



ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 621.01-192:[531.1+531.3]

С.Н. ПОДДУБКО, канд. техн. наук, доц.
генеральный директор¹
E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

В.Б. АЛЬГИН, д-р техн. наук, проф.
заместитель начальника НТЦ «Карьерная техника»¹
E-mail: vladimir.algin@gmail.com

Н.Н. ИШИН, д-р техн. наук, доц.
начальник НТЦ «Карьерная техника»¹
E-mail: nik_ishin@mail.ru

С.В. ШИЛЬКО, канд. техн. наук, доц.
заведующий лабораторией «Механика композитов и биополимеров»²
E-mail: shilko_mpr@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 30.06.2021.

ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ В ОБЛАСТИ МЕХАНИКИ ПРИВОДОВ. ЧАСТЬ 1. МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД И ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

В статье рассматриваются инновационные разработки в области механики приводов Объединенного института машиностроения НАН Беларуси в сотрудничестве с Институтом механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси и другими организациями. Основное внимание уделяется результатам, отмеченным в конкурсе ТОП-10 НАН Беларуси, в котором творческий коллектив специалистов Объединенного института машиностроения НАН Беларуси и Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси стал лауреатом, а также монографии «Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств», ставшей призером во Всероссийском конкурсе имени первопечатника Ивана Федорова 2020 года в номинации на лучшую публикацию по научно-исследовательской работе. Представлены также новые результаты, полученные авторами в 2020–2021 годах по рассматриваемой тематике. Статья включает положения концепции «Индустрия 4.0» с акцентом на модельный подход и применение цифровых двойников материалов и изделий, положения ресурсной механики машин, развиваемой в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси, и разработанную архитектуру информационной модели привода.

Ключевые слова: механика приводов, инновации, цифровые двойники изделий и материалов, ресурсная механика машин, архитектура информационной модели, программное обеспечение

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-5-19>

Введение. Основные аспекты создания инноваций показаны на рисунке 1. Рассматриваемая проблематика относится к процессным иннова-

циям и охватывает НИР, ОКР, стандартизацию и эксплуатацию элементов приводов как технически сложных изделий. Недавним достиже-



Рисунок 1 — Основные аспекты создания инноваций
Figure 1 — Main aspects of creating innovations

нием представителей Объединенного института машиностроения НАН Беларуси (В.Б. Альгин, Н.Н. Ишин, С.Н. Поддубко) и Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси (С.В. Шилько) стало создание информационных моделей — цифровых двойников гидро- и электромеханических приводов для проектирования и мониторинга транспортных машин нового поколения, вошедшее в ТОП-10 результатов деятельности ученых НАН Беларуси в области фундаментальных и прикладных исследований за 2020 год. [1]. Успех также сопутствовал коллективной монографии «Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств» под общей редакцией В.Б. Альгина и В.Е. Старжинского [2], написанной с участием сотрудников Объединенного института машиностроения НАН Беларуси и Института механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, ставшей призером Всероссийского конкурса имени первопечатника Ивана Федорова 2020 года в номинации на лучшую публикацию по научно-исследовательской работе.

Содержание настоящей статьи структурировано следующим образом. В разделе 1 кратко представлены основные разработки, выдвинутые на конкурс ТОП-10 в 2020 году. Раздел 2 посвящен особенностям концепции «Индустрия 4.0» с акцентом на модельный подход и применение цифровых двойников. В разделе 3 дана характеристика развиваемого в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси научного направления «ресурсная

механика машин», а в разделе 4 описана разработанная архитектура информационной модели приводов.

В статье применяется термин «информационная модель», использованный А. Гринбергом и В. Альгиным в докладе на конференции 2000 года, опубликованном в виде статьи в 2001 году [3]. Этот термин охватывает понятия «цифровой двойник» и «цифровая нить» из презентаций и публикаций других исследователей, введенные позднее в презентациях и публикациях других исследователей. Понятие «цифровой двойник» связано с именем М. Гривса [4, 5]. Термин «цифровая нить» был введен в обращение Lockheed Martin Corporation (США) и подразумевает непрерывный процесс моделирования производственной цепочки на этапе проектирования: цифровые потоки относятся к оцифровке и отслеживанию продукта «от колыбели до могилы» [6]. Некоторые изобретения, связанные с цифровым потоком, представлены в работах [7, 8].

Рассматриваемые понятия «цифровой двойник» и «информационная модель» весьма близки представлениям о компьютерном дизайне структурно сложных композитов и «умных» материалов, активно развиваемых в настоящее время в ряде научных центров, в том числе в Институте механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси. Как известно, композиты представляют собой иерархические системы, эволюционирующие в процессе деформирования, разрушения и изнашивания. Многоуровневое опи-

сание таких систем способствует созданию цифровых двойников для расчетного прогнозирования и оптимизации жизненного цикла технически сложных изделий (в данном контексте таковыми являются приводы машин). С этой целью используются комбинации микромеханических моделей, соответствующих различным масштабным уровням структуры материала как неоднородной среды, и макроскопических моделей для анализа напряженно-деформированного состояния изделий (деталей, узлов и машины в целом). Применительно к дисперсно-наполненным полимерным композитам компьютерный дизайн структуры материалов, исходя из желаемых характеристик изделия, подробно изложен в монографиях [9, 10] и в настоящее время апробируется при проектировании направленно-армированных конструкционных материалов. В отчетном для ТОП-10 2020 году он был реализован с целью анализа упругопластического деформирования высокопрочного композита с наполнителем в виде стеклянных микросфер [11], создания бионически адекватных «умных» конструкций [12], при проектировании автомобильных шин [13] и сенсорных устройств [14].

1. Создание информационных моделей — цифровых двойников гидро- и электромеханических приводов для проектирования и мониторинга транспортных машин нового поколения (ТОП-10 за 2020 год). Представленный на конкурс результат кратко формулируется следующим образом: *создание информационных моделей — цифровых двойников гидро- и электромеханических приводов для проектирования и мониторинга транспортных машин нового поколения*. Этот результат подтвержден завершенными в 2020 году разработками, к которым относятся:

- теория и методика расхода ресурса технически сложных изделий (мобильная техника, оборудование) — государственный стандарт СТБ 2578-2020;
- теория и методика диагностирования и вибромониторинга трансмиссионных узлов мобильной техники, оценки их остаточного ресурса в эксплуатации — государственный стандарт СТБ 2579-2020;
- методика по расчету показателей надежности и долговечности автомобильной техники МАЗ (по договору с ОАО «МАЗ»);
- методики и вычислительные процедуры по гранту Европейской комиссии (программа HORIZON 2020, договор № 111/45 с НАН Беларуси, проект PLATON “Planning Process and Tool for Step-by-Step Conversion of the Conventional or Mixed Bus Fleet to a 100 % Electric Bus Fleet” / «Процесс планирования и инструментарий для поэтапного преобразования обычного или смешанного автобусного парка в 100-процентный парк электробусов»);
- метод компьютерного дизайна (оптимального проектирования) структуры конструкционного композиционного материала, исходя из требований к изделию;

- программа лабораторных испытаний, экспериментальные данные для цифрового моделирования и проектировочных расчетов автомобильных шин по договору И-27/2020 с ОАО «Белшина»;

- комплексная программа развития электротранспорта в Республике Беларусь на 2021–2025 годы, образцы электромобилей.

В 2020 году опубликованы глава в зарубежной монографии и 14 статей. Цикл опубликованных работ, содержащий представленный результат, включает 6 монографий, изданных в Республике Беларусь и за рубежом; 4 главы в монографиях, изданных за рубежом; 36 статей; 4 государственных стандарта Республики Беларусь; 4 патента на изобретения; 10 свидетельств на компьютерные программы.

2. «Индустрия 4.0» — моделирование — цифровой двойник. Основные понятия, характеризующие «Индустрию 4.0»: моделирование, цифровизация, киберфизические системы, большие данные, интеллектуальная индустрия и техника, автономность. Наибольший научно-практический интерес представляет цифровой двойник — одна из самых ярких тенденций «Индустрии 4.0» — как результат развития моделирования, цифровизации, сенсорных возможностей.

В статье [15] указано, что истоки концепции цифрового двойника можно проследить с начала 2000-х годов, когда идея виртуального и реального пространства, каждое из которых несет в себе модель системы, связанную потоком данных и информации, была описана М. Гривсом в контексте менеджмента жизненного цикла продукта [16, 17]. Однако сначала эта идея получила название «модель зеркальных пространств», а затем была названа «концепцией цифрового двойника» [4, 18]. В 2006 году К. Хриберник и др. [19] независимо друг от друга представили «концепцию аватара продукта», ссылаясь на ту же базовую парадигму материального и цифрового представления сущностей продукта. В 2010 году в технологической дорожной карте NASA использован термин «цифровой двойник» в контексте системной инженерии, основанной на моделировании [20]. Однако в более поздней статье они приписали создание этой фразы DARPA [21].

Первое представление понятия, именуемого сейчас «цифровым двойником», описано в [17]. Слайд презентации М. Гривса из лекции в Мичиганском университете (2002), показанный на рисунке 2, назывался просто «Концептуальный идеал для PLM». В нем были все элементы цифрового двойника: реальное пространство, виртуальное пространство, связь для потока данных из реального пространства в виртуальное пространство, ссылка для потока информации из виртуального пространства в реальное пространство и виртуальные подпространства.

