



# ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ

УДК 531.8:621.01

**В.Б. АЛЬГИН**, д-р техн. наук, проф.  
заместитель начальника НТП «Карьерная техника»<sup>1</sup>  
E-mail: vladimir.algin@gmail.com

**С.Н. ПОДДУБКО**, канд. техн. наук, доц.  
генеральный директор<sup>1</sup>  
E-mail: bats@ncpmm.bas-net.by

**В.Е. СТАРЖИНСКИЙ**, д-р техн. наук, проф.  
главный научный сотрудник<sup>2</sup>  
E-mail: star\_mpri@mail.ru

**С.В. ШИЛЬКО**, канд. техн. наук, доц.  
заведующий лабораторией механики композитов и биополимеров<sup>2</sup>  
E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28.10.2019.

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕХАНИКИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ – 2019: МИРОВЫЕ ТРЕНДЫ И ИТОГИ XV ВСЕМИРНОГО КОНГРЕССА IFToMM

*Статья представляет собой журнальную версию пленарного доклада на VIII Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике «Механика-2019», который состоялся в Минске 18–20 сентября 2019 г. Описаны мировые вызовы: старение населения, ухудшение экологии, энергетическая проблема. Указанные негативные явления в определенной степени преодолеваются за счет использования современных технологий. К ним относятся цифровизация и тесно связанная с ней инициатива «Индустрия 4.0», в которой принципиально новыми являются модельный подход и цифровой двойник изделия. Выделены и охарактеризованы основные методы создания цифровых двойников, в значительной степени развитые в механике. На примере зубчатых передач и трансмиссий показаны особенности формирования информационной модели (цифрового двойника) нестандартных и технически сложных изделий. На основе анализа трудов и событий конгресса IFToMM-2019 (г. Краков (Польша), 30 июня – 4 июля 2019 г.) представлена информация о деятельности IFToMM – наиболее влиятельной международной общественной организации в области технических наук. Материалы статьи содержат примеры и обобщения по самым современным научным направлениям, позволяя ознакомиться с ними, в первую очередь, отечественным специалистам, соотнести с ними направления и уровень собственных исследований.*

**Ключевые слова:** мировые вызовы и тренды, механика машин и механизмов, энергоэффективность, цифровизация, цифровые двойники, конгресс IFToMM-2019

**Введение.** Для преодоления негативного воздействия мировых вызовов (старение населения, ухудшение экологии, энергетическая проблема), необходимы эффективные средства, создание которых основано на использовании современных

научных достижений. Представляется, что механика выступает здесь в роли интегрирующей научной дисциплины. Значение этой древней науки обусловлено тем, что в ближайшей перспективе человек продолжит взаимодействовать с объектами

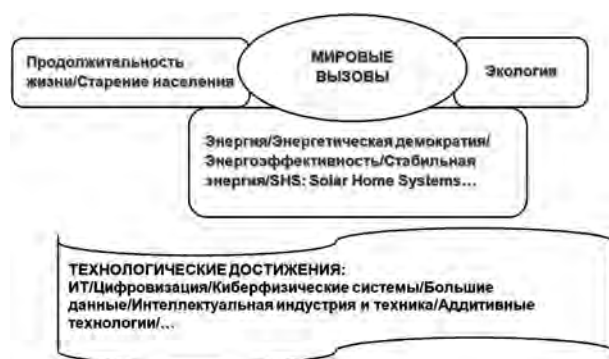


Рисунок 1 — Мировые вызовы и тренды  
Figure 1 — World challenges and trends

окружающего мира традиционным механическим способом. Кроме того, различные мультифизические технические объекты (изделия), как правило, включают механические компоненты, определяющие функциональные возможности и срок службы. В статье анализируются тенденции развития механики машин и механизмов с привлечением материалов конгресса IFToMM-2019. Она включает следующие разделы: «Мировые вызовы и тренды»; «Цифровой двойник — критическая веха на пути к интеллектуальной индустрии»; «Отечественные разработки и понимание цифрового двойника»; «Аддитивные технологии»; «Отражение мировых трендов на Всемирном конгрессе IFToMM-2019»; «События конгресса»; «Заключение».

**Мировые вызовы и тренды.** Основные мировые вызовы представлены на рисунке 1. Рост продолжительности жизни ведет к старению общества и сокращению доли трудоспособного населения.

Это происходит на фоне экологических проблем, вызванных деятельностью по удовлетворению растущих потребностей человека. Создание материальных благ требует все больших энергетических ресурсов. Возникло движение «энергетическая демократия» с идеей энергоснабжения в виде общего достояния [1]. Энергетическая проблема напрямую порождает тренд «энергоэффективность», а в сочетании с экологической проблемой — все более широкое использование возобновляемых источников энергии.

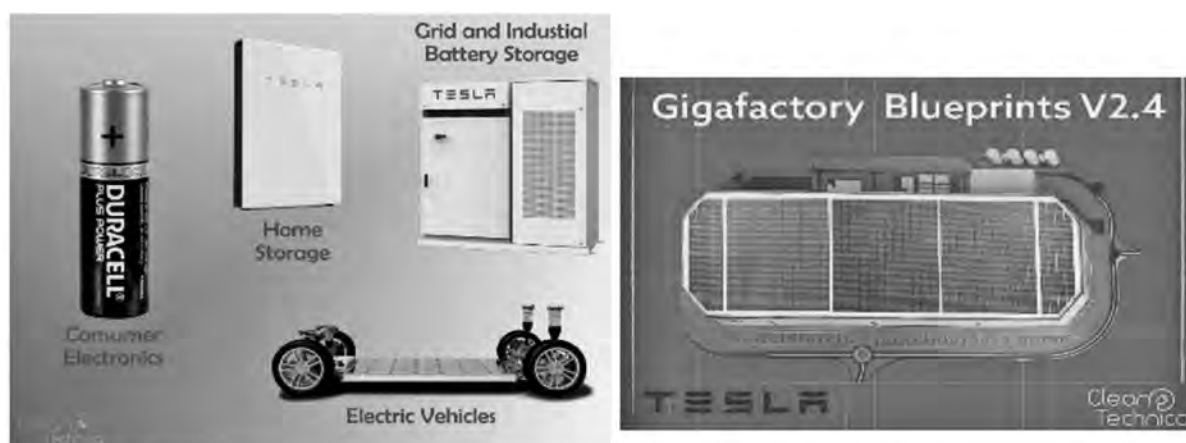
Мировые вызовы в той или иной степени преодолеваются мировыми технологическими достижениями. В контексте рассматриваемой темы (техническое развитие) наибольшее значение имеют тренды, получившие отражение в Индустрии 4.0.

**Энергоэффективность.** На сегодняшний день ключевым трендом является получение, хранение и использование *электрической энергии* (рисунок 2). Характерными техническими устройствами для ее накопления и использования являются аккумуляторные батареи, электромобили, домашние хранилища и гигафабрики.

**Электромобили** могут выступать не только как потребители, но и как поставщики энергии в энергетические сети (Grid and Industrial Battery Storage) за определенную плату или льготы.

Возрастает роль *домашних хранилищ*. Например, стратегия Великобритании с позиций развития «зеленой экономики» предусматривает создание мест для зарядки электромобилей во всех новых домах.

В нижней части рисунка 2 показан прогноз развития *гигафабрик*. Гигафабрики, закрывающие



| Results Per Year                       |      |           |           |           |           |            |            |            |
|----------------------------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
|                                        | Year | 2022      | 2023      | 2024      | 2025      | 2026       | 2027       | 2028       |
| Announced Gigafactories New            |      | 1         | 12        | 16        | 17        | 33         | 68         | 49         |
| Announced Gigafactories Total          |      | 5         | 17        | 33        | 50        | 83         | 151        | 200        |
| Gigafactories to fund left till target |      | 195       | 183       | 167       | 150       | 117        | 49         | 0          |
| Partially Operational                  |      | 4         | 3         | 6         | 15        | 30         | 45         | 67         |
| Fully Operational                      |      | 1         | 2         | 3         | 4         | 4          | 5          | 17         |
| Cars manufactured per year             |      | 1,500,000 | 2,000,000 | 2,150,000 | 4,100,000 | 8,450,000  | 15,280,000 | 25,780,000 |
| Cars manufactured total                |      | 1,500,000 | 3,500,000 | 5,650,000 | 9,750,000 | 18,200,000 | 33,480,000 | 59,260,000 |

Рисунок 2 — Получение, хранение и использование электрической энергии  
Figure 2 — Obtaining, storage and use of electrical energy

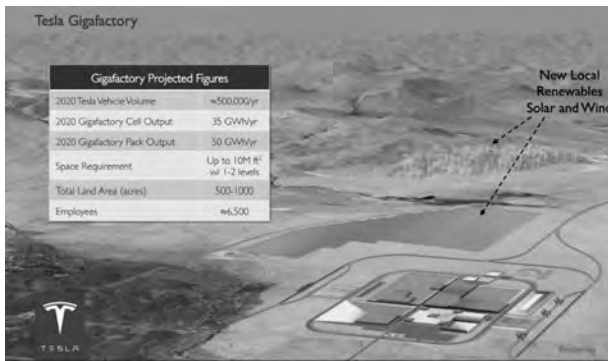


Рисунок 3 — Общий вид и параметры гигафабрики [2]  
Figure 3 — General view and parameters of gigafactory [2]

потребности человечества в электроэнергии, планируется ввести в действие до 2028 года и далее обходиться без новостроек.

На рисунке 3 показаны общий вид и параметры типовой гигафабрики. Она сочетает источники получения солнечной и ветровой энергии и хранилища электрической энергии.

**Индустрия 4.0.** Тенденции развития современных технических объектов и их производств во многом отражает идеология *Индустрии 4.0* (i4.0), в которой ключевым является создание сенсорной базы, цифровых двойников изделий, интеллектуализация, интернет вещей (IoT и др).

