

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
Объединенный институт машиностроения

В. Б. Альгин, С. Н. Поддубко

---

# РЕСУРСНАЯ МЕХАНИКА ТРАНСМИССИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

Минск  
«Беларуская навука»  
2019

**Альгин, В. Б.** Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин / В. Б. Альгин, С. Н. Поддубко ; Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт машиностроения. — Минск : Беларуская навука, 2019. — 548, [1] с.

УДК 629.3.02-235:531

ББК 39

**Чит. зал №1 — 1 экз.**

Рассмотрены ключевые вопросы расчета и проектирования трансмиссий мобильных машин на основе созданного комплекса ресурсно-функциональных моделей. Разработаны методики и программные модули анализа и синтеза, схематизации, кинематического и динамического расчетов, оценки реальной надежности трансмиссии и мобильной машины в целом, что соответствует модельному подходу, лежащему в основе идеологии Индустрии 4.0. Трансмиссия рассматривается как многокомпонентная система с изменяемой структурой и состояниями для воспроизведения ее основных свойств в процессе жизненного цикла. Приведены примеры расчетов трансмиссий известных мировых и отечественных производителей. Представлено сравнение транспортных средств с различными приводами по энергетической эффективности и совокупной стоимости владения на примере городских электробусов.

Предназначена для специалистов по трансмиссиям, а также для аспирантов, магистрантов и студентов высших технических учебных заведений.

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
<b>I. ИНДУСТРИЯ 4.0. ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ</b> .....	10
<b>1. Об Индустрии 4.0</b> .....	11
1.1. Основные понятия Индустрии 4.0 .....	11
1.2. Компоненты i4.0, наиболее тесно связанные с моделированием функциональных свойств и надежности .....	13
1.3. Отечественные разработки в области информационных моделей машин .....	14
1.4. Примеры реализации CPS и IoT .....	16
Литература.....	17
<b>2. Надежность технически сложных изделий</b> .....	18
2.1. Технически сложные товары (изделия).....	18
2.2. Трактовки надежности.....	19
2.3. Прогнозирование надежности .....	21
Литература.....	22
<b>3. Методология прогнозирования функциональных свойств и индивидуальной надежности машины в свете i4.0. Общие положения</b> .....	24
3.1. Предельные состояния .....	24
3.2. Представление технически сложных изделий в виде иерархических схем отказов или предельных состояний.....	25
3.3. Расход ресурса сложного изделия .....	26
3.4. Эволюция изделия в процессе жизненного цикла и ее отражение цифровым двойником.....	27
3.5. Особенности организации мониторинга ТСИ .....	28
3.5.1. Принцип необходимого разнообразия.....	28
3.5.2. Использование общих данных и локальных моделей.....	28
3.5.3. Задача реконструкции данных .....	29
3.5.4. Использование датчиков при мониторинге надежности ТСИ.....	30
Литература.....	31
<b>II. ТРАНСМИССИИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ, АВТОБУСОВ И ВЫСОКОМОЩНОЙ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ</b> .....	32
<b>4. Схемные решения и конструкции узлов трансмиссий для грузовых автомобилей и автобусов</b> .....	33
4.1. Коробки передач для грузовых автомобилей и автобусов .....	33
4.1.1. Многоступенчатые (9–16 ступеней) механические коробки передач для магистральных тягачей и грузовых автомобилей повышенной проходимости .....	33
4.1.2. Коробки передач для автобусов и развозных автомобилей .....	41