Отечественные публикации в нескольких важных отношениях опередили вышеприведенные статьи, презентации и содержащиеся в них понятия.

Conceptual Ideal for PLM

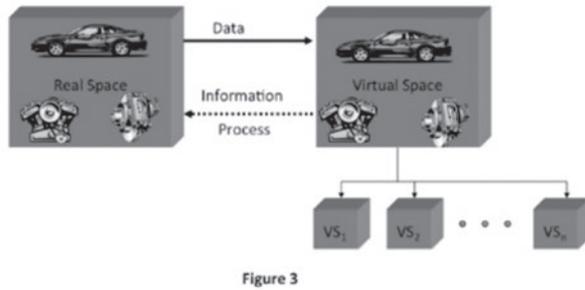


Figure 3

Michael Grieves, University of Michigan, Lurie Engineering Center, Dec 3, 2001

Рисунок 2 — Слайд презентации М. Гривса из лекции в Мичиганском университете в 2002 году

Figure 2 — Slide of the presentation by M. Grieves from a lecture at the University of Michigan in 2002

В передовой статье [22] академик А. Ершов отмечает: «Информационная модель — это не абсолютно новое понятие для машиностроения. Отдельные ее компоненты применяются уже многие десятилетия под названием *математических моделей*. Принципиально новым является интеграция информационной модели в общий алгоритм функционирования машины и использование не только физических зависимостей, но и *закономерностей дискретно-логического и ситуационно-событийного характера*. Здесь возникает много новых задач: нетрудно описать скорость автомобиля в зависимости от его массы, расхода горючего, уклона дороги и передаточного числа, но гораздо труднее *регулировать скорость в зависимости от погодных условий или обстановки на дороге*».

В упомянутой работе А. Гринберга и В. Альгина [3] описана развитая концепция информационной модели. Указано: «Создание и использование наукоемкой продукции требует ... новой информационной технологии построения и развития на всех этапах жизненного цикла машины ее информационной модели как основы данной технологии. Это ... приводит к необходимости совершенствования технической документации машин путем включения в ее состав информационной модели машины на различных этапах жизненного цикла... При этом существенны следующие аспекты:

- каждая часть машины представляется как источник информационных сигналов;
- в информационной модели выделяются узлы машины, где возможно и целесообразно осуществление принципов рефлексивного управления;
- предусматриваются процедуры идентификации источников информации, объектов управления, рефлексивных узлов, определяются их взаимозависимости.

Информационная модель должна конструироваться так, чтобы обеспечить возможность использования различных источников: семантических, структурных (логических), параметрических

(количественных, математических) моделей; результатов измерений; оценок экспертов; средств имитации элементов и узлов машины (в замедленном, ускоренном и реальном масштабах времени применительно к текущему, ретроспективному и прогнозируемому состоянию)».

Со временем число специалистов и компаний, придающих большое значение цифровому двойнику, непрерывно росло, что отражает динамика публикаций по данной тематике (рисунок 3).

На сегодняшний день состояние вопроса можно охарактеризовать следующим образом [15]. За последние годы научная дискуссия о цифровом двойнике приобрела значительный импульс. В контексте «Индустрии 4.0» под цифровым двойником в самом широком смысле понимается концепция связанного виртуального представления физического актива. Типы активов могут варьироваться от продуктов и процессов до целых производственных систем. Различные авторы предлагают свои интерпретации фактической природы цифрового двойника, часто определяя его через неявные функциональные аспекты, не давая явные определения. В то же время некоторые авторы используют данный термин просто как крылатую фразу, тем самым размывая эту возникающую парадигму. На данный момент *отсутствует всестороннее понимание, а также объединяющая модель цифрового двойника*.

Применительно к рассматриваемому объекту — приводу — с учетом работы [23], где описано состояние вопроса по созданию стандарта для расчета редукторов, можно констатировать следующее. *Процесс создания цифрового двойника привода находится в стадии разработки* и направлен на унификацию интерфейса при проведении наиболее распространенных видов расчета зубчатых передач. Вместе с тем не охватывается полный перечень основных вопросов разработки, в том числе анализ и синтез схем, специальные виды кинематических и динамических расчетов, расчет надежности привода как системы, диагностика, оценка состояния привода в целом.

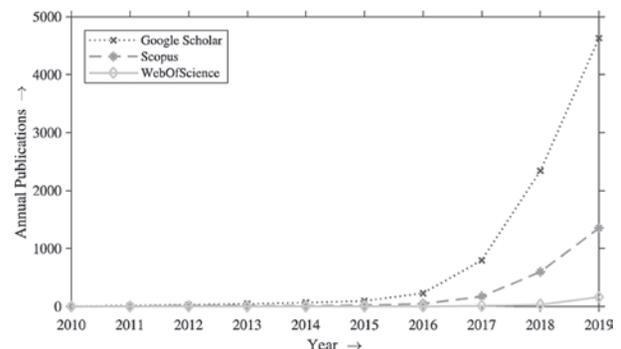


Рисунок 3 — Число публикаций в год, содержащих в названии термин «цифровой двойник», найденное с помощью различных научных поисковых систем [15]
Figure 3 — Number of publications per year containing the term “Digital Twin” in the title, found using various scientific search engines [15]

3. Ресурсная механика машин (РММ). Научными предпосылками РММ являются разработки белорусской школы расчета и проектирования машин и их трансмиссий, основателем которой был член-корреспондент Академии наук БССР Игорь Сергеевич Цитович (1912–1985) [24].

И.С. Цитовичем и его школой были разработаны: - теория мобильной машины, в которой использовались многомассовые модели, учитывающие динамическое взаимодействие агрегатов машины (рисунок 4);

- вероятностные расчеты деталей машин, воспроизводящие вариацию их нагрузочных режимов от машины к машине. Это нашло отражение в первом государственном стандарте СССР по вопросам прогнозирования надежности изделий машиностроения — ГОСТ 27.001-83 «Надежность в технике. Прогнозирование надежности изделий при проектировании. Общие требования» (рисунок 5).

Следует отметить высокий инновационный уровень упомянутых разработок. Практически все новые трансмиссии автотракторной отрасли СССР рассчитывались методами белорусской научной школы; совместно с предприятиями были получены многие авторские свидетельства на изобре-

тения, практической реализации ряда которых помешал распад СССР.

Трансмиссия мобильной машины была и остается характерным машиностроительным объектом, в котором присутствуют все особенности сложных механических изделий современной техники: разнообразие конструктивных решений, вариативность условий эксплуатации и действий оператора, вероятностный характер процессов нагружения, зависимое поведение компонентов под действием общих нагружающих факторов. Поэтому разработки белорусской школы расчета и проектирования трансмиссий имеют общемашиностроительное значение, обладают перспективами развития и применения в разнообразных научно-технических областях, включая научное обслуживание инновационных проектов в части оценки и обеспечения надежностных и динамических свойств создаваемых объектов.

Термин «РММ» отражает совместное изучение: 1) процессов движения, функционирования машин и 2) изменения ресурса в процессе их жизненного цикла. Это направление разрабатывается в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси.

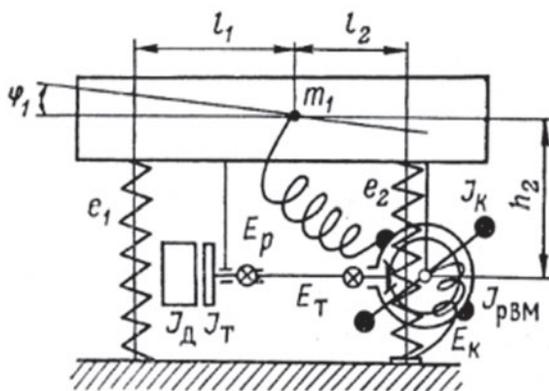
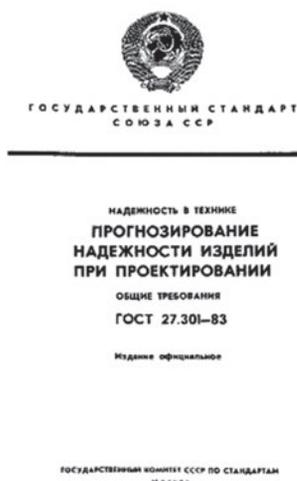


Рисунок 4 — Многомассовая модель взаимодействия трансмиссии и подвески мобильной машины и монография с описанием теории
Figure 4 — Multi-mass model of the interaction of the transmission and suspension of a mobile machine and a monograph describing the theory



РАЗРАБОТАН Академией наук Белорусской ССР

ИСПОЛНИТЕЛИ:

О. В. Берестнев, д-р техн. наук; И. С. Цитович, чл.-корр. АН БССР; Г. И. Переднова, канд. техн. наук; В. В. Алыгин, канд. техн. наук; В. Н. Ксендзов, канд. техн. наук; И. И. Нугальчик; И. В. Манюта, канд. техн. наук; В. Я. Павловский; В. С. Шевченко, канд. техн. наук; Б. И. Волков, канд. техн. наук; А. И. Нубаров, канд. техн. наук; В. Л. Аршанский, канд. техн. наук; Ю. Д. Литвиненко; В. Ю. Моргунов, канд. техн. наук; Т. А. Гурин; Н. А. Щелыгин; В. П. Важаев; В. А. Ильинский, канд. техн. наук; Ю. М. Огульнич, канд. техн. наук; О. Н. Шейнина, канд. техн. наук; И. Г. Сани; Б. Г. Волков, канд. техн. наук; М. А. Гулин, канд. техн. наук; А. Т. Остапо, канд. техн. наук; Н. П. Гавриш, канд. физ.-мат. наук; В. И. Савин, канд. техн. наук; В. Е. Павлов, канд. техн. наук; К. И. Войнов, канд. техн. наук; Э. И. Нестеров, канд. техн. наук; В. М. Енин; Б. И. Вознюк, канд. техн. наук; В. Г. Иноземцев, д-р техн. наук; С. В. Вершинский, д-р техн. наук; Ю. М. Черняшкин, канд. техн. наук; А. Д. Кочнов, канд. техн. наук; Е. В. Дидова; В. Ф. Старостин, канд. техн. наук; А. С. Саверский, канд. техн. наук; В. П. Желтунов, канд. техн. наук; В. И. Кабанов, канд. техн. наук; В. И. Иванов, канд. техн. наук; В. А. Иващев; А. П. Приходько, канд. техн. наук

ВНЕСЕН Академией наук Белорусской ССР

Главный ученый секретарь Л. И. Киселевский

УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 28.02.83 № 979

Рисунок 5 — Первый Государственный стандарт Союза ССР в области прогнозирования надежности технических изделий
Figure 5 — The first State standard of the USSR in the field prognosis of technical product reliability

РММ использует методологию ряда дисциплин, развивая собственный понятийный и расчетный аппарат. *Механика* служит «поставщиком» исходных моделей напряженно-деформированного состояния, повреждения и разрушения машиностроительных компонентов, с помощью которых рассчитываются ресурсы (наработки до предельного состояния). *Теория надежности* предоставляет вероятностный подход и понятия для описания свойств изделий, а также количественные показатели для их оценки. *Теория систем* добавляет синергетические аспекты, присущие любой сложной системе, например зависимое поведение элементов.

Новый подход РММ — учет факторов, которые проявляются при схематизации изделия, переходе от аналоговых к цифровым моделям и методам моделирования индивидуального поведения изделия в процессе жизненного цикла.

Предмет дальнейшего рассмотрения в РММ — архитектура информационной модели привода как технически сложного изделия и основные представления-шаблоны привода, состав его информационной модели и соответствующее программное обеспечение.

Основные положения:

- принципы, использованные при разработке привода, должны быть оригинальны и универсальны, т. е. применимы ко многим технически сложным изделиям;
- содержательные модели и представления стадии проектирования (R&D) могут успешно применяться в дальнейшем на стадии эксплуатации с корректировкой индивидуальных параметров объекта на основе данных, получаемых при эксплуатации.

Данная методология использования моделей этапа исследования и разработки (R&D) для этапа эксплуатации постепенно проникает в научные, технические, производственные и эксплуатирующие сообщества. Например, специалистами Siemens [25] предлагается концепция исполняемого цифрового двойника с повторным использованием имитационных моделей вне рамок R&D.

Представляемая в рамках РММ архитектура содержит не только концепцию, но и во многом законченные разработки применительно к приводам мобильных машин.

4. Архитектура информационной модели привода. Термин «архитектура» близок к термину «архитектура».



Рисунок 6 — Архитектура информационной модели привода
Figure 6 — Architectonics of the drive information model

Архитектура (системы) — фундаментальные концепции или свойства системы в ее среде, воплощенные в ее элементах, отношениях, а также в принципах ее проектирования и развития [26].

Особенность состоит в том, что *архитектоника* описывает не только принципы, но и эволюцию продуктов в течение их жизненного цикла. Это отражается в следующих аспектах:

- система представлений, моделей и методов расширяется с самого начала проектирования объекта;
- данные, поступающие в течение жизненного цикла продукта, определяют его состояние (работоспособность) и условия эксплуатации с возрастающей точностью.

Такой подход созвучен мнению М. Гривса: «С самого начала предполагается, что цифровой двойник будет существовать на всех четырех этапах жизненного цикла продукта: проектирование, создание, эксплуатация/поддержка и утилизация» [27].

На рисунке 6 показана архитектура информационной модели привода. Она включает в себя основные представления (виды) и модели привода, а также поддерживающие их методы. Новые базовые изображения показаны в прямоугольных рамках в виде аббревиатур: КС — кинематическая схема; РПК — ресурсно-прочностные кривые; РМС — регулярная механическая система; РДС — регулярная динамическая схема; СРМ — структурно-распределительная матрица; L-in — лямбда-индикатор; ОПУЭ — относительные продолжительности условий эксплуатации; МСМН — многоуровневая схема «механика — надежность»; СПС — схема предельных состояний.

Исходные данные включают, прежде всего, передаточные числа и количество степеней сво-

боды W привода. Эти данные являются основой для последующего синтеза структур (блок-схем) и кинематической схемы, которые служат первым базовым представлением привода. Последний (верхний) блок — процедура прогнозирования и управления состоянием привода (Prognostics and Health Management — PHM).

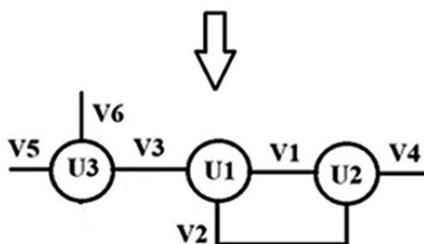
Компоненты рассмотренной архитектуры подробно описаны ниже.

4.1. Синтез схемы. При синтезе структур известны подходы, основанные на перечислении графов. Однако возникает проблема изоморфизма, когда внешне различные графы соответствуют одной и той же структуре. Разработан метод синтеза структур приводов, основанный на канонических матрицах инцидентий [28], который обеспечивает однозначность получения структур для последующего синтеза кинематической схемы.

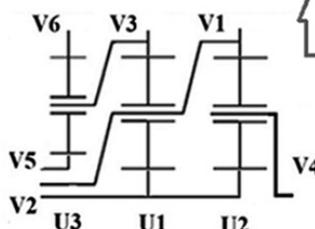
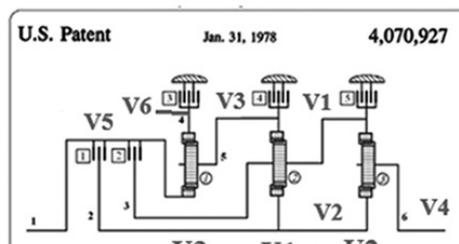
На рисунке 7 показан переход «каноническая матрица — структура — кинематическая схема — трансмиссия» (на примере известной World Transmission). Это характерно для разработанного структурно-схемного метода, основанного на предварительном построении структурных фрагментов и использовании поискового (генетического) алгоритма для нахождения параметров механизмов, удовлетворяющих заданной гамме передаточных чисел трансмиссии. Второй разработанный подход основан на использовании структурно-схемных закономерностей, присущих трансмиссиям различных типов, в том числе вально-планетарным и планетарным. Третий подход — разработка и использование нового механизма. Этот подход реализован на основе разработанной модификации известного механизма Симпсона. Примеры синтеза приведены в [29], а технические решения,

**Синтез кинематической схемы:
каноническая матрица
инцидентий (A)**

A	V1	V2	V3	V4	V5	V6
U1	1	1	1			
U2	1	1		1		
U3			1		1	1



World Transmission



Синтез
Методы
1, 2, 3

Рисунок 7 — Использование канонической матрицы инцидентий для получения структур и последующего синтеза схем привода
Figure 7 — Usage of the canonical incident matrix to obtain structures and subsequent synthesis of drive diagrams

полученные в результате синтеза трансмиссий указанными методами, представлены в [30–32].

4.2. Квазистатические и кинематические расчеты привода. Для моделирования механических систем разработано множество пакетов прикладных программ. Их обзор и классификация представлены в [29]. Пакеты разделены на 4 класса, в основе каждого из которых выделен и представлен характерный признак формирования расчетной модели, используемой при моделировании.

Класс «Уравнения». К нему отнесены пакеты (acslX, ExpertControl, SimCreator, VisSim), облегчающие составление математической модели объекта.

Класс «Структурные компоненты». К этому классу отнесены пакеты программ (MotionGenesis Kane, NEWEUL, MBDyn), которые используют символические (символьные), лингвистические и другие математически сложные виды представления объектов.

Класс «Тела и связи». Этот класс составляют универсальные программные пакеты, которые ориентированы на 3D-моделирование со связями между телами (ADAMS, SimPack, CarSim, TruckSim, BikeSim, SuspensionSim, Multibody Dynamics Simulation, SAMCEF Mecano, VORTEX).

Класс «Библиотеки узлов». Пакеты этого класса (LMS Imagine.Lab AMESim, SimulationX — преемники ITI-SIM Simulation, DYMOLA, EASY5, 20-SIM, MapleSim, Simscape Driveline, EcosimPro) характеризуются использованием библиотек типов и видов распространенных узлов.