I4.0 — четвертая промышленная революция — получила свое название от инициативы, выдвинутой в 2011 году бизнесменами, политиками и учеными, которые определили ее как средство повышения конкурентоспособности обрабатывающей промышленности Германии через усиленную интеграцию киберфизических систем в производственные процессы [3].

I4.0 основана на девяти фундаментальных технологических достижениях (рисунок 4). Центральным понятием i4.0 является «киберфизическая система» (cyber-physical system, CPS). Она характе-



Рисунок 4 — Технологические достижения, лежащие в основе  
Индустрии 4.0  
Figure 4 — Technological advances underpinning Industry 4.0



Рисунок 5 — Киберфизическая система и интернет вещей  
Figure 5 — Cyber-physical system and Internet of Things

ризуется физическим объектом, например, в виде машины или механизма, и его цифровым двойником — компьютерной реализацией математической модели (комплекса моделей), имитирующим поведение физического объекта (рисунок 5) [4].

Принципиально новыми и наиболее важными в i4.0 являются понятия модельного подхода и цифрового двойника изделия, в значительной степени развитые в механике, а также сенсорные базы, средства беспроводной передачи данных, диагностические и аналитические средства.

*Модельный подход* подразумевает проектирование на основе комплекса моделей, который сопровождает изделие в процессе всего жизненного цикла и включает понятие цифрового двойника.

*Цифровой двойник изделия* — компьютерный образ, соответствующий реальному изделию. Он создается во время проектирования изделия, затем детализируется в процессе производства и становится его точной (в идеальном случае) цифровой копией. При этом цифровой двойник проходит через все этапы жизненного цикла физического изделия синхронно со своим реальным прототипом.

**Цифровой двойник — критическая веха на пути к интеллектуальной индустрии.** Можно выделить три подхода к созданию цифровых двойников [5].

Первый подход рассматривает общие принципы вне зависимости от конкретной области применения. Основной инструмент — это использование больших данных и аналитики. Такая методология применяется в основном для совершенствования объектов, которые обладают сравнительно небольшим сроком службы. При этом модели рабочих процессов объектов подробно не рассматриваются. Так, в [6] эксплуатационные данные используются для совершенствования процесса производства и сервиса, а в статье [7] рассматривается возможность применения данных, полученных при эксплуатации, при проектировании изделий. Ожидается, что разрабатываемый подход наиболее эффективен для модернизации существующих изделий.

*Второй подход* основан на использовании универсальных методов и программного обеспечения, реализующих определенные физические (механические и т. д.) модели, в том числе модели рабочего

процесса объекта. Для имитаций механического поведения (движения, деформирования, разрушения) объектов широко применяются методы конечных элементов и динамики многомассовых систем (см., например, подход Siemens AG [8]).

*Третий подход* включает специальные модели и методы расчета, относящиеся к специфическим объектам. Характерными примерами могут служить зубчатые передачи и трансмиссии.

Как отмечается в предисловии к сборнику трудов Международной конференции по зубчатым передачам 2019 года, «цифровые двойники не только предлагают потенциал в производстве, но также позволяют глубже понять свойства зубчатых передач и трансмиссий при разработке в различных масштабах и формируют основу для оптимизации зубчатых передач в дальнейшем» [9]. Некоторые статьи из упомянутого сборника отражают различные современные представления о цифровых двойниках в области передач и трансмиссий; их анализ приводится в [5].

В данном контексте наибольший интерес представляет статья [10]. В ней отмечается, что для проектирования и анализа редуктора и его компонентов в настоящее время доступно большое количество различных программных продуктов CAE, каждый из которых имеет свои сильные стороны. Важной вехой для Индустрии 4.0 является установление отраслевых стандартов. Так, FVA e.V., the German Research Association for Drive Technology (Немецкая исследовательская ассоциация по приводным технологиям) в тесном сотрудничестве с промышленностью и наукой разрабатывает общеотраслевой стандарт для простого обмена данными при разработке передачи под названием REXS (Reusable Engineering Exchange Standard). В сущности, инициатива REXS направлена на создание цифрового двойника в разработке и расчете передачи. REXS определяет единообразное параметрическое моделирование и номенклатуру редуктора и его компонентов по стандартам и отраслям, основываясь на подробной терминологии 25 комитетов FVA по проектам и 50-летних совместных промышленных исследований. Цель состоит в уменьшении числа интерфейсов, участвующих в процессе проектирования (рисунк 6).

В [10] отмечается, что REXS потенциально может зарекомендовать себя в качестве стандартной модели для обмена данными в области проектирования и анализа редукторов. Это дало бы ряд преимуществ для производителей программного обеспечения и компаний, применяющих эти инструменты, а также пользователей, включая: проектирование и анализ трансмиссии на любом уровне детализации (т. е. переход от общего представления системы через анализ отдельных компонентов до отдельных физических явлений всегда могут быть выполнены на основе единой модели данных); возможность простого обмена

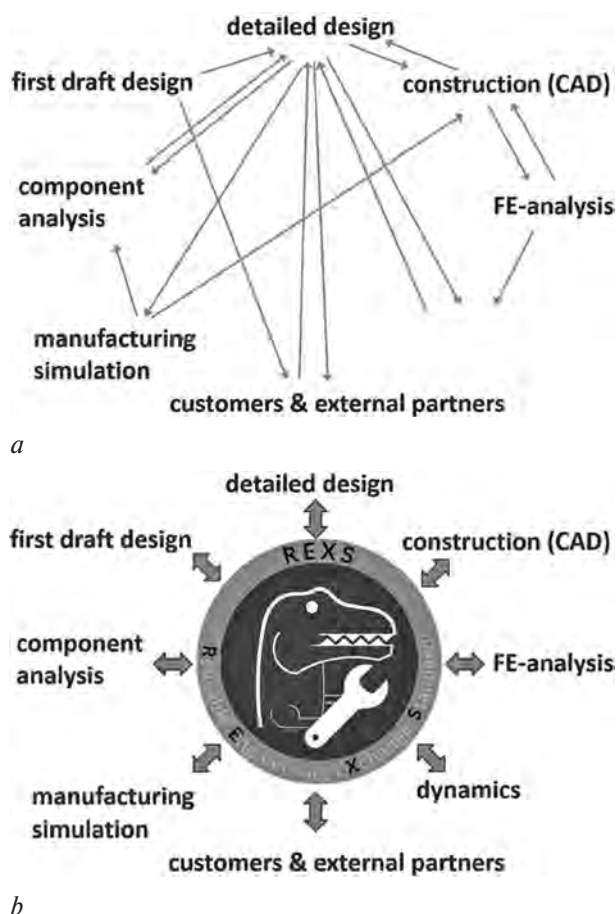


Рисунок 6 — Процессы проектирования: а — существующий с разнородными интерфейсами; б — с предлагаемым стандартизованным интерфейсом REXS [10]

Figure 6 — Design processes: a — existing with heterogeneous interfaces; b — with proposed standardized REXS interface [10]

данными между классическими аналитическими программами проектирования механизмов с универсальными динамическими системами, конечно-элементными системами и CAD; снижение затрат на дополнительное специальное моделирование и т. д.

Обобщая сказанное, можно констатировать, что процесс создания цифрового двойника трансмиссии 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, включая анализ и синтез схем, специальные виды кинематических и динамических расчетов, оценка надежности трансмиссии как системы, диагностика и др.

**Отечественные разработки и понимание цифрового двойника.** Отечественные разработки на уровне методологии предвосхитили положения концепции i4.0 в части модельного подхода и цифровых двойников изделия.

В статье Гринберга А.С. и Альгина В.Б. [11] развивается идея академика Ершова А. [12] и описывается технология создания и использования наукоемкой продукции на основе информационной модели

машины: «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*».

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)» [11].

В современной трактовке цифровой двойник (ЦД) в общем случае включает модели, данные и методы работы с ними (рисунок 7). Цифровой двойник машины представляет собой комплекс цифровых двойников отдельных подсистем — двигателя, трансмиссии, несущей системы и т. д. В свою очередь, каждая подсистема описывается совокупностью моделей. Типовые модели охватывают статику, кинематику, динамику, надежность,

диагностическую модель, CAD-модель и т. д. Таким образом, разработка ЦД предполагает наличие группы специалистов, способных согласованно использовать эти модели, методы и соответствующие данные.

**Особенности создания информационной модели (цифрового двойника) нестандартных технически сложных изделий (ТСИ).** ТСИ отличаются сложной иерархической структурой, варьируемыми условиями эксплуатации, что делает нетривиальным процесс их проектирования, оценку надежности и диагностику технического состояния. Последние аспекты отражены в разработанных Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси государственных стандартах по менеджменту и мониторингу надежности технически сложных изделий [14, 15].

Принципиальным является положение о том, что сложные объекты не могут быть представлены единой моделью и универсальным математическим описанием. Например, для синтеза трансмиссии используется аппарат теории графов и матричное исчисление, при проведении динамического анализа решаются системы алгебраических и дифференциальных уравнений, в расчетах деталей машин на прочность применяется метод конечных элементов, для оценки надежности используется метод статистических испытаний Монте-Карло, в задачах диагностики необходимо проведение спектрального анализа и т. д.