4.1.3. Гидромеханические передачи.....	43
4.2. Сцепления для грузовых автомобилей и автобусов .....	48
4.2.1. Общая характеристика .....	48
4.2.2. Особенности конструкции различных типов сцеплений.....	51
4.2.3. Мировые производители сцеплений и особенности их продукции .....	51
Литература .....	57
<b>5. Высокомощные отечественные и зарубежные ГМТ .....</b>	<b>59</b>
5.1. Место высокомощных ГМТ среди других приводов .....	59
5.2. Развитие отечественной промышленности по созданию современных ГМТ в нормативных документах .....	62
5.3. Новые отечественные разработки. ГМТ.....	63
5.3.1. БелАЗ и подобные решения .....	63
5.3.2. ГМТ МЗКТ и подобные решения .....	66
5.4. Передаточные числа коробок передач .....	69
5.4.1. ПКП с последовательной структурой.....	69
5.4.2. ПКП с параллельной структурой .....	72
5.5. О выборе (проектировании) высокомощных ГМП .....	74
5.5.1. Характерные ряды передаточных чисел высокомощных ГМП .....	74
5.5.2. Использование конечными производителями собственных и покупных ГМП... ..	75
5.5.3. Вопросы надежности .....	78
5.6. ГМТ для сверхглубоких карьеров .....	78
Выводы .....	79
Литература .....	80
<b>III. СИНТЕЗ ТРАНСМИССИИ.....</b>	<b>82</b>
<b>6. Структурное представление трансмиссии. Параметры и показатели .....</b>	<b>83</b>
6.1. Параметры и показатели коробок передач .....	83
6.2. Структурный анализ коробок передач .....	83
6.3. Определение параметров коробок передач аналитическим методом.....	91
6.4. Основы планов скоростей .....	94
Литература .....	96
<b>7. Оценка схем трансмиссии .....</b>	<b>98</b>
7.1. Критерии оценки схем коробок передач .....	98
7.2. Показатели для оценки схем по результатам скоростного и силового расчетов и их предельные значения .....	98
7.3. Оценка конструктивных свойств коробок передач на основе схемных признаков ....	101
7.4. Комплексная оценка нагруженности и компактности коробок.....	106
Литература .....	108
<b>8. Модели и методы синтеза трансмиссии .....</b>	<b>109</b>
8.1. Представление планетарных и комбинированных зубчатых механизмов при их синтезе и анализе.....	109
8.2. Характерные подходы к синтезу планетарных коробок передач, основанные на полном компьютерном переборе возможных вариантов их получения .....	111
8.3. Ограниченность подходов, основанных на переборе возможных вариантов, направления развития методов синтеза коробок передач, использование модульного принципа в качестве альтернативы .....	117
8.4. Сложно формализуемые факторы при синтезе схем трансмиссии. Направления развития методов синтеза.....	119
Литература .....	120

<b>9. Синтез коробок передач на базе обобщенных структур и канонических матриц инцидентов</b> .....	122
9.1. Канонические матрицы инцидентов для описания и синтеза структур трансмиссий .....	123
9.2. Решение задачи структурно-схемного синтеза планетарных коробок передач на основе использования структурных фрагментов и поискового алгоритма.....	127
9.3. Методика и программное обеспечение синтеза и оптимизации параметров трансмиссии .....	132
Литература.....	133
<b>10. Получение схем трансмиссии на основе структурно-схемных закономерностей</b> ....	135
10.1. Вальные трансмиссии с повышенным КПД.....	135
10.2. Вально-планетарные трансмиссии .....	138
10.2.1. Соосные вально-планетарные коробки повышенной надежности .....	138
10.2.2. Несосоосные вально-планетарные коробки.....	141
10.3. Планетарные трансмиссии .....	143
10.3.1. Трансмиссии на основе одного планетарного ряда.....	143
10.3.2. Трансмиссии на основе двух планетарных рядов.....	145
10.3.3. Трансмиссии минимальной нагруженности на основе модификации механизма Симпсона .....	149
Литература.....	152
<b>11. Методика получения многоступенчатых трансмиссий на основе базового модуля в виде модифицированного механизма Симпсона</b> .....	153
11.1. Базовая коробка в структуре коробки передач с тремя степенями свободы .....	153
11.2. Основные положения методики .....	155
11.3. Детализация методики .....	156
11.4. Пример применения методики.....	163
11.5. Основная коробка с присоединяемыми механизмами планетарного и непланетарного типов. Использование зубчатых муфт.....	167
11.6. Универсальность основной коробки: получение повышающих и понижающих передач. Унификация .....	168
Выводы .....	171
Литература.....	171
<b>IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ. РАСЧЕТЫ ТРАНСМИССИИ ПРИ ЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИИ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ</b> ....	172
<b>12. Подходы к моделированию сложных механических объектов</b> .....	173
12.1. Классификация пакетов программ для моделирования сложных многоэлементных механических и комбинированных объектов.....	173
12.2. Пакеты программ для моделирования приводов (Drivelines).....	177
12.3. Среда Modelica. Эволюция подходов к моделированию сложных многокомпонентных систем .....	179
12.3.1. Идеология моделирования в среде Modelica .....	179
12.3.2. Библиотека механических компонентов в Modelica.....	181
12.3.2. Пример построения модели и расчета с использованием компонентов Modelica.Mechanics.Rotational .....	183
12.4. Системы, ориентированные на проектирование и расчет трансмиссионных компонентов .....	184
12.4.1. Пакет KissSoft .....	184
12.4.2. Пакет APM WinMachine.....	185
12.4.3. Пакет SimDriveline .....	187
12.5. Подходы к разработке программного обеспечения статических, кинематических и динамических расчетов трансмиссии.....	189
Выводы .....	191
Литература.....	192