Все эти пакеты — универсального применения. Но многие из них имеют специальные модули/подсистемы для моделирования приводов (трансмиссий). Например, в среде Modelica разработана подсистема Gear («Передача»). Она содержит типовые передачи с неподвижными осями колес и планетарные передачи. В моделях механизмов возможен учет потерь мощности.

Пакет Romax Concept [33] позиционирует себя как самый простой и быстрый инструмент для проектирования трансмиссий, фактически использует эскизы трансмиссий (рисунок 8). Таким образом, известные пакеты не предоставляют универсального и экономичного инструмента для квазистатических и кинематических расчетов привода на стадии его представления кинематической схемой.

На рисунке 9 показана кинематическая схема Word Transmission и набор цифровых данных для ее описания в пакете SCOSIR21 (Скоростной и силовой расчет многоступенчатого механического привода произвольной конфигурации с механизмами произвольного типа) [34].

Очевидно, что подобное представление существенно экономичней эскизного отображения трансмиссии. Вторая строка (см. рисунок 9) содержит число звеньев 6 элементов управления 5 и механизмов 3, а также число нестандартных механизмов 0. Две последующие строки описы-

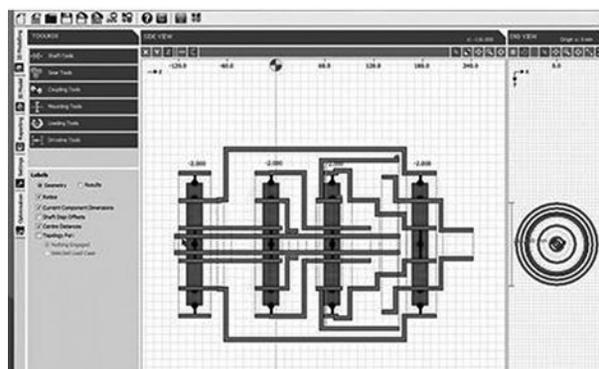


Рисунок 8 — Изображение трансмиссии в пакете Romax Concept
Figure 8 — Transmission image in the Romax Concept package



Рисунок 9 — Кинематическая схема (a) и ее описание (b) в пакете SCOSIR21 [28]
Figure 9 — Kinematic diagram (a) and its description (b) in the SCOSIR21 package [28]

вают входение звеньев в элементы управления. Последующие три строки — входение звеньев в механизмы. Далее указана строка с внутренними передаточными числами механизмов и строка значений КПД механизмов. Эта первая часть данных полностью описывает кинематическую схему.

Вторая часть данных описывает число передач (режимов), для которых проводятся расчеты (7). Далее для каждой передачи указано число включаемых элементов управления и номера включаемых элементов.

Трудно предложить более лаконичное представление кинематической схемы и ее режимов работы.

Пакет SCOSIR21 предназначен для проведения всех видов расчета привода, представленного данными, характеризующими:

- состав привода (число элементов управления преобразующих механизмов);
- принадлежность звеньев определенным механизмам;
- параметры механизмов привода;
- начальные условия (включенные элементы управления на рассматриваемой передаче/режиме).

Преобразующие механизмы могут быть с неподвижными осями валов (вальные) и планетарными.

Отображение самой кинематической схемы в явном виде не используется; необходимую для расчета информацию содержат входные цифровые данные. При необходимости эти данные могут быть использованы для построения кинематической схемы.

Рассчитываются все параметры, которые могут быть получены по кинематической схеме многоступенчатого привода на всех передачах, а именно: угловые скорости основных звеньев и сателлитов планетарных механизмов, моменты на звеньях с учетом и без учета КПД отдельных механизмов, КПД привода в целом, направления потоков мощности в механизмах (для отслеживания режимов циркуляции мощности).

Этот пакет в виде расчетного модуля используется также в разработанных пакетах Visual Static и Kinematic. Последний позволяет пользователю изобразить на экране компьютера кинематическую схему, а все связи механизмов, необходимые для расчета, определяются по этой схеме автоматически. Подробные примеры расчетов приводятся в [29].

4.3. Оценка привода на уровне кинематической схемы. Использование расчетов основных параметров по кинематической схеме позволило решить задачу комплексной оценки привода на ранних стадиях проектирования.

Совершенство привода как механической системы определяется на основе комплекса показателей, характеризующих его базовые технические свойства:

- функциональность (ряд передаточных чисел K_{FN} и диапазон K_D);
- энергопотребление (КПД, энергоэффективность K_{EF});
- конструктивные свойства (компактность K_P и конструктивная сложность K_{SMP});
- потенциальный ресурс (долговечность K_{DL}).

Радарная диаграмма в решаемой задаче (оценка схемы с учетом многих критериев) служит не только для отображения многомерных данных, представляющих отдельные показатели привода, но и для многокритериальной оценки (рисунок 10).

В качестве комплексного показателя качества привода используется площадь радарной диаграммы K_Q . Кроме того, для оценки чувствительности результата к значимости (весу) отдельных показателей предусматривается дополнительный анализ. Примеры расчетов приведены в [29].

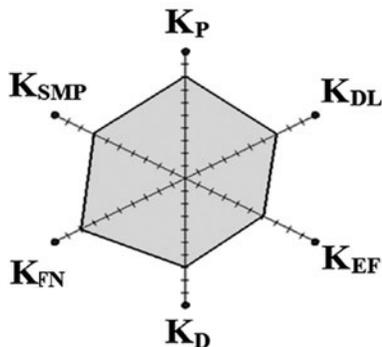


Рисунок 10 — Использование радарной диаграммы для оценки совершенства привода на уровне кинематической схемы
Figure 10 — Usage of a radar chart for drive excellence ratings at the level of kinematic scheme

4.4. Динамические расчеты привода. Подготовка (схематизация) и проведение динамических расчетов привода основаны на концепции РМС [35], позволяющей корректно схематизировать механические объекты, использовать РДС для компактного символического отображения расчетных схем. Универсальность и автоматизация расчетов обеспечивается также применением СРМ и индикаторов состояния L-in устройств с переменной структурой. Последнее методическое положение дает возможность формировать универсальные уравнения динамики систем, содержащих компоненты с переменными состояниями (элементы управления, подсистема «колесо — опорная поверхность»), которые широко представлены в динамических системах приводов и сопряженных с ними агрегатов и подсистем.

Основные виды динамических расчетов:

- расчет частот и форм собственных колебаний;
- моделирование переходных процессов;
- имитационное моделирование рабочих процессов.

Расчет частот и форм собственных колебаний.

Для данного вида расчетов разработана программа CFVARSYS (Расчет частот и форм собственных колебаний механических систем произвольной структуры с множеством возможных состояний) [36].

Программа позволяет вычислять собственные частоты и формы колебаний регулярных механических систем как однородных (элементы которых совершают только поступательное или только вращательное движение), так и неоднородных. Можно рассчитывать системы различной структуры: цепные, разветвленные, кольцевые, с реактивными звеньями, содержащие зубчатые передачи и дифференциалы. Программа пригодна для расчета полуопределенных систем (имеющих нулевую собственную частоту, что характерно для трансмиссий) и систем с кратными частотами. Для систем, имеющих множество возможных состояний, используются индикаторы состояния L-in устройств переменной структуры (муфт и тормозов), определяющие структуру системы в зависимости от состояний таких устройств (замкнутое или разомкнутое).

Нормализация динамических схем [37]. Дальнейшее развитие концепции РМС включает обобщение случаев целесообразного перехода от систем, содержащих жесткие устройства-соединители с заданными кинематическими связями звеньев к эквивалентным системам, в которых устройства-соединители наделены рациональной конечной жесткостью.

Примером устройства первого типа является трехзвенный дифференциал, кинематика которого описывается формулой Виллиса, а второго — трехзвенный податливый (с конечной жесткостью) дифференциал, у которого внутренние моменты распределяются в соответствии с его внутренними силовыми передаточными числами. Такие случаи приводят к некоторому искажению кинематиче-

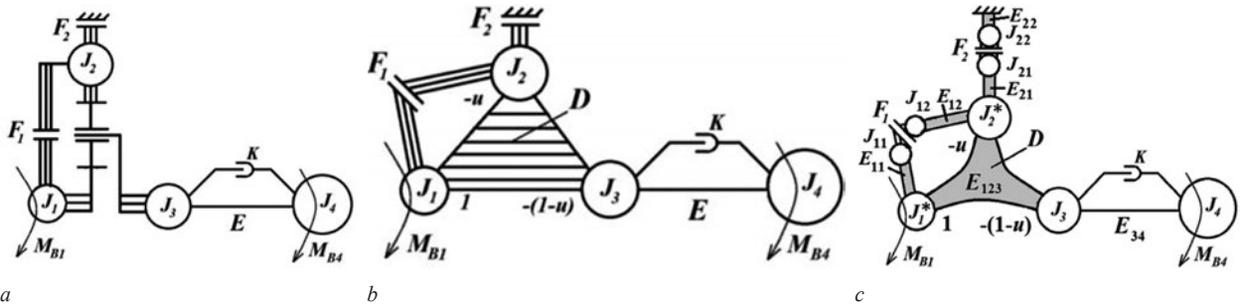


Рисунок 11 — Регулярная механическая система (a), регулярная динамическая схема (b) и нормализованная динамическая схема (c)
 Figure 11 — Regular mechanical system (a), regular dynamic scheme (b) and normalized dynamic scheme (c)