Применительно к трансмиссиям как типовым ТСИ, разработаны новые принципы построения моделей и методов расчета основных компонентов и приводов в целом, мониторинга и прогнозирования их функциональных и ресурсных свойств. Эти принципы охватывают:

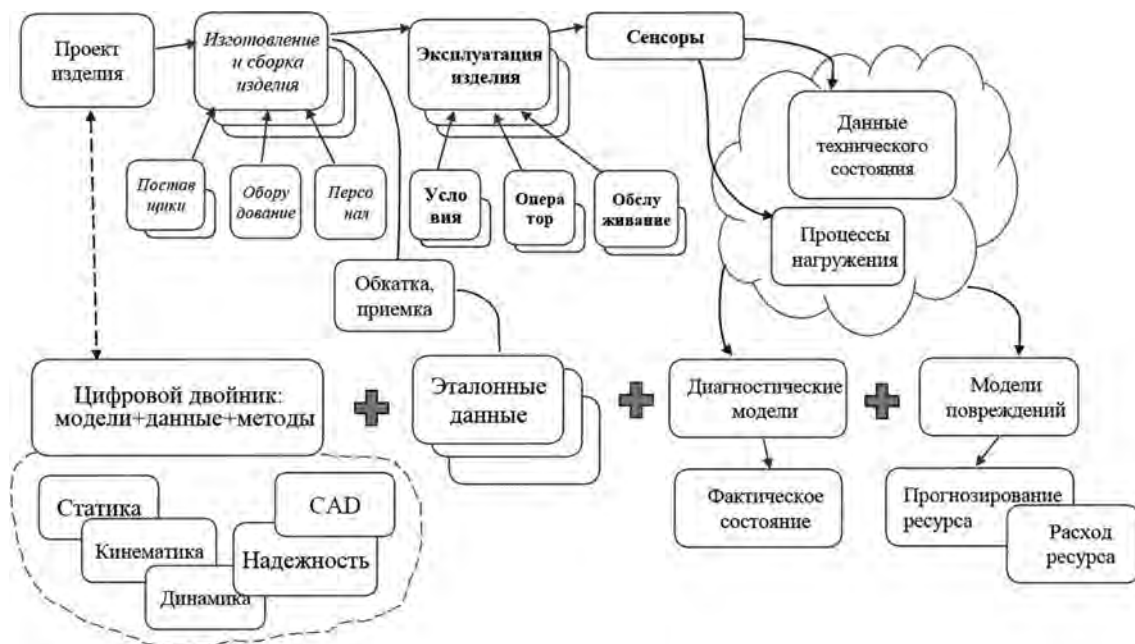


Рисунок 7 — Эволюция изделия и его информационной модели (цифрового двойника) в процессе жизненного цикла [13]  
Figure 7 — Evolution of the product and its digital twin during the life cycle [13]

- взаимодействие моделей механики материалов и теории надежности;
- принцип зависимого поведения компонентов, отражающий общность условий их нагружения в системе;
- локализацию нагруженности в моделях повреждения их простейших составляющих;
- рассмотрение приводов, как многокомпонентной системы с переменными состояниями и изменяемыми силовыми потоками в зависимости от режима их работы;
- организация совместного использования методов синтеза, анализа и многокритериальных оценок привода;
- построение диагностических моделей с использованием оценки состояния по интегральному критерию и прогнозирующего расчета на основе мониторинга накопления повреждений привода;
- выявление трендов в развитии приводов, областей их рационального использования с учетом областей применения машин, функциональных и ресурсных требований.

Принципиальным вопросом для построения цифрового двойника технического объекта является разработка системы его *взаимосвязанных представлений*. Как сформулировано В.А. Лефевром [16]: «При решении целого ряда задач оказывается недостаточным использовать только одно системное представление и, следовательно, использовать лишь одно членение целого на элементы. Задачу оказывается возможным решить только при использовании разных системных представлений, связанных друг с другом. Причем элементы, на которые расчленяется целое, принципиально разные в различных системных представлениях. Объект как бы проецируется на несколько экранов. Каждый экран задает свое собственное членение на элементы, порождая тем самым определенную структуру объекта. Экраны связаны друг с другом так, что исследователь имеет возможность соотносить различные картины, минуя сам объект. Подобное «устройство», синтезирующее различные системные представления, мы будем называть *конфигуратором*...».

Для трансмиссий разработаны и используются следующие основные представления: регулярная механическая система, структурная схема, кинематическая схема, динамическая схема, нормализованная динамическая схема, схема отказов и схема предельных состояний.

Для универсального *символического представления*, формализации и автоматизации составления уравнений в области кинематики и динамики используется универсальное отображение дифференциалов и передач, которое наряду с отображением валов, элементов управления и стоек (неподвижных корпусных звеньев) позволяет корректно схематизировать трансмиссии и передачи любого вида с типовыми и нестандартными элементами на основе концепции регулярной механической системы.

Для *математического описания* символических объектов используются разработанная *каноническая матрица* инцидентов и *структурно-распределительная матрица*.

*Комплекс базовых моделей*, составляющих основу информационной модели трансмиссии как ТСИ, помимо геометрических (3D) моделей, включает:

- структурные, схемные и другие символические представления трансмиссии, ее узлов и подсистем;
- модели кинематики и квазистатики;
- динамические модели установившихся и переходных процессов;
- модели рабочего процесса машины в целом, узлов и систем;
- модели условий эксплуатации;
- модели поведения водителя;
- модели нагружения компонентов;
- надежность модели (повреждений, предельных состояний и отказов);
- диагностические модели;
- модели реконструкции процессов по показаниям датчиков в эксплуатации.

Подробно вопросы теории и примеры применения комплекса моделей и методов расчета трансмиссий рассмотрены в [5, 17, 18].

**Аддитивные технологии / 3D-печать.** На рисунке 8 показана схема двухуровневого проектирования композитных деталей машин [19], включая элементы приводов, для их изготовления методами аддитивных технологий [20]. Цифровой двойник изделия выступает здесь в виде CAD-модели, пригодной для 3D-печати. Важно, что состав композиционного материала оптимизируется расчетными методами микромеханики по деформационно-прочностным и триботехническим характеристикам, исходя из требований, предъявляемых к изделию. Справа показан 3D-принтер Engineer V2-K (Россия), в нижней части рисунка — образцы элементов зубчатых передач из полимерных материалов.

**Отражение мировых трендов на Всемирном конгрессе IFToMM-2019.** IFToMM является наиболее влиятельной мировой общественной организацией в области технических наук. Она была основана как Международная федерация по теории механизмов и машин в Закопане (Польша) 27 сентября 1969 г. во время второго Всемирного конгресса по Теории механизмов и машин. Первым президентом Федерации был избран Иван Артоболевский (рисунок 9).

В 1999 году Исполнительный совет IFToMM принял решение признать изменение роли организации в международном сотрудничестве и утвердил новое название: *International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science* (Международная федерация по содействию развитию науки о механизмах и машинах). С учетом того, что аббревиатура IFToMM широко используется, она (вместе с логотипом организации)

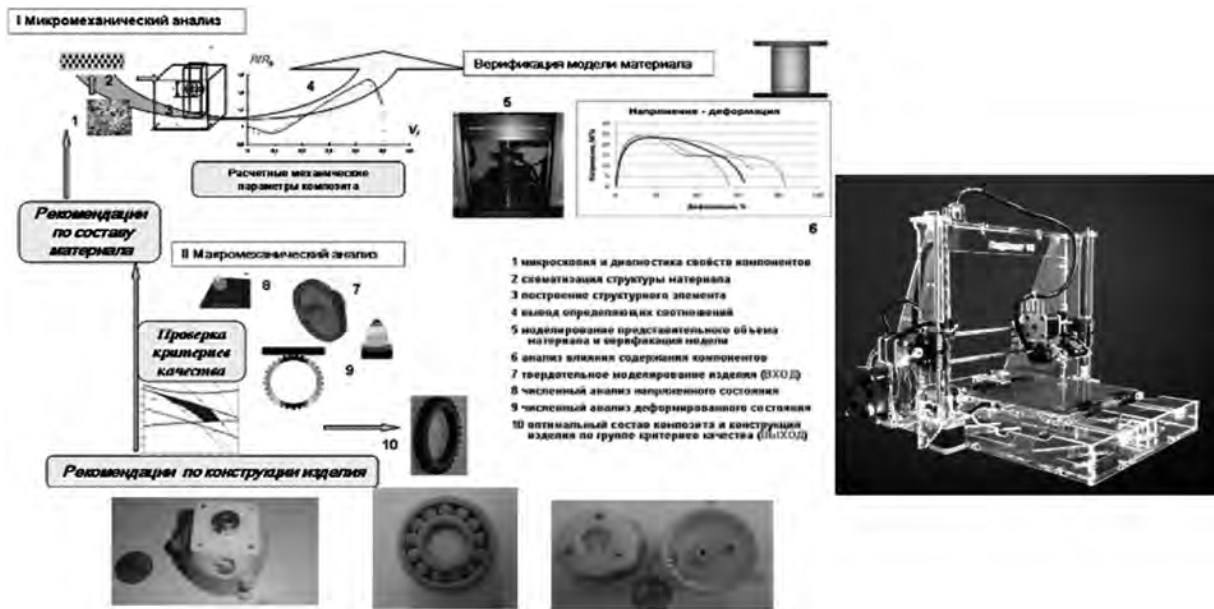


Рисунок 8 — Применение методов аддитивных технологий для изготовления деталей машин из композиционных материалов  
Figure 8 — Application of additive technologies for manufacturing machine parts from composite materials



Fig. 5 First IFToMM President Artobolevskii speaking at the foundation of IFToMM, Fig. 4. (Courtesy of IFToMM Archive): 1 Prof. Ivan Ivanovic Artobolevskii (USSR); 2 Prof. Adam Morecki (Poland); 3 Prof. Kurt Luck (Germany); 4 Prof. Michale S. Konstantinov (Bulgaria); 5 Prof. Nicolae I. Manolescu (Romania); 6 Prof. Erskine F. Crossley (USA); 7 Prof. Giovanni Bianchi (Italy); 8 Prof. Aron E. Kobrinskii (USSR); 9 Prof. Werner Thomas (Germany); 10 Prof. Jan Oderfeld (Poland)

Рисунок 9 — «Отцы»-основатели IFToMM [20]  
Figure 9 — IFToMM founding fathers [20]



Рисунок 10 — Страны-члены IFToMM на карте мира  
Figure 10 — IFToMM member countries on the world map

была сохранена [21]. Страны-члены IFToMM на карте мира показаны на рисунке 10.

