Development of Problem Solving Skills with Maple in Higher Education. In: Ed. by R. M. Corless, J. Gerhard, I. S. Kotsireas. *Maple in Mathematics Education and Research. MC 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2021; 1414:219-233. Springer, Cham. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-81698-8_15
- [24] Sicilia M.-A., et al. Digital skills training in Higher Education: insights about the perceptions of different stakeholders. *Proceedings of the Sixth International Conference on*



Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM'18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA; 2018. p. 781-787. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1145/3284179.3284312>

- [25] Pokholkov, Y. et al. Overview of Engineering Mathematics Education for STEM in Russia. In: Ed. by S. Pohjolainen, T. Myllykoski, C. Mercat, S. Sosnovsky. *Modern Mathematics Education for Engineering Curricula in Europe*. Birkhäuser, Cham; 2018. p. 39-53. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71416-5_3

*Submitted 24.03.2021; approved after reviewing 12.05.2021;
accepted for publication 03.06.2021.*

About the authors:

Sergey N. Strebulyaev, Associate Professor of the Department of Differential Equations, Mathematical and Numerical Analysis, Institute of Information Technology, Mathematics and Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3152-3168>**, sstrebulyaev@mail.ru

Daria A. Sirotkina, Student of the Institute of Information Technology, Mathematics and Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russian Federation), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6592-4779>**, d-sirotkina@mail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.