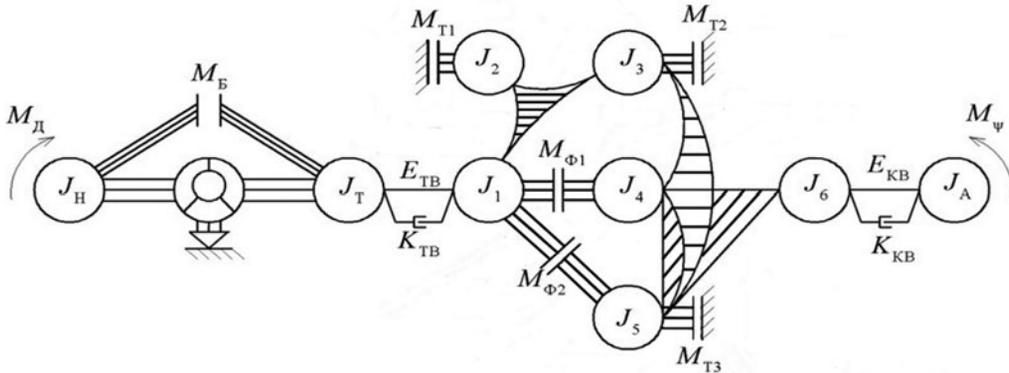


Рисунок 12 — Динамическая схема трансмиссии
 Figure 12 — Transmission dynamic scheme

ских характеристик (отклонению скоростей масс дифференциала от формулы Виллиса). При этом массы дифференциала совершают колебания за счет вводимой конечной жесткости в окрестностях траекторий, определяемых указанной формулой. Поэтому принятое допущение обычно не ведет к ошибкам в практических расчетах.

В общем случае РМС может быть объектом, содержащим жесткие и упругие элементы. Типичный пример РМС с жесткими и упругими элементами представлен на рисунке 11 a. Динамические схемы, связанные с этой РМС, показаны на рисунке 11 b и c.

Во время расчета объекта с жесткими и упругими звеньями необходимо решать систему дифференциальных уравнений, что сопровождается решением системы алгебраических уравнений для определения внутренних моментов в жестких устройствах.

Чтобы избежать решения системы алгебраических уравнений, динамическую систему можно нормализовать, заменив жесткие звенья податливыми, имеющими упругость $E_i > 0$ (см. рисунок 11 b); для тормозов внешние звенья, такие как E_{22} , можно оставить жесткими. В нормализованной системе чередуются массы и упругие звенья. Для определения внутренних моментов замкнутых муфт/тормозов вместо решения системы алгебраических уравнений используется простая формула:

$$M_{12} = (J_2 M_1 + J_1 M_2) / (J_1 + J_2),$$

где M_{12} — внутренний момент в замкнутом фрикционе; J_1 и J_2 — моменты инерции примыкающих к фрикциону маховых масс; M_1 и M_2 — моменты в примыкающих упругих звеньях.

Маховые массы J_1 и J_2 модифицируются путем выделения из них составляющих, непосредственно примыкающих к фрикционным устройствам (локальная схематизация фрикционных устройств).

Нормализация упрощает формирование математических моделей и их программирование, но увеличивает количество дифференциальных уравнений. При современном уровне вычислительной техники это не создает проблем.

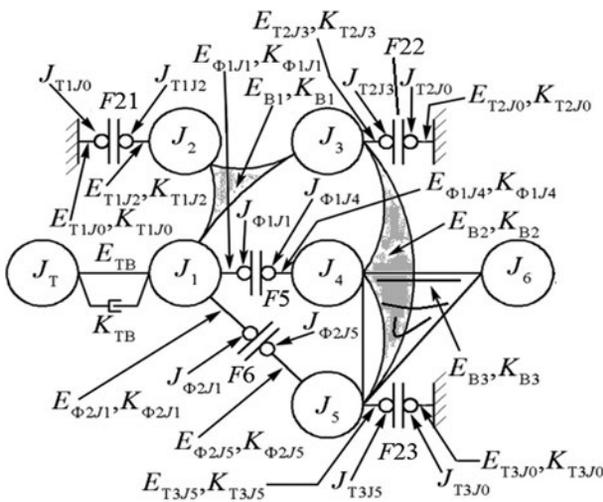


Рисунок 13 — Нормализованная динамическая схема коробки передач
 Figure 13 — Normalized dynamic gearbox scheme

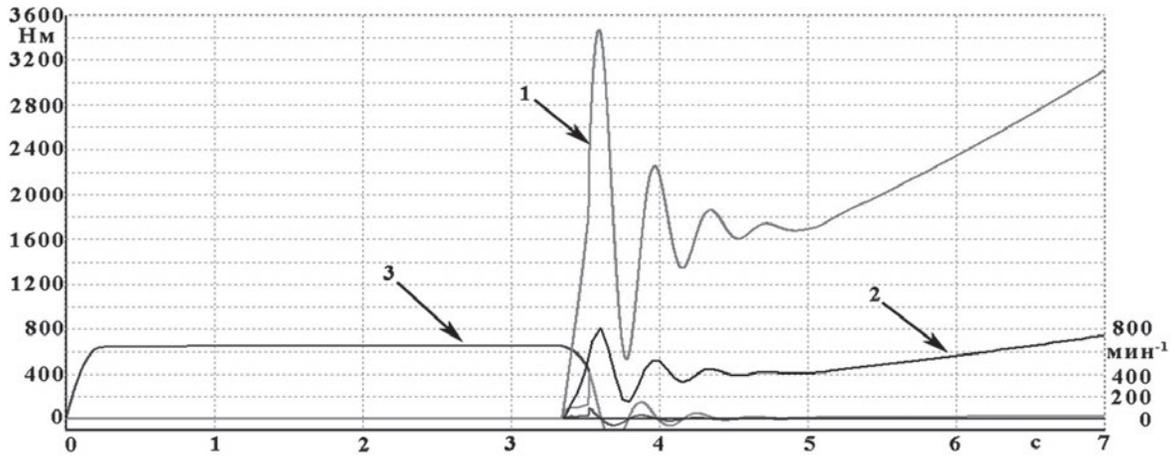
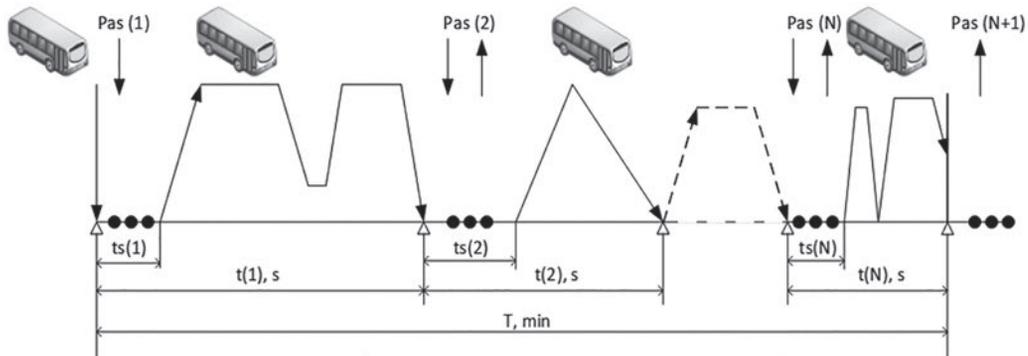
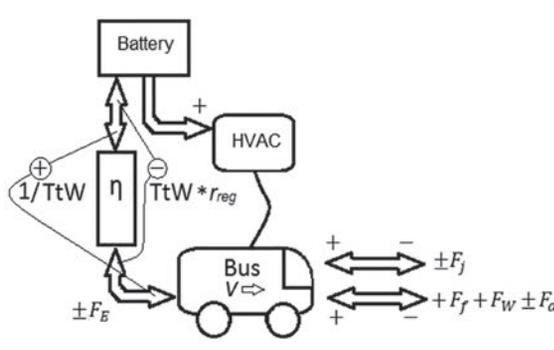


Рисунок 14 — Результаты компьютерного моделирования процесса трогания автомобиля: 1 — крутящий момент на карданном валу; 2 — крутящий момент, передаваемый фрикционом первой передачи; 3 — частота вращения турбинного колеса гидротрансформатора
 Figure 14 — Results of computer simulation of the process of starting the car: 1 — driveshaft torque; 2 — torque transmitted by the first gear clutch; 3 — rotational speed of the turbine wheel of the torque converter



Стадии движения электробуса по маршруту (вверху) действующие силы (внизу)



Общая сила тяги	$F_E = F_f + F_W + F_\alpha + F_j$	(1)
Сила сопротивления качению	$F_f = f m_A g \cos \alpha$	(2)
Сила сопротивления подъему	$F_\alpha = m_A g \sin \alpha$	(3)
Сила сопротивления ускорению	$F_j = \delta m_A j$	(4)
Сила сопротивления воздуха $F_{wк}$		
- при постоянной скорости V_c :	$F_{wк} = k_B A v_c^2$	(5)
- при постоянном ускорении j :	$F_{wк} = k_B A j S$	(6)
где $F_{wкэв}$ = эквивалентная сила, действующая на расстоянии S .		
При постоянном ускорении / замедлении j и изменении скорости от 0 до V_d (или от V_d до 0) $F_{wкэв}$ можно рассчитать также по формуле		
	$F_{wкэв} = k_B A (\sqrt{0.5 V_d})^2 \approx k_B A (0.707 V_d)^2$	(7)

Универсальное описание энергозатрат: Работа = Сила * Расстояние

Рисунок 15 — Особенности разработанной модели процесса движения
 Figure 15 — Features of the developed model of the movement process

Примером практической реализации данных методических положений является работа [37], в которой разработана компьютерная программа и проведено моделирование переходных процессов трансмиссии МЗКТ-4361.