На XV Всемирном конгрессе IFToMM-2019 (г. Краков, Польша, 30 июня — 4 июля, 2019) собралось более 600 участников из 60 стран, в том числе из 42 стран-членов IFToMM. На 20 тематических секциях было представлено 403 устных и 54 стендовых доклада (таблица).

Таблица — Распределение докладов по секциям конгресса  
Table — Distribution of reports by Congress sections

| Секции конгресса                                                                     | Число докладов |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <i>Robotics</i> (Робототехника)                                                      | 91             |
| <i>Computational Kinematics</i> (Компьютерная кинематика)                            | 48             |
| <i>Multibody Dynamics</i> (Динамика многомассовых систем)                            | 33             |
| <i>Tribology</i> (Трибология)                                                        | 30             |
| <i>Linkage and Mechanical Control</i> (Рычажные механизмы и механическое управление) | 27             |
| <i>Vibration</i> (Колебания)                                                         | 24             |
| <i>Gearing and Transmissions</i> (Зубчатые передачи и трансмиссии)                   | 17             |
| <i>Transportation Machinery</i> (Транспорт)                                          | 17             |
| <i>Biomechanical Engineering</i> (Техническая биомеханика)                           | 16             |
| <i>Rotor Dynamics</i> (Роторная динамика)                                            | 15             |
| <i>Mechatronics</i> (Мехатроника)                                                    | 12             |
| <i>Design Methodology</i> (Методология конструирования)                              | 12             |
| <i>History</i> (История)                                                             | 11             |
| <i>Education</i> (Образование)                                                       | 11             |
| <i>Sustainable energy system</i> (Системы возобновляемой энергии)                    | 6              |
| <i>Micromechanisms</i> (Микромеханизмы)                                              | 3              |
| <i>Engines and Powertrains</i> (Двигатели и приводы)                                 | 3              |
| <i>Reliability</i> (Надежность)                                                      | 3              |

Труды Конгресса опубликованы Springer в виде монографии объемом более 4200 страниц. На сайте Springer [22] имеется свободный доступ к начальным страницам и библиографиям 421 доклада.

**Примеры трудов конгресса. Часть I. Техническая биомеханика.** В [23] представлен дизайн нового биоинспирированного робота, напоминающего хобот слона и предназначенного для проверки трубопроводов. С помощью ножных и исполнительных механизмов осуществляется гусеничное движение робота для создания адаптивных точек контакта со стенками трубопровода (рисунок 11).

**Часть II. Компьютерная кинематика.** В [24] описаны различные представления планарных механизмов (рисунок 12), разработана методология синтеза структурно-кинематического механизма, в том числе механизмов с пассивными ограничени-



Рисунок 11 — Модель нового биоинспирированного робота типа «слоновый хобот»

Figure 11 — Model of the new “Elephant trunk” type bio-inspired robot

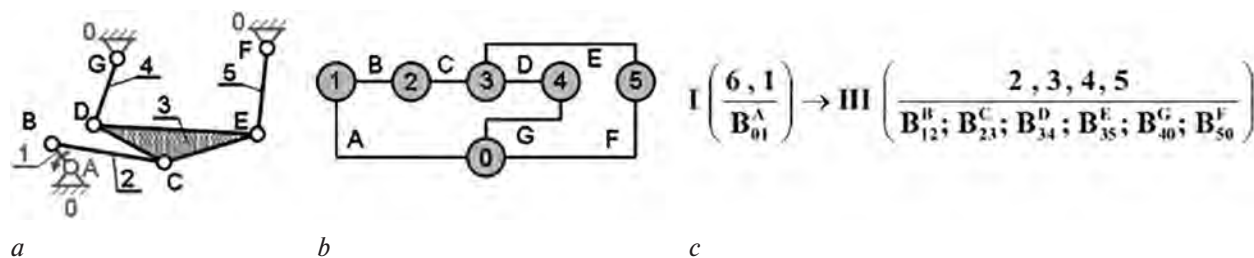


Рисунок 12 — Различные способы представления одного и того же планарного механизма:

*a* — структурная схема; *b* — график механизма; *c* — структурная формула

Figure 12 — Different ways of representing the same planar mechanism: *a* — block diagram; *b* — graph of the mechanism; *c* — structural formula

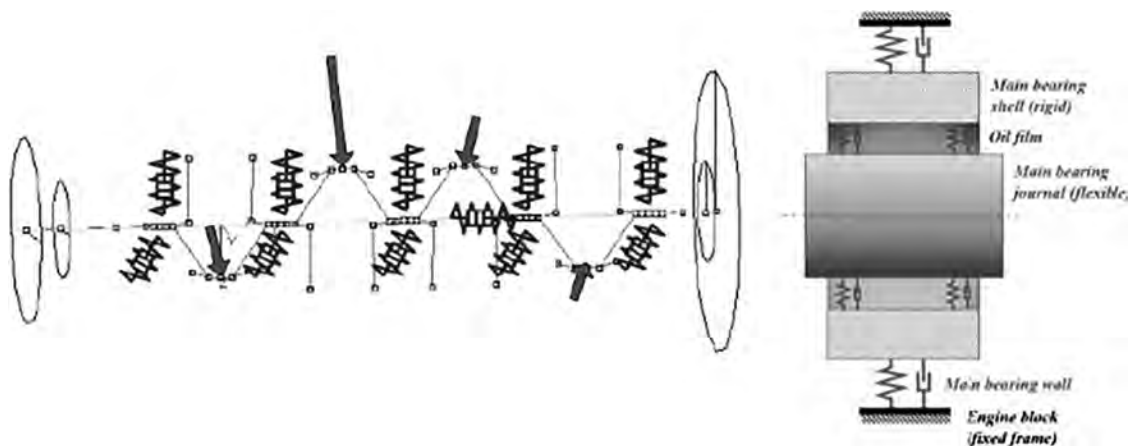


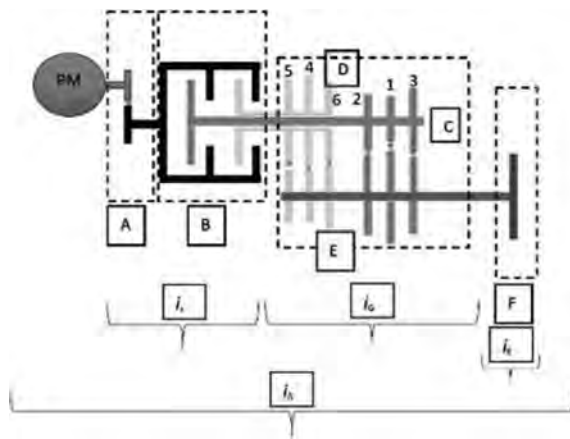
Рисунок 13 — Моделирование коленчатых валов и главных подшипников

Figure 13 — Simulation of crankshafts and main bearings

ями. Создан набор структурных единиц для синтеза. Предложены *графические основы языка проектирования* для описания структурно-кинематической схемы планарного механизма. Они призваны помочь дизайнерам определить цели анализа и синтеза механизмов с использованием компьютерных методов.

**Часть IV. Двигатели и приводы.** В статье [25] представителя известной компании-разработчика систем «двигатель — трансмиссия» AVL List GmbH содержится обзор типичных задач анализа конструкции, относящихся к динамике двигателя/трансмиссии на этапе разработки концепции проекта (рисунок 13), а также показана их последовательность и взаимосвязь в рамках единого рабочего процесса моделирования. Объединение концептуальной фазы и высокопроизводительного моделирования в одном вычислительном проекте (двухуровневая стратегия) обеспечивает раннюю оптимальную компоновку частей или подсистем двигателя/трансмиссии и приводит к сокращению общего времени разработки проекта при обеспечении того же или лучшего качества результатов.

**Часть V. Зубчатые передачи и трансмиссии.** Новая стратегия переключения передач для известных автомобильных трансмиссий DCT (Dual Clutch Transmission) представлена в [26] (рисунок 14). Уменьшается число действий для достижения высокой скорости автомобиля и устраняется частое переключение передач, что снижает утомляемость водителя.



a

Design Solution 2

| Sl. No. | Shaft 1  | Shaft 2  |
|---------|----------|----------|
| 1       | A(1-2-3) | a(4-5-6) |
| 2       | C(2-1-3) | a(4-5-6) |
| 3       | E(3-2-1) | a(4-5-6) |
| 4       | F(3-1-2) | a(4-5-6) |

b

Рисунок 14 — Предлагаемые конфигурация DCT (a) и стратегия переключения передач (b)  
Figure 14 — Suggested DCT configuration (a) and transmission shift strategy (b)

**Часть VI. История науки о механизмах и машинах.** В [27] отмечается, что наука о механизмах и машинах может восстановить свое значение путем расширения классификации механизмов и включения в нее таких категорий, как Motion transformers, Repetitive mechanisms, Deployable structures, Motion structures, Controllable motion generators, Controllable path generators, etc (преобразователи движения, повторяющиеся механизмы, разворачиваемые структуры, структуры движения, генераторы управляемого движения, генераторы контролируемых путей и т. д.). Предложено проводить различие между топологическими и кинематическими инверсиями и использовать термин «isomer» для идентичных механизмов, имеющих призматические соединения в виде «slider-guide» или «guide-slider».

Примеры механизмов, соответствующих предлагаемым критериям, показаны на рисунке 15.

**Часть VII. Рычажные механизмы и механическое управление.** В [28] представлен метод локализации утечки нефти из нефтепровода с использованием робота (рисунок 16), имеющего единый гибкий хвостовой плавник в качестве гребного винта и датчик изображения CMOS OV7725 для отслеживания следа. Для управления работой камеры используется 32-битный SCM MK60DN512.

В [29] предлагается концептуальный подход к проектированию механизмов с многократны-

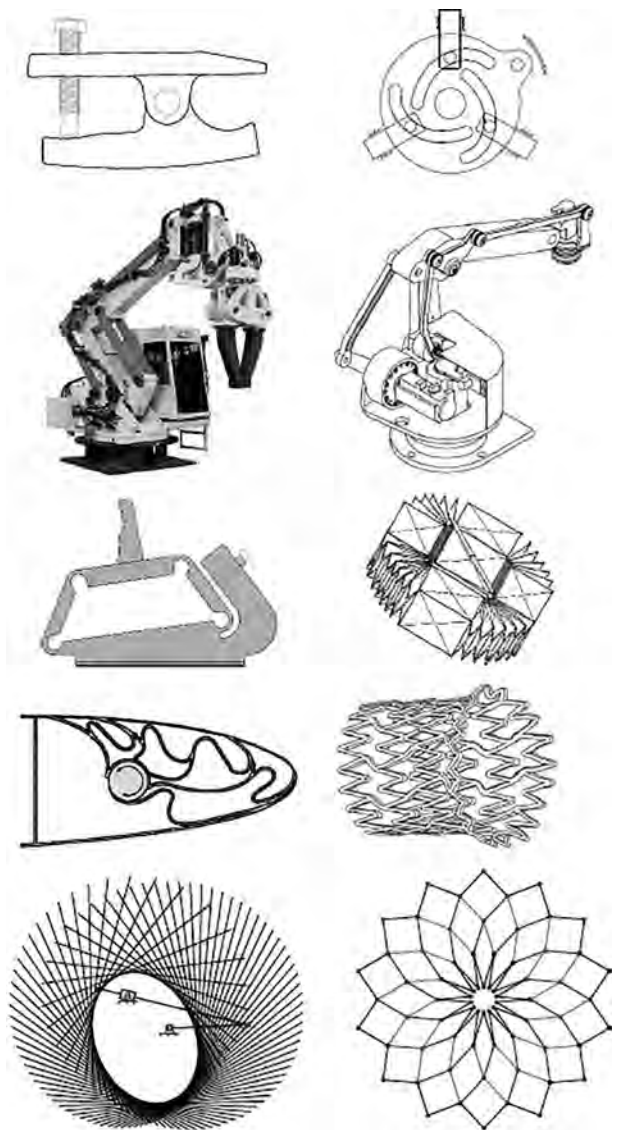


Рисунок 15 — Различные механизмы, соответствующие одному или нескольким критериям  
Figure 15 — Different mechanisms that meet one or more criteria

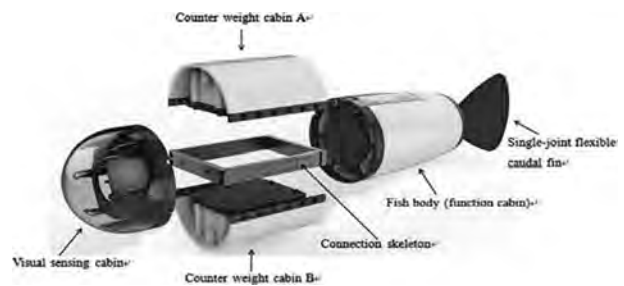


Рисунок 16 — Структура робота-рыбы  
Figure 16 — Robot fish structure

ми шарнирами на основе полного банка данных в форме оригинальной «универсальной структурной таблицы F1» со всеми возможными видами связей и всеми возможными соединениями. На рисунке 17 показано структурное представление звеньев ( $i$ ), соединений ( $j$ ) и замкнутых петель ( $K$ ) в кинематических цепях. В качестве примера на рисунке 18 приведен запатентованный механизм,

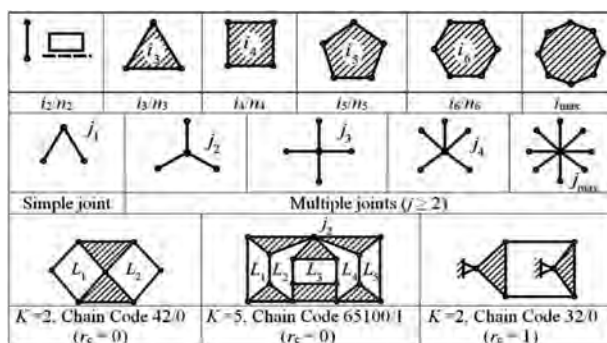


Рисунок 17 — Характерные элементы кинематических цепей  
Figure 17 — The characteristic elements of the kinematic chains

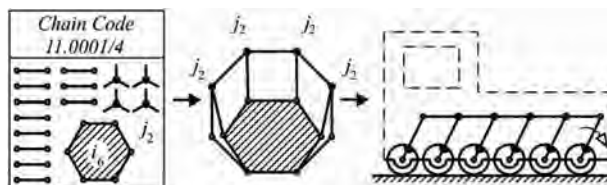


Рисунок 18 — Разработанный и запатентованный механизм [30]  
Figure 18 — Developed and patented mechanism [30]

синтезированный с помощью разработанного программного обеспечения.

**Часть IX. Надежность машин и механизмов.** Для обеспечения надежности системы автомобильно-дорожных барьеров необходимо создать надежную систему имитационного анализа параметров автомобиля и проектирования барьеров при столкновениях. В [31] решена задача адекватного моделирования конструкций при столкновении с использованием процедуры валидации, основанная на сравнении результатов расчетов с натурными экспериментами (рисунок 19).

**Часть X. Робототехника и мехатроника.** Проектируется и разрабатывается робот *All-environment Mobile (AEM)*, способный функционировать в трех средах: воде, земле и воздухе, имеющий простую конструкцию, хорошую адаптивность к окружающей среде и развитую динамическую модель квадрантора (рисунок 20) [32]. Продемонстрировано качество робота по твердой поверхности, движение в воздухе, на воде и под водой.

Представленная в [33] процедура проектирования робототехнических систем основана на агент-

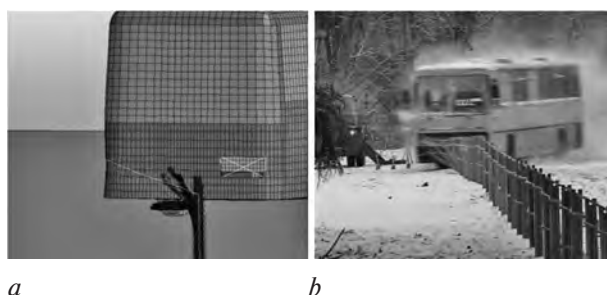


Рисунок 19 — Начальный момент столкновения автобуса с кабельным барьером: а — КЭ-модель; б — натурный краш-тест  
Figure 19 — The initial moment of collision of the bus with a cable barrier: а — FE model; б — full-scale crash test

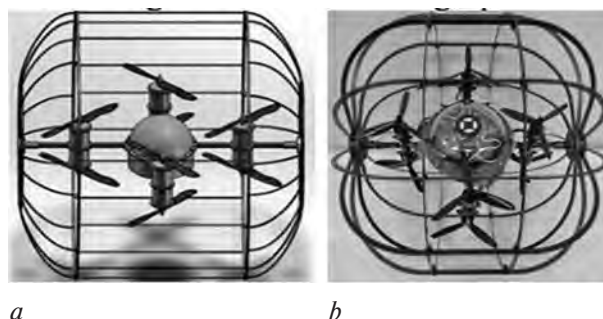


Рисунок 20 — Виртуальный (а) и физический (б) прототип АЕМ-робота

Figure 20 — Virtual (a) and physical (b) prototype of the AEM robot

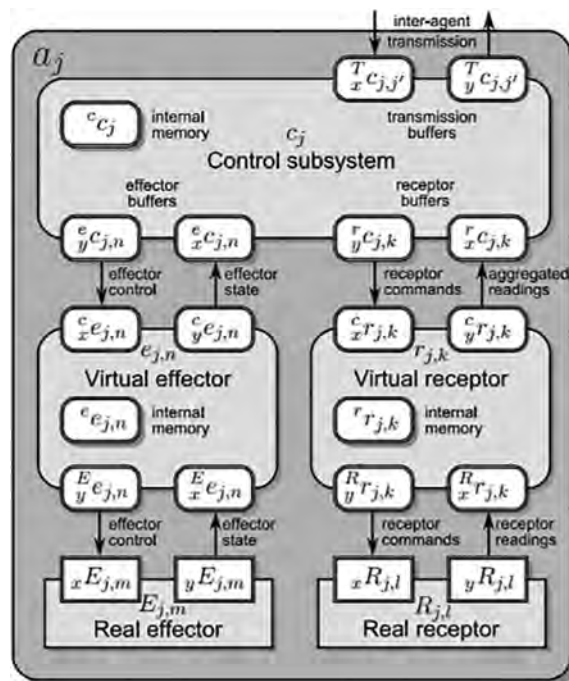


Рисунок 21 — Общая структура «встроенного» агента  $a_j$   
Figure 21 — General structure of the embodied agent  $a_j$

ной метамодели (рисунок 21). Она производит спецификацию разработанной системы, разделяя роботизированную систему на встроенные агенты.

Робот может состоять из одного или нескольких встроенных агентов, но один агент не может представлять более одного робота. Количество агентов, составляющих систему, является результатом проектного решения.

В статье [34] представлен кинематический анализ и моделирование движения механизма талии с тремя степенями свободы для робота-гуманоида (механизм запатентован). Он состоит из двух взаимосвязанных пространственных механизмов для движений вокруг тангажа и осей крена, в то время как третий является планарным механизмом для движений вокруг оси рыскания (рисунок 22).