Показаны динамическая схема трансмиссии (рисунок 12), нормализованная динамическая схема наиболее сложного узла (коробка передач, рисунок 13) и результаты расчета нагрузок при трогании автомобиля (рисунок 14).

Имитационное моделирование рабочих процессов. Подходы и примеры имитационного моде-

лирования рабочих процессов мобильных машин приведены в [39]. Один из подходов, основанный на построении и отслеживании скоростного профиля машины, реализован в упомянутом выше проекте PLATON в виде компьютерной программы EBus. Основная цель проекта PLATON — создание инструмента, содержащего необходимые экспертные знания, опыт, методические и программные средства для поддержки процесса планирования развертывания электрических автобусов, встроенного в веб-приложение со свободным доступом для заинтересованных сторон [40]. По-

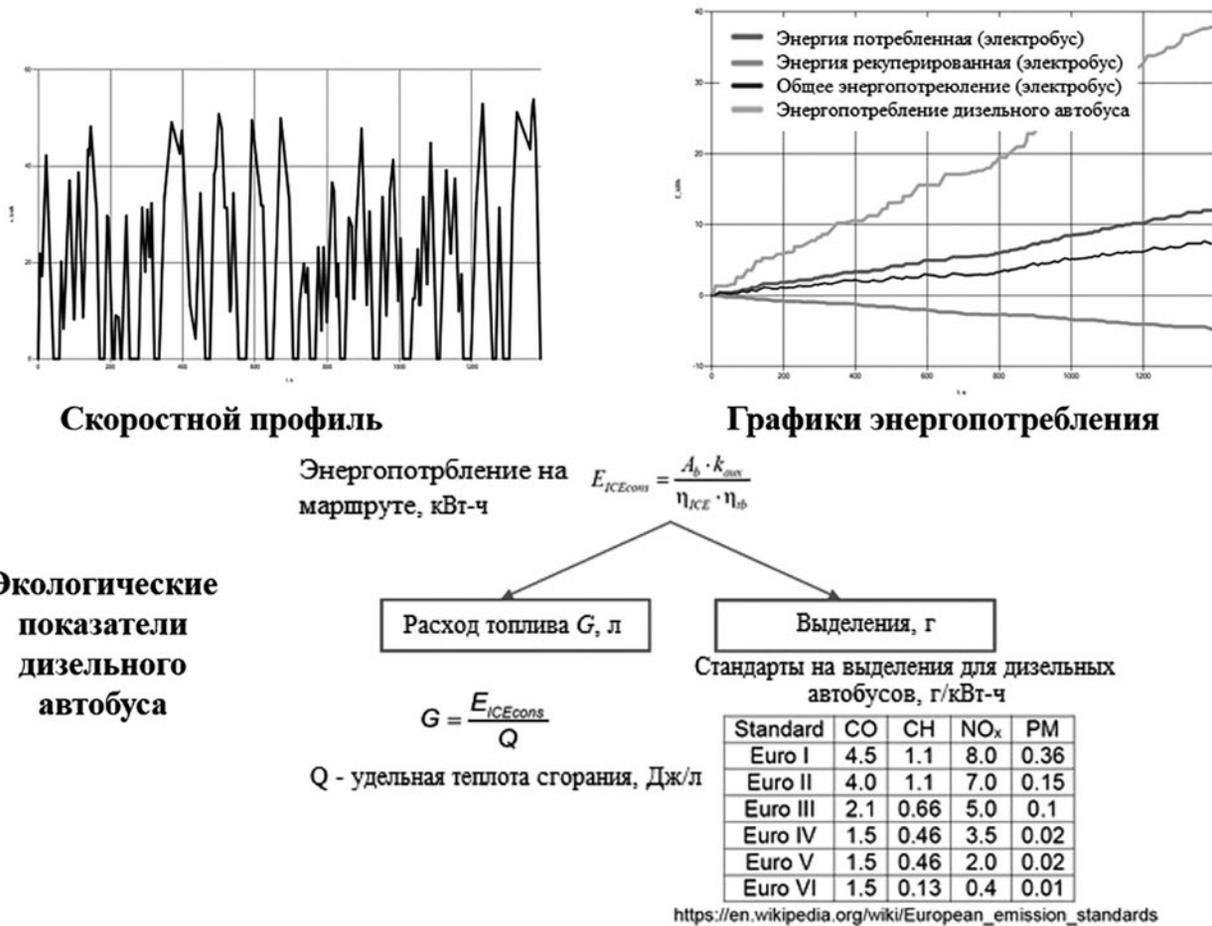


Рисунок 16 — Основные результаты работы программы ECVBus
Figure 16 — Main results of the ECVBus program

этому программа ECVBus в числе других разработанных инструментов размещена в свободном доступе на сайте координатора проекта в разделе DOWNLOADS [40].

В процессе выполнения проекта проведены экспериментальные исследования значимости действия факторов, определяющих энергопотребление [41]. В результате был разработан инструмент ECVBus+, который помимо программы ECVBus включает также процедуру вероятностной оценки и выбора расчетного значения параметра, описывающего исследуемое свойство мобильной машины (например, энергопотребление) [42–45]. Кроме того, разработан сравнительный метод оценки энергопотребления электробуса по данным о потреблении топлива его дизельного аналога. Последние две процедуры реализованы в среде Excel.

Программа ECVBus предназначена для расчета энергопотребления электрических и дизельных автобусов на маршруте. ECVBus также используется для оценки расхода топлива и выбросов загрязняющих веществ дизельными автобусами-аналогами, имеющими ту же полную массу, что и электробусы.

ECVBus позволяет определять:

- для электробусов и дизельных автобусов:
 - энергозатраты электрического и дизельного автобуса на маршруте;

- для электробусов:

- затраты на электроэнергию в сутки, месяц, год;
 - емкость аккумуляторной батареи электробуса для определенного набора маршрутов;
 - расстояние, которое электробус с определенной емкостью аккумулятора после зарядки может пройти по заданному маршруту (для определения местоположения следующего зарядного устройства);
- для дизельных автобусов:
- расход топлива;
 - выбросы загрязняющих веществ.

На рисунке 15 представлены особенности разработанной модели процесса движения, которые реализованы в программе ECVBus, а на рисунке 16 — основные результаты работы программы.

Выводы по вышеизложенным материалам сформулированы в заключении, которое будет представлено во второй части статьи.

Список литературы

1. ТОП-10 результатов деятельности ученых Национальной академии наук Беларуси за 2014–2020 годы в области фундаментальных и прикладных исследований: (научное издание) / науч. ред. А.И. Иванец; сост.: Н.М. Литвинко, С.С. Юрешкий. — Минск: Беларус. навука, 2021. — 75 с.
2. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В.Б. Альгин [и др.]; под ред. В.Б. Альгина, В.Е. Старжинского. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 406 с.