**Часть XI. Динамика многомассовых систем.** В статье [35] сообщается о новом модуле для размерного синтеза механизмов в программном обеспечении MechAnalyzer (рисунок 23). Программное обеспечение MechAnalyzer можно загрузить

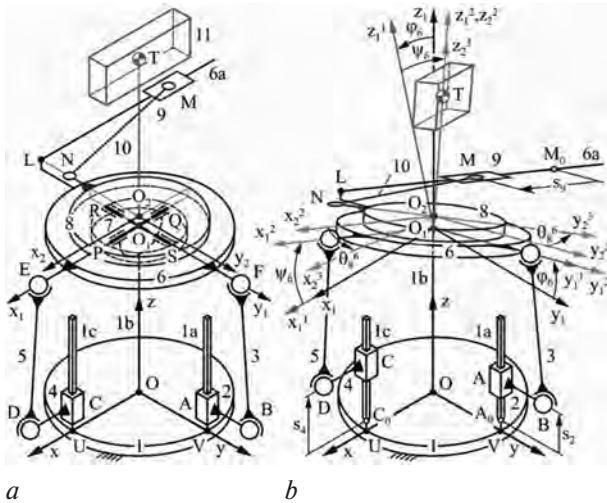


Рисунок 22 — Механизм талии с тремя степенями свободы:  
 а — исходное положение; б — рабочее положение  
 Figure 22 — Waist mechanism with three degrees of freedom:  
 а — starting position; б — working position

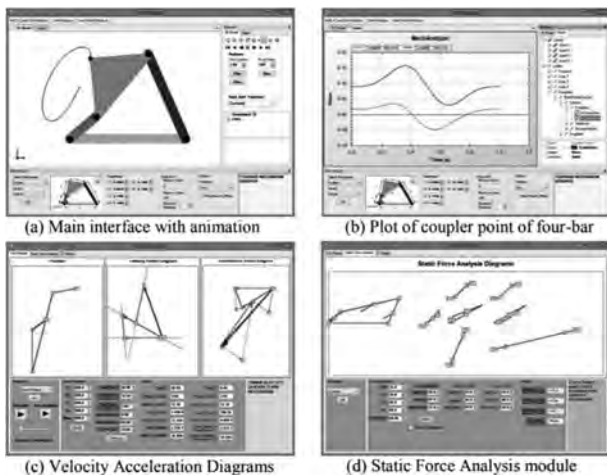


Рисунок 23 — Программные модули и интерфейсы MechAnalyzer для обучения различным концепциям  
 Figure 23 — Software modules and interfaces of MechAnalyzer for teaching of different concepts

с сайта <http://www.roboanalyzer.com/mechanalyzer.html> и использовать для обучения другим концепциям, связанным с механизмами.

#### Часть XIV. Системы возобновляемой энергии.

В [36] представлен инновационный робот Agri.q02, способный работать в неструктурированных средах с питанием от аккумуляторных и солнечных батарей. Он позволяет осуществлять приземление и подзарядку БПЛА (беспилотных летательных аппаратов) даже на неровной местности, например, крутых склонах. Agri.q02 оснащен роботизированной рукой для сбора проб земли или листьев с целью мониторинга урожая (рисунок 24).

**Часть XV. Транспортное машиностроение.** В статье [37] описаны две разработки известной компании General Motors в области *мехатронных стартеров*. Первая концепция использует двухскоростное пусковое устройство для запуска двигателя. Блок зубчатых колес и сцеплений обеспечивает более высокое передаточное число. Это позволяет валу

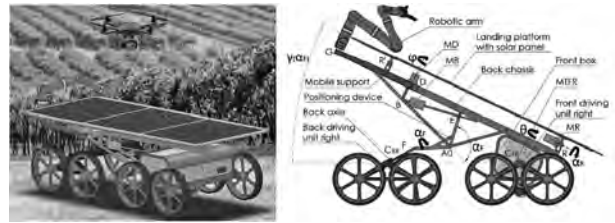


Рисунок 24 — Робот Agri.q02 и его общая компоновка  
 Figure 24 — Robot Agri.q02 and its overall layout

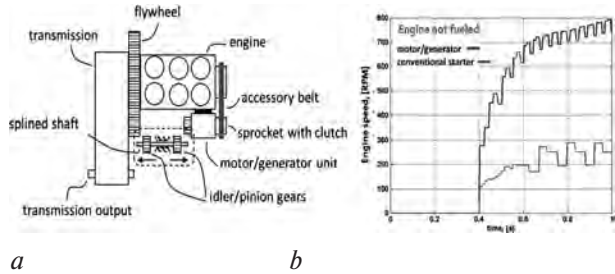


Рисунок 25 — Двигатель с мехатронным стартером (а) и сравнение частот вращения вала двигателя при пусках с предлагаемым и обычным стартером (б)  
 Figure 25 — Engine with mechatronic starter (а) and comparison of engine shaft speeds during starts with the proposed and conventional starter (б)

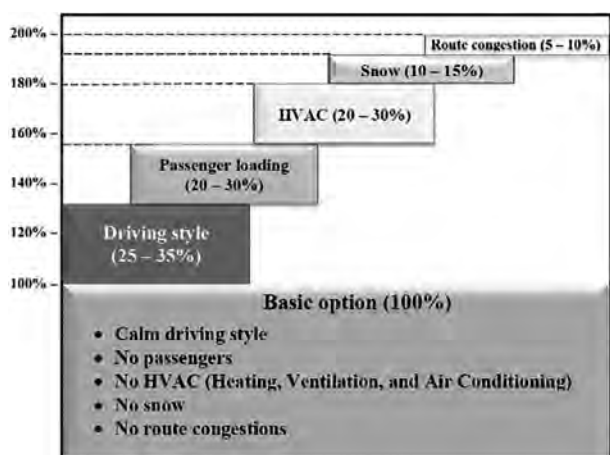
двигателя достигать почти вдвое более высоких номинальных частот вращения до момента зажигания, обеспечивая плавный пуск. Вторая концепция — мехатронный стартер, который может переключаться между зубчатой и ременной передачами. Он обеспечивает очень быстрый и плавный пуск в режиме ременной передачи по сравнению с обычным стартером. Он также способен выполнять такие гибридные функции, как повышение крутящего момента и рекуперативное торможение, для достижения экономии топлива на 5–10 % (рисунок 25).

Статья [38] посвящена *вероятностному выбору расчетных случаев* при оценке функциональных и ресурсных свойств мобильных машин, которые всегда имеют существенное рассеяние. Рисунок 26 иллюстрирует проблему на примере энергопотребления электробуса.

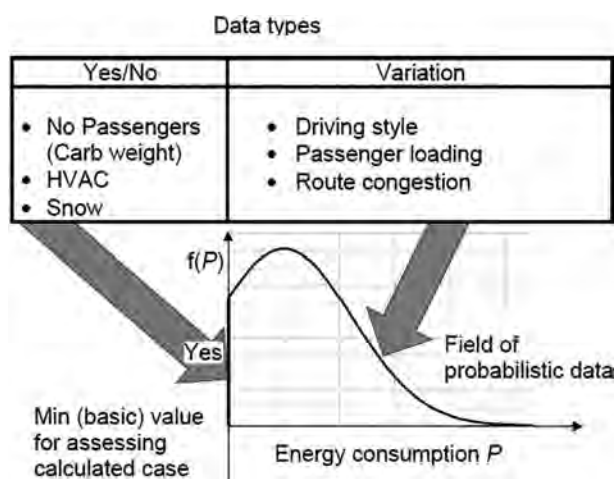
Вероятностный подход дополнен двумя сравнительными процедурами. Одна позволяет оценить энергопотребление электробуса при наличии данных о расходе топлива обычными автобусами на одном и том же маршруте. Вторая процедура представляет собой оценку ресурса одного и того же агрегата при его установке на разные автомобили путем сравнения данных по нагруженности. Подробно эти вопросы освещены в монографии [17].

**Часть XVI. Трибология.** В обзорной статье [39], описывающей и систематизирующей достижения в области трения и изнашивания (рисунок 27), показано, что отсутствие теоретических основ не сдерживает прогресс трибологии в ее практических аспектах.

Так, *инженерная трибология* достигла замечательных результатов в экономии энергии, ма-



a



b

Рисунок 26 — Структура энергопотребления электробуса (a) и формирование его вероятностной оценки (b)  
Figure 26 — Structure of electric bus energy consumption (a) and formation of its probabilistic estimation (b)

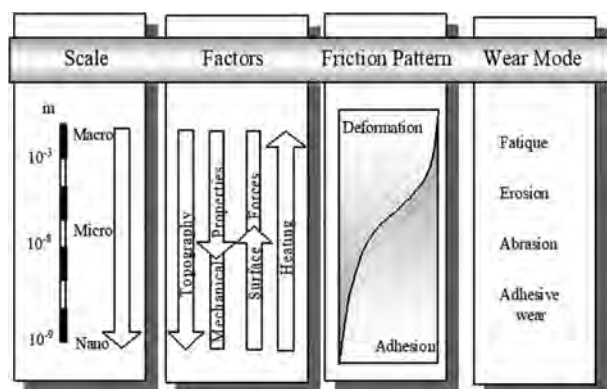


Рисунок 27 — Факторы, определяющие трение и износ  
Figure 27 — Factors determining friction and wear

териалов и рабочей силы, равной нескольким процентам ВВП в развитых странах. «Зеленая трибология» быстро развивается, затрагивая экологию, биоинженерию и медицину.

**События Конгресса.** На конгрессе были проведены выборы руководства IFToMM на ближайшее четырехлетие; на момент написания статьи сайт IFToMM (<http://iftomm.net/>) содер-



Рисунок 28 — «Смена караула»: (слева направо) президенты IFToMM Марко Чеккарелли (2016–2019) и Андрес Кешкемети (2020–2023)

Figure 28 — “Changing of guard”: (from left to right) IFToMM presidents Marco Ceccarelli (2016–2019) and Andres Kecskemethy (2020–2023)



Рисунок 29 — Традиционное фото участников конгресса  
Figure 29 — Traditional photo of the Congress participants

жал информацию о руководстве периода 2016–2019 годов. На рисунке 28 представлено фото двух президентов IFToMM разных периодов, М. Чеккарелли (слева) и А. Кешкемети (справа), на рисунке 29 — традиционное общее фото участников Конгресса.