3. Гринберг, А.С. Информационные модели и ресурсы машин / А.С. Гринберг, В.Б. Альгин // Механика машин на пороге III тысячелетия. — Минск, 2001. — С. 272–281.
4. Grieves, M. Origins of the Digital Twin Concept / M. Grieves. — 2016. — DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.
5. Grieves, M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins / M. Grieves // Complex Systems Engineering: Theory and Practice / ed. by S. Flumerfelt [et al.]. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. — Pp. 175–200.
6. Dontha, R. Data and Trending Technologies: Role of Data in Digital Thread [Electronic resource] / R. Dontha. — Mode of access: <https://tdan.com/data-and-trending-technologies-role-of-data-in-digital-thread/24055>. — Date of access: 22.03.2021.
7. Tracking production in a production facility, using searchable digital threads: EP 3 208 757 A1 / A. Ben-Bassat, E. Goldner, N. Lifshitz, M. Diga, G. Kozarev. — Publ. date: 23.08.2017.
8. Managing component information during component lifecycle: pat. US 8 991 692 B2 / A. Kumar, S. Bates, K.Y. Ung. — Publ. date: 31.03.2015.
9. Goldade, V. Smart Materials Taxonomy / V. Goldade, S. Shil'ko, A. Neverov. — CRC Press, Taylor&Francis Group, 2015. — 277 p.
10. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б.А. Люкшин [и др.]. — Новосибирск: Изд.-во СО РАН, 2017. — 311 с.
11. Uniaxial Compression Model for a Metal-Matrix/Hollow-Microsphere Composite Synthesized by Pressure Infiltration / S.V. Shil'ko [et al.] // Mechanics of Materials. — 2020. — Vol. 144. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103349>.
12. Shilko, S. Artificial Smart Composites: Bionics Principles / S. Shilko // Glob J. Eng. Sci. — 2020. — Vol. 5, iss. 4. — DOI: <https://doi.org/10.33552/GJES.2020.05.000620>.
13. Шилько, С.В. Прогнозирование функциональных параметров тензочувствительного наноструктурированного полимер-керамического покрытия на основе анодных оксидов металлов / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, А.Н. Плиговка // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 4(53). — С. 35–42.
14. Хотько, А.В. Возможности оптимального проектирования автомобильной шины по критерию пространственной равнопрочности / А.В. Хотько, С.В. Шилько, С.Н. Бухаров // Механика машин, механизмов и материалов. — 2020. — № 4(53) — С. 11–18.
15. The Digital Twin Concept in Industry — A Review and Systematization / M. Sjarov [et al.] // 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vienna, 2020. — DOI: <https://doi.org/10.1109/etfa46521.2020.9212089>.
16. Grieves, M.W. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication [Electronic resource] / M.W. Grieves. — Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication. — Date of access: 06.07.2021.
17. Grieves, M.W. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M.W. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / eds. F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. — Cham: Springer International Publishing, 2017. — Pp. 85–113.
18. Grieves, M.W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises / M.W. Grieves // International Journal of Product Development. — 2005. — Vol. 2, no. 1/2. — Pp. 71–84. — DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>.
19. The product avatar as a product-instance-centric information management concept / K.A. Hribernik [et al.] // International Journal of Product Lifecycle Management. — 2006. — Vol. 1, no. 4. — Pp. 367–379. — DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2006.011055>.
20. Draft modeling, simulation, information technology&processing roadmap. Technology Area 11 [Electronic resource]. — Mode of access: https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf.
21. Glaessgen, E.H. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles / E.H. Glaessgen, D.S. Stargel // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. — Honolulu, 2012. — Vol. 8. — Pp. 7247–7260.
22. Ершов, А. Об информационной модели машины: колонка редактора / А. Ершов // Микропроцессорные средства и системы. — 1985. — № 4. — С. 2.
23. Keuthen, M. REXS — Standardized Gear Unit Model / M. Keuthen // International Conference on Gears 2019, Garching, Sept. 18–20, 2019. — Vol. 2355. — Pp. 701–712.
24. Ученые, прославившие Беларусь: справ. / сост. М.П. Ахремчик [и др.]. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 368 с.
25. Hartmann, D. Digital Twins [Electronic resource] / D. Hartmann, H. Van der Auweraer. — Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/2001.09747.pdf>. — Date of access: 19.09.2021.
26. Systems and software engineering — Architecture description: ISO / IEC / IEEE 42010: 2011. — Publ. date: 12.2011. — 37 p.
27. Grieves, M. Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking / M. Grieves. — New York: McGraw-Hill, 2006.
28. Альгин, В.Б. Расчет мобильной техники: кинематика, динамика, ресурс / В.Б. Альгин. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 271 с.
29. Альгин, В.Б. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин, С.Н. Поддубко. — Минск: Беларус. навука, 2019. — 549 с.
30. Планетарная коробка передач (варианты): пат. ВУ 22640 / В.Б. Альгин, С.Н. Поддубко. — Оpubл.: 28.02.2019.
31. Основная коробка планетарной коробки передач, планетарная коробка передач и способ ее получения: пат. EU 033682 / В.Б. Альгин, С.Н. Поддубко. — Оpubл.: 15.11.2019.
32. Основная коробка планетарной коробки передач. Планетарная коробка передач: заявка EU 201700590 / В.Б. Альгин, С.Н. Поддубко, Д.С. Белабенко, Е.В. Кузнецов. — Оpubл. 2019.04.30.
33. Concept Design Software: Explore drivetrain designs with confidence using Romax Concept [Electronic resource] / HEX-AGON. — Mode of access: <https://romaxtech.com/software/concept-design/>. — Date of access: 08.07.2021.
34. SCOSIR21: комп. программа: св-во о регистрации ВУ 1438 / В.Б. Альгин, С.В. Ломоносов, М.А. Кононович, В.М. Сорочан. — Оpubл.: 23.08.2021.
35. Альгин, В.Б. История и современное состояние белорусской научной школы расчета и проектирования трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин // Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / под ред. В.Б. Альгина и В.Е. Старжинского. — Минск: Беларус. навука, 2017. — Гл. 1. — С. 10–76.
36. Расчет частот и форм собственных колебаний механических систем произвольной структуры со множеством возможных состояний: комп. программа: св-во о регистрации ВУ 1024 / В.Б. Альгин, А.М. Гоман, Т.С. Логвинец, В.В. Шпортко. — Оpubл. 22.02.18.
37. Algin, V. Models and approaches in design and diagnostics of vehicles planetary transmissions / V. Algin, M. Ishin, S. Paddubka // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 393. — Pp. 1–10. — DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012042>.
38. Белабенко, Д.С. Оценка и снижение динамической нагруженности трансмиссии с блоком взаимодействующих фрикционных на основе моделирования процессов в ее гидромеханической системе: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Д.С. Белабенко. — Минск, 2020. — 23 с.
39. ЕСBus: комп. программа: св-во о регистрации ВУ 1342 / В.Б. Альгин, Т.С. Логвинец, А.М. Гоман, В.В. Шпортко. — Оpubл.: 12.10.2020.
40. PLATON [Electronic resource]. — Mode of access: <http://service.ifak.eu/PLATON-Web/home.html>. — Date of access: 08.07.2021.
41. Algin, V. Main Operational Factors Determining the Energy Consumption of the Urban Electric Bus: Schematization and Modeling / V. Algin, A. Goman, A. Skorokhodov // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2019. — Вып. 8. — С. 185–194.
42. Algin, V. Justification of calculated cases for the assessment of the basic properties of land vehicles / V. Algin // Proc. of the 29th European Safety and Reliability Conference, Sept. 22–26, 2019 / eds. M. Beer, E. Zi. — Hannover, 2019. — Pp. 3510–3517.
43. Algin, V. Calculated Modes for Assessing Operation Properties and Dependability of Vehicles / V. Algin // Advances in Mechanism and Machine Science: Proc. of the 17th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science. — Springer, 2019. — Pp. 3749–3758. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_370.
44. Methodology for Probabilistic Assessment of Energy Consumption by Electric Buses on Routes / V. Algin [et al.] // Electric Mobility in Public Transport — Driving Towards Cleaner Air. — Springer, Cham, 2021. — Pp. 83–105. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67431-1_6.
45. LSCurve: комп. программа: св-во о регистрации ВУ 1450 / В.Б. Альгин, В.М. Сорочан, М.А. Кононович, С.В. Ломоносов. — Оpubл.: 14.10.2021.

PODDUBKO Sergey N., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof

Director General¹

E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

ALGIN Vladimir B., D. Sc. in Eng., Prof.

Deputy Chief of the R&D Center “Mining Machinery”¹

E-mail: vladimir.algin@gmail.com

ISHIN Nikolay N., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Chief of the R&D Center “Mining Machinery”¹

E-mail: nik_ishin@mail.ru

SHIL'KO Sergey V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory “Mechanics of Composites and Biopolymers”²

E-mail: shilko_mpri@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

Received 30 June 2021.

INNOVATIVE DEVELOPMENTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS IN THE FIELD OF DRIVE MECHANICS. PART 1. MODEL APPROACH AND APPLICATION OF DIGITAL TWINS

The article considers innovative developments in the field of drive mechanics of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus in cooperation with the V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of the NAS of Belarus and other organizations. The main attention is paid to the results noted in the TOP-10 competition of the NAS of Belarus, in which the creative team of specialists of the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus and the V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of the NAS of Belarus became the winner, as well as the monograph “Gears and transmissions in Belarus: design, technology, evaluation of properties”, which became a prize-winner in the All-Russian competition named after Ivan Fedorov with international participation in 2020 in the nomination for the best publication on research work. New results obtained by the authors in 2020–2021 on the subject under consideration are also presented. The article includes the provisions of the “Industry 4.0” concept with an emphasis on the model approach and the use of digital twins of materials and products, the provisions of the lifetime mechanics of machines developed at the Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, and the developed architectonics of the drive information model.