Важным событием, отражающим вклад белорусских ученых в деятельность мирового научного сообщества механиков, стало присуждение статуса *стипендиата IFToMM* (IFToMM Fellowship Status) доктору технических наук, профессору В.Е. Старжинскому (заместителю председателя Белорусского комитета IFToMM, члену Технического Комитета IFToMM по зубчатым передачам, члену Постоянной комиссии IFToMM по терминологии) в знак признания его научных заслуг в области механики механизмов и машин, достигнутых при взаимодействии с IFToMM-сообществом и за активное участие в деятельности IFToMM.

**Заключение.** В 2019 году VIII Белорусский конгресс по теоретической и прикладной механике «Механика-2019» впервые состоялся под патронажем IFToMM, что свидетельствует о росте авторитета отечественной механики и квалификации конгресса как форума с высоким научным уров-

нем, что подтверждается участием в нем ряда авторитетных ученых из стран ближнего и дальнего зарубежья. В свою очередь, участие представителей ведущих научных организаций в области механики и машиностроения — Объединенного института машиностроения НАН Беларуси и Института механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси — в работе Всемирного конгресса IFToMM-2019 позволило продемонстрировать отечественные достижения, опубликовать статьи в авторитетном зарубежном издательстве Springer, получить непосредственный доступ к самым новым результатам в области механики. Это позволяет оценить и при необходимости скорректировать планы работ, в том числе по государственным программам научных исследований, наладить эффективное взаимодействие с промышленностью, использовать творческие контакты для развития сотрудничества с зарубежными специалистами.

### Список литературы

- Farrell, J. The Environment, The Economy, & Equity [Electronic resource] / J. Farrell. — Mode of access: [https://cleantechnica.com/2019/09/03/the-environment-the-economy-equity/?utm\\_source=CleanTechnica+News&utm\\_campaign=ce8dc983d4-Da%E2%80%A6](https://cleantechnica.com/2019/09/03/the-environment-the-economy-equity/?utm_source=CleanTechnica+News&utm_campaign=ce8dc983d4-Da%E2%80%A6). — Date of access: 17.10.2019.
- Tesla Gigafactory [Electronic resource]. — Mode of access: [https://www.tesla.com/sites/default/files/blog\\_attachments/gigafactory.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_attachments/gigafactory.pdf). Date of access: 21.10.2019.
- Хель, И. Индустрия 4.0: что такое четвертая промышленная революция? [Электронный ресурс] / И. Хель. — Режим доступа: <https://hi-news.ru/business-analitics/industriya-4-0-chto-takoe-chetvertaya-promyshlennaya-revoluciya.html> — Дата доступа: 17.10.2019.
- Bagheri, B. Big future for cyber-physical manufacturing systems [Electronic resource] / B. Bagheri. — Mode of access: <https://www.designworldonline.com/big-future-for-cyber-physical-manufacturing-systems/>. — Date of access: 17.10.2019.
- Development of digital twins for gears and transmissions based on lifetime mechanics and composite mechanics / V.B. Algin [et al.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2019. — Вып. 8. — С. 172–184.
- Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data / F. Tao [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — Vol. 94, Iss. 9–12. — Pp. 3563–3576.
- Digital twin-driven product design framework / F. Tao [et al.] // International Journal of Production Research. — Vol. 57, No. 20. — Pp. 3935–3953.
- Van der Auweraer, H. Connecting physics based and data driven models: The best of two worlds. [Electronic resource] / H. Van der Auweraer. — Mode of access: [https://www.ima.umh.edu/materials/2017-2018/SW3.6-8.18/26842/IMA\\_2018\\_Van\\_der\\_Auweraer.pdf](https://www.ima.umh.edu/materials/2017-2018/SW3.6-8.18/26842/IMA_2018_Van_der_Auweraer.pdf). — Date of access: 15.10.2019.
- Stahl, K. Foreword “Best of Gears 2019” / K. Stahl // Forschung im Ingenieurwesen. — Vol. 83, iss. 3. — Pp 325–326.
- Keuthen, M. REXS — Standardized Gear Unit Model / M. Keuthen // International Conference on Gears 2019. Garching, Munich, Germany, September 18–20, 2019. — Pp. 701–712.
- Гринберг А.С. Информационные модели и ресурсы машин / А.С. Гринберг, В.Б. Альгин // Механика машин на пороге III тысячелетия: материалы междунар. науч. конф., Минск, 23–24 нояб. 2000 г. / НИРУП «Белавтотракторостроение». — Минск, 2001. — С. 272–281.
- Ершов, А.П. Об информационной модели машины / А.П. Ершов // Микропроцессорные средства и системы. — 1985. — № 4. — С. 2.
- Альгин, В.Б. Надежность технически сложных изделий в свете «Индустрии 4.0» // В.Б. Альгин, Н.Н. Ишин // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко и др. — 2017. — Вып. 7. — С. 43–54.
- Надежность в технике. Менеджмент надежности технически сложных изделий: СТБ 2465-2016. — Введ. 01.06.2017. — Минск: Госстандарт, 2017. — 24 с.
- Надежность в технике. Расчет надежности технически сложных изделий: СТБ 2466-2016. — Введ. 01.06.2017. Минск: Госстандарт, 2017. — 20 с.
- Лефевр, В.А. Конфликтующие структуры / В.А. Лефевр. — М.: Советское радио, 1973. — 160 с.
- Альгин, В.Б. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин, С.Н. Поддубко. — Минск: Беларус. навука, 2019. — 549 с.
- Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / Под ред. В.Б. Альгина и В.Е. Старжинского. — Минск: Беларус. навука, 2017. — 406 с.
- Shil'ko S.V. Methods and Results of Composite Gears Design / Shil'ko S.V., Starzhinsky V.E., Petrokovets E.M. // Theory and Practice of Gearing and Transmissions. — 2016. — Vol. 34. — Pp. 341–368.
- Применение полимерных связующих при создании керамических изделий методами аддитивных технологий / Г.А. Демидов [и др.] // Полимерные материалы и технологии. — 2019. — Т. 5, № 3. — С. 59–63.
- Ceccarelli, M. Consideration on History of Mechanism and Machine Science with an IFToMM Role for Future Development / M. Ceccarelli // Theory and Practice of Gearing and Transmissions. — 2016. — Vol. 34. — Pp. 37–54.
- Advances in Mechanism and Machine Science. Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science [Electronic resource]. — Mode of access: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-20131-9>. — Date of access: 17.10.2019.
- Venkateswaran, S. A new inspection robot for pipelines with bends and junctions / S. Venkateswaran, D. Chablat // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. — Pp. 33–42.
- Babichev, D. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis / D. Babichev, A. Evgrafov, S. Lebedev // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. Pp. 559–568.
- T. Parikyan Design Analysis Tasks in Simulation of Engine and Powertrain Dynamics: An Overview // Advances in Mechanism and Machine Science, Springer, 2019. — Pp. 893–904.
- Chandra, M. A Novel Gear Shifting Strategy for Dual Clutch Transmission System Using Reverse Engineering and Robust Design Technique / M. Chandra, P.K. Dan // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. — Pp. 1049–1058.
- Simionescu, P.A. New and Revised Mechanism Classifications: Proposal and Motivation // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. — Pp. 3501–3510.
- Li H. Design and Experiment of the Underwater Robotic Fish for Petroleum Pipeline Inspection System / H. Li, R. Li, J. Zhu // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. — Pp. 1373–1384.
- Pozhbelko V. Type Synthesis Method of Planar and Spherical Mechanisms Using the Universal Structural Table with All Possible Link Assortments // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. — Pp. 1517–1526.
- Многokrратный шарнир передачи: пат. RU 2543135 / В.И. Пожбелко. — Оpubл. 27.02.2015.
- Demiyanshko, I. Applications Fem Analysis in Researches Reliability and Dynamics of Road Safety Barriers at Collisions with Cars / I. Demiyanshko, I. Karov, B. Tavshavazde // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. — Pp. 1651–1658.
- System Design and Experimental Analysis of an All-environment Mobile Robot / Z. Guo [et al.] // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. — Pp. 1969–1978.
- Zieliński, C. General Robotic System Software Design Methodology / C. Zieliński // Advances in Mechanism and Machine Science, Springer. — 2019. — Pp. 2779–2788.
- A Novel 3 DOFs Waist Mechanism for Humanoid Robots: Kinematic Analysis and Motion Simulation / M. Pencic [et al.] // Advances in Mechanism and Machine Science. — 2019. — Pp. 2809–2818.

35. Effective Teaching of Mechanism Synthesis using MechAnalyzer Software / D. Pandey // *Advances in Mechanism and Machine Science*. — 2019. — Pp. 3237–3244.
36. Design of the positioning mechanism of an unmanned ground vehicle for precision agriculture / G. Quaglia // *Advances in Mechanism and Machine Science*, Springer, 2019. — Pp. 3531–3540.
37. Raghavan, M. Novel Mechanisms to Improve the Start Quality of Automotive Engines / M. Raghavan // *Advances in Mechanism and Machine Science*, Springer. — 2019. — Pp. 3591–3600.
38. Algin, V. Calculated Modes for Assessing Operation Properties and Dependability of Vehicles / V. Algin // *Advances in Mechanism and Machine Science*. — 2019. — Pp. 3749–3758.
39. Myshkin, N.K. Problems in Friction Analysis / N.K. Myshkin, A.Ya. Grigoriev // *Advances in Mechanism and Machine Science*, Springer. — 2019. — Pp. 3779–3788.

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

Deputy Chief of the R&D Center “Mining Machinery”<sup>1</sup>

E-mail: vladimir.algin@gmail.com

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

Director General<sup>1</sup>

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

STARZHINSKY Viktor E., D. Sc. in Eng., Prof.

Chief Researcher<sup>2</sup>

E-mail: star\_mpri@mail.ru

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

Head of the Laboratory of Mechanics of Composites and Biopolymers<sup>2</sup>

E-mail: shilko\_mpri@mail.ru

<sup>1</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the NAS of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

Received 28 October 2019.

## TENDENCIES OF THE DEVELOPMENT OF MECHANICS OF MACHINES AND MECHANISMS – 2019: WORLD TRENDS AND OUTPUTS OF THE 15th IFToMM WORLD CONGRESS

*The paper is a journal version of the plenary report at the VIII Belarusian Congress on Theoretical and Applied Mechanics “Mechanics-2019”, which was held in Minsk, Belarus, on September 18–20, 2019. The world challenges are described: aging of the population, ecological and energy problems. Technological advances smooth out these problems to a certain extent. One of the main factors in solving global problems is digitalization and the Industry 4.0 initiative, closely related to it. In this initiative, the model approach and the digital twin that are largely developed in mechanics play a central role. The main approaches to the creation of digital twins are highlighted and characterized. On the example of gears and transmissions, the features of the approach to the formation of digital twins for non-standard technically complicated items are shown. Information is given on IFToMM — the most influential world public organization in the field of technical sciences, Proceedings of the IFToMM-2019 Congress, held in Krakow (Poland) from June 30 to July 4, 2019, and the events of the Congress. The materials of the article contain examples and generalizations on the most modern scientific areas, allowing to get acquainted with them, first of all, to domestic specialists, to correlate with them the directions and level of your own research.*

**Keywords:** world challenges and trends, mechanics of machines and mechanisms, energy efficiency, digitalization, digital twins, IFToMM Congress-2019

### References

1. Farrell J. *The Environment, The Economy, & Equity*. Available at: [https://cleantechnica.com/2019/09/03/the-environment-the-economy-equity/?utm\\_source=CleanTechnica+News&utm\\_campaign=ce8dc983d4-Da%E2%80%A6](https://cleantechnica.com/2019/09/03/the-environment-the-economy-equity/?utm_source=CleanTechnica+News&utm_campaign=ce8dc983d4-Da%E2%80%A6) (accessed 17 October 2019).
2. *Tesla Gigafactory*. Available at: [https://www.tesla.com/sites/default/files/blog\\_attachments/gigafactory.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_attachments/gigafactory.pdf) (accessed 21 October 2019).
3. Khel I. *Industriya 4.0: chto takoe chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya?* [Industry 4.0: What is the Fourth Industrial Revolution?]. 2015. Available at: <https://hi-news.ru/business-analitics/industriya-4-0-cto-takoe-chetvertaya-promyshlennaya-revolyciya.html> (accessed 17 October 2019).
4. Bagheri B., Lee J. *Big future for cyber-physical manufacturing systems*. 2015. Available at: <https://www.designworldonline.com/big-future-for-cyber-physical-manufacturing-systems/> (accessed 17 October 2019).
5. Algin V.B., Ishin N.N., Starzhinsky V.E., Shil’ko S.V., Rackov M., Čavić M. Development of digital twins for gears and transmissions based on lifetime mechanics and composite

- mechanics. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical issues of mechanical engineering], 2019, iss. 8, pp. 172–184.
6. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital Twin-driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 94, iss. 9–12, pp. 3563–3576.
7. Tao F., Sui F., Liu A., Qi Q., Zhang M., Song B., Guo Z., Lu S.C.-Y., Nee A.Y.C. Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 2019, vol. 57, no. 12, pp. 3935–3953.
8. Van der Auweraer H. *Connecting physics based and data driven models: The best of two worlds*. 2018. Available at: [https://www.ima.umn.edu/materials/2017-2018/SW3.6-8.18/26842/IMA\\_2018\\_Van\\_der\\_Auweraer.pdf](https://www.ima.umn.edu/materials/2017-2018/SW3.6-8.18/26842/IMA_2018_Van_der_Auweraer.pdf) (accessed 15 October 2019).
9. Stahl K. Foreword “Best of Gears 2019”. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2019, vol. 83, iss. 3, pp. 325–326.
10. Keuthen M. REXS — Standardized Gear Unit Model. *Proc. International Conference on Gears 2019*. Garching/Munich, 2019, pp. 701–712.
11. Grinberg A.S., Algin V.B. Informatsionnye modeli i resursy mashin [Information models and resources of machines]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Mekhanika mashin na poroge III tysyacheletiya”* [Proc. International Scientific Conference “Mechanics of Machines on the Threshold of the Third Millennium”]. Minsk, 2001, pp. 272–281.
12. Ershov A. Ob informatsionnoy modeli mashiny [On the information model of the machine]. *Mikroprotsessornyye sredstva i sistemy* [Microprocessor means and systems], 1985, no. 4, p. 2.
13. Algin V.B., Ishin N.N. Nadezhnost tekhnicheskikh slozhnykh izdeliy v svete “Industrii 4.0” [Reliability of technically complicated items in terms of “Industry 4.0”]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya* [Topical issues of mechanical engineering], 2017, iss. 6, pp. 43–54.
14. Standard of Belarus 2465-2016. *Nadezhnost v tekhnike. Menedzhment nadezhnosti tekhnicheskikh slozhnykh izdeliy* [Reliability in Technics. Reliability Management of Technically Complicated Items]. Minsk, Gosstandart Publ., Gosudarstvennyy komitet po standartizatsii Respubliki Belarus Publ., 2017. 24 p.
15. Standard of Belarus 2466-2016. *Nadezhnost v tekhnike. Raschet nadezhnosti tekhnicheskikh slozhnykh izdeliy* [Reliability in Technics. Reliability Calculation of Technically Complicated Items]. Minsk, Gosstandart Publ., Gosudarstvennyy komitet po standartizatsii Respubliki Belarus Publ., 2017. 20 p.
16. Lefebvre V.A. *Konfliktuyushchie struktury* [Conflicting structures]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 160 p.
17. Algin V.B., Poddubko S.N. *Resurnaya mekhanika transmissiy mobilnykh mashin* [Lifetime mechanics of vehicle transmissions]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2019. 549 p.
18. Algin V.B., et al. *Zubchatye peredachi i transmissii v Belarusi: proektirovaniye tekhnologiya, otsenka svoystv* [Gears and transmissions in Belarus: design, technology, estimation of properties]. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2017. 406 p.
19. Shil’ko S.V., Starzhinsky V.E., Petrokovets E.M. Methods and Results of Composite Gears Design. *Theory and Practice of Gearing and Transmissions*, 2016, pp. 341–368.
20. Demidov G.A., Karandashev A.N., Shalobaev E.V., Perepelitsa F.A., Shil’ko S.V., Starzhinsky V.E., Dubrovsky V.V. Primeneniye polimernykh svyazuyushchikh pri sozdaniy keramicheskikh izdeliy metodami additivnykh tekhnologiy [The use of polymer binders in the creation of ceramic products by the methods of additive technologies]. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2019, vol. 5, no. 3, pp. 59–63.
21. Ceccarelli M. Consideration on History of Mechanism and Machine Science with an IFToMM Role for Future Development. *Theory and Practice of Gearing and Transmissions*, 2016, pp. 37–54.
22. *Advances in Mechanism and Machine Science. Proceedings of the 15th IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*. Krakow, Poland, 2019. 4248 p.
23. Venkateswaran S., Chablat D. A new inspection robot for pipelines with bends and junctions. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 33–42.
24. Babichev D., Evgrafov A., Lebedev S. Lever mechanisms: the new approach to structural synthesis and kinematic analysis. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 559–568.
25. Parikyan T. Design Analysis Tasks in Simulation of Engine and Powertrain Dynamics: An Overview. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 893–904.
26. Chandra M., Dan P.K. A Novel Gear Shifting Strategy for Dual Clutch Transmission System Using Reverse Engineering and Robust Design Technique. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 1049–1058.
27. Simionescu P.A. New and Revised Mechanism Classifications: Proposal and Motivation. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 1141–1150.
28. Li H., Li R., Zhu J. Design and Experiment of the Underwater Robotic Fish for Petroleum Pipeline Inspection System. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 1373–1384.
29. Pozhbelko V. Type Synthesis Method of Planar and Spherical Mechanisms Using the Universal Structural Table with All Possible Link Assortments. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 1517–1526.
30. Pozhbelko V.I. *Mnogokratnyy sharnir peredachi* [Multiple articulated joint of gear]. Patent RF, no. 2543135, 2015.
31. Demiyannushko I., Karpov I., Tavshavadze B. Applications Fem Analysis in Researches Reliability and Dynamics of Road Safety Barriers at Collisions with Cars. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 1651–1658.
32. Guo Z., Zhu Y., Wang M., Li T., Zhao H., Xu L., Ceccarelli M. System Design and Experimental Analysis of an All-environment Mobile Robot. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 1969–1978.
33. Zieliński C. General Robotic System Software Design Methodology. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 2779–2788.
34. Pencic M., Cavic M., Brkic B., Rackov M. A Novel 3 DOFs Waist Mechanism for Humanoid Robots: Kinematic Analysis and Motion Simulation. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 2809–2818.
35. D. Pandey, Kushwah J.S., Chittawadigi R.G., Krishna K.R., Saha S.K. Effective Teaching of Mechanism Synthesis using MechAnalyzer Software. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 3237–3245.
36. Quaglia G., Visconte C., Scimmi L.S., Melchiorre M., Cavallone P., Pastorelli S. Design of the positioning mechanism of an unmanned ground vehicle for precision agriculture. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 3531–3540.
37. Raghavan M. Novel Mechanisms to Improve the Start Quality of Automotive Engines. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 3591–3600.
38. Algin V. Calculated Modes for Assessing Operation Properties and Dependability of Vehicles. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 3749–3758.
39. Myshkin N.K., Grigoriev A.Ya. Problems in Friction Analysis. *Advances in Mechanism and Machine Science*, 2019, pp. 3779–3788.