Keywords: drive mechanics, innovations, digital twins of products and materials, lifetime mechanics of machines, architectonics of information model, software

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2021-4-57-5-19>

References

- Litvinko N.M., Yuretskiy S.S. *TOP-10 rezultatov deyatelnosti uchennykh Natsionalnoy akademii nauk Belarusi za 2014–2020 gg. v oblasti fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy* [TOP 10 results of the activity of scientists of the National Academy of Sciences of Belarus for 2014–2020 in the field of fundamental and applied research]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2021. 75 p. (in Russ.).
- Algin V.B., et al. *Zubchatye peredachi i transmissii v Belarusi: proektirovaniye, tekhnologiya, otsenka svoystv* [Gears and transmissions in Belarus: design, technology, evaluation of properties]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 406 p. (in Russ.).
- Grinberg A.S., Algin V.B. *Informatsionnye modeli i resursy mashin* [Information models and lifetimes of machines]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Mekhanika mashin na poroge 3 tysyacheletiya”* [Proc. International Scientific Conference “Mechanics of machines on the threshold of the third millennium”]. Minsk, 2001, pp. 272–281 (in Russ.).
- Grieves M. *Origins of the digital twin concept*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>.
- Grieves M. *Virtually intelligent product systems: digital and physical twins*. *Complex systems engineering: Theory and practice*, 2019, pp. 175–200.
- Dontha R. *Data and trending technologies: Role of data in digital thread*. 2018. Available at: <https://tdan.com/data-and-trending-technologies-role-of-data-in-digital-thread/24055> (accessed 22 March 2021).
- Ben-Bassat A., Goldner E., Lifshitz N., Diga M., Kozarev G. *Tracking production in a production facility, using searchable digital threads*. Patent EP, no. 3 208 757 A1, 2017.
- Kumar A., Bates S., Ung K.Y. *Managing component information during component lifecycle*. Patent US, no. 8 991 692 B2, 2015.
- Goldade V., Shil'ko S., Neverov A. *Smart Materials Taxonomy*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. 277 p.
- Lyukshin B.A., et al. *Dispersno-napolnennyye polimernyye kompozity tekhnicheskogo i meditsinskogo naznacheniya* [Dispersed-filled polymer composites for technical and medical purposes]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2017. 311 p. (in Russ.).

11. Shil'ko S.V., Chernous D.A., Zhang Q., Lin Y., Choe H. Uniaxial compression model for a metal-matrix/hollow-microsphere composite synthesized by pressure infiltration. *Mechanics of materials*, 2020, vol. 144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103349>.
12. Shilko S. Artificial smart composites: bionics principles. *Global journal of engineering sciences*, 2020, vol. 5, iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.33552/GJES.2020.05.000620>.
13. Shil'ko S.V., Chernous D.A., Pligovka A. Prognozirovanie funktsionalnykh parametrov tenzochuvstvitelnogo nanostrukturirovannogo polimer-keramicheskogo pokrytiya na osnove anodnykh oksidov metalla [Prediction of functional parameters for a nanostructured polymer-ceramic coating on the basis of anodic oxides of metals]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 4(53), pp. 35–42 (in Russ.).
14. Khotko A.V., Shil'ko S.V., Buharov S.N. Vozmozhnosti optimal'nogo proektirovaniya avtomobilnoy shiny po kriteriyu prostanstvennoy ravnoprochnosti [Possibilities for optimal design of a car tire based on a criterion of spatial strength balance]. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, 2020, no. 4(53), pp. 11–18 (in Russ.).
15. Sjarov M., Lechler T., Fuchs J., Brossog M., Selmaier A., Faltus F., Donhauser T., Franke J. The digital twin concept in industry — a review and systematization. *Proc. 25th IEEE International conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*. Vienna, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/etfa46521.2020.9212089>.
16. Grieves M.W. *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication (accessed 06 July 2021).
17. Grieves M.W., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems*, 2017, pp. 85–113.
18. Grieves M.W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International journal of product development (IJPDP)*, 2005, vol. 2, no. 1/2, pp. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPDP.2005.006669>.
19. Hribernik K.A., Rabe L., Thoben K.-D., Schumacher J. The product avatar as a product-instance-centric information management concept. *International journal of product lifecycle management (IJPLM)*, 2006, vol. 1, no. 4, pp. 367–379. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2006.011055>.
20. Shafto M., Conroy M., Doyle R., Glaessgen E., Kemp C., LeMoigne J., Wang L. *Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap. Technology area 11*. 2010. 32 p. Available at: https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf.
21. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. *Proc. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, Structural dynamics and materials conference*. Honolulu, 2012, vol. 8, pp. 7247–7260.
22. Ershov A. Ob informatsionnoy modeli mashiny [On the machine information model]. *Mikroprotsessornyye sredstva i sistemy*, 1985, no. 4, p. 2 (in Russ.).
23. Keuthen M. REXS — standardized gear unit model. *International conference on gears 2019*. Garching, Munich, 2019, vol. 2355, pp. 701–712.
24. Akhremchik M.P., Bondarenko E.A., Gaponenko O.A., Grusha A.I., Drozd O.M., Chernykh E.K. *Uchenye, proslavivshye Belarus* [Scientists who brought glory to Belarus]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2017. 368 p. (in Russ.).
25. Hartmann D., Van der Auweraer H. *Digital twins*. 2020. 10 p. Available at: <https://arxiv.org/pdf/2001.09747.pdf> (accessed 19 September 2021).
26. ISO/IEC/IEEE 42010:2011. *Systems and software engineering — Architecture description*. 2011. 37 p.
27. Grieves M. *Product lifecycle management: driving the next generation of lean thinking*. New York, McGraw-Hill, 2006.
28. Algin V.B. *Raschet mobilnoy tekhniki: kinematika, dinamika, resurs* [Calculation of mobile equipment: kinematics, dynamics, lifetime]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2014. 271 p. (in Russ.).
29. Algin V.B., Poddubko S.N. *Resursnaya mekhanika transmissiy mobilnykh mashin* [Lifetime mechanics of mobile machine transmissions]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2019. 549 p. (in Russ.).
30. Algin V.B., Poddubko S.N. *Planetarnaya korobka peredach (varianty)* [Planetary gearbox (variants)]. Patent BY, no. 22640, 2019 (in Russ.).
31. Algin V.B., Poddubko S.N. *Osnovnaya korobka planetarnoy korobki peredach, planetarnaya korobka peredach i sposob ee polucheniya* [The main gearbox of the planetary gearbox, the planetary gearbox and the production method]. Patent EU, no. 033682, 2019 (in Russ.).
32. Eurasian Patent Office resolution of May 11, 2021 “On the issuance of a Eurasian patent under application no. 201700590. The main gearbox of the planetary gearbox. Planetary gearbox”. *Eurasian Patent Organization*, 2021 (in Russ.).
33. *Concept Design Software: Explore drivetrain designs with confidence using Romax Concept*. Available at: <https://romaxtech.com/software/concept-design/> (accessed 08 July 2021).
34. Algin V.B., Lomonosov S.V., Kononovich M.A., Sorochan V.M. *SCOSIR21. Kompyuternaya programma* [SCOSIR21. Computer program]. Certificate BY, no. 1428, 2021 (in Russ.).
35. Algin V.B. Istoriya i sovremennoe sostoyaniye belorusskoy nauchnoy shkoly rascheta i proektirovaniya transmissiy mobilnykh mashin [History and current state of the Belarussian scientific school of calculation and design of transmissions of mobile machines]. *Zubchatye peredachi i transmissii v Belarusi: proektirovanie, tekhnologiya, otsenka svoystv*, 2017, ch. 1, pp. 10–76 (in Russ.).
36. Algin V.B., Goman A.M., Logvinets T.S., Shportko V.V. *Raschet chastot i form sobstvennykh kolebaniy mekhanicheskikh sistem proizvol'noy struktury so mnozhestvom sostoyaniy. Kompyuternaya programma* [Calculation of frequencies and forms of natural oscillations of mechanical systems of arbitrary structure with a variety of possible states. Computer program]. Certificate BY, no. 1024, 2018 (in Russ.).
37. Algin V., Ishin M., Paddubka S. Models and approaches in design and diagnostics of vehicles planetary transmissions. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2018, vol. 393. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012042>.
38. Belabenko D.S. *Otsenka i snizhenie dinamicheskoy nagruzhennosti transmissii s blokom vzaimodeystviyushchikh friktsionov na osnove modelirovaniya protsessov v ee gidromekhanicheskoy sisteme*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Evaluation and reduction of the dynamic load of a transmission with a block of interacting clutches based on modeling processes in its hydromechanical system. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Minsk, 2020. 23 p. (in Russ.).
39. Algin V.B., Logvinets T.S., Goman A.M., Shportko V.V. *ECBus. Kompyuternaya programma* [ECBus. Computer program]. Certificate BY, no. 1342, 2020.
40. *PLATON - Planning process and tool for step-by-step conversion of the conventional or mixed bus fleet to a 100% electric bus fleet*. Available at: <http://service.ifak.eu/PLATON-Web/home.html> (accessed 08 July 2021).
41. Algin V.B., Goman A.M., Skorokhodov A.S. Main operational factors determining the energy consumption of the urban electric bus: schematization and modelling. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2019, iss. 8, pp. 185–194.
42. Algin V. Justification of calculated cases for the assessment of the basic properties of land vehicles. *Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL)*. Hannover, 2019, pp. 3510–3517.
43. Algin V. Calculated modes for assessing operation properties and dependability of vehicles. *Advances in mechanism and machine science*, 2019, pp. 3749–3758. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_370.
44. Algin V., Goman A., Skorokhodov A., Bytsko O., Chistov S., Fedasenska S. Methodology for probabilistic assessment of energy consumption by electric buses on routes. *Electric mobility in public transport — driving towards cleaner air*, 2021, pp. 83–105. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67431-1_6.
45. Algin V.B., Sorochan V.M., Kononovich M.A., Lomonosov S.V. *LSCurve. Kompyuternaya programma* [LSCurve. Computer program]. Certificate BY, no. 1450, 2021 (in Russ.).