<b>13. Модели и методы расчета трансмиссии при ее схемном представлении.....</b>	<b>194</b>
13.1. Задачи расчета и проектирования трансмиссии при ее представлении кинематической схемой.....	194
13.2. Скоростной и силовой расчеты.....	195
13.2.1. Схематизация трансмиссии для скоростного и силового расчетов.....	195
13.2.2. Общие случаи скоростного и силового расчетов.....	198
13.3. Примеры расчетов.....	200
13.4. Пакеты программ для скоростного и силового расчетов.....	205
13.4.1. Пакет Kinematic.....	205
13.4.2. Пакет Visual Statics.....	209
Литература.....	211
<b>14. Комплексная оценка трансмиссий на схемном уровне.....</b>	<b>213</b>
14.1. Типовые коробки передач мировых производителей для грузовых и пассажирских автомобилей [1].....	213
14.2. Высокомощные коробки передач с тремя степенями свободы [2].....	218
14.3. Высокомощные коробки передач с четырьмя степенями свободы [2].....	224
14.4. Связь нагруженности, структуры и конфигурации коробки.....	228
14.5. Коробки передач с минимальной нагруженностью.....	230
Выводы.....	233
Литература.....	233
<b>15. Определение тенденций развития многоступенчатых гидромеханических трансмиссий с использованием патентных ландшафтов и расчетного анализа.....</b>	<b>234</b>
15.1. Методика сбора информации для патентных ландшафтов и примеры построения патентных карт.....	234
15.2. Расчетный анализ патентной карты.....	244
Выводы.....	246
Литература.....	247
<b>16. Многокритериальная оценка коробок передач на схемном уровне.....</b>	<b>249</b>
16.1. Проблема оценки качества. Представление и оценка многомерных данных.....	249
16.2. Выбор показателя качества.....	252
16.3. Настройка (нормировка) отдельных показателей.....	253
16.4. Методика и пример ее применения.....	256
16.5. Анализ результатов.....	262
Литература.....	263
<b>V. ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ТРАНСМИССИИ.....</b>	<b>264</b>
<b>17. Основные задачи динамики трансмиссии. Регулярные механические системы...</b>	<b>265</b>
17.1. Классическая механика и современная динамика систем.....	265
17.2. Основные задачи динамики трансмиссии.....	266
17.3. Регулярные механические системы. Схематизация трансмиссии.....	267
17.3.1. Характерные случаи некорректной и неудачной схематизации механических объектов.....	267
17.3.2. О регулярности технических объектов.....	269
17.3.3. Концепция регулярной механической системы (РМС).....	269
17.3.4. Особенности схематизации контактирующих упруго-инерционных объектов и объектов с существенно отличающимися параметрами.....	274
17.3.5. Символическое представление механических систем: динамические схемы....	276
17.3.6. Нормализованные динамические схемы.....	276

17.3.7. Использование индикаторов состояния. Метод внутренних моментов и локальная схематизация фрикционных устройств .....	278
17.3.8. Однородные механические системы.....	279
17.3.9. Поступательно-вращательные системы .....	280
Литература.....	282
<b>18. Определение параметров механической системы и ее преобразования.....</b>	<b>283</b>
18.1. Определение инерционных, упругих и диссипативных параметров.....	283
18.2. Преобразования механических систем.....	287
18.2.1. Преобразование вырожденных (нерегулярных) динамических схем в регулярные .....	287
18.2.2. Приведение .....	289
18.2.3. Упрощение .....	291
Литература.....	294
<b>19. Прямое моделирование динамических процессов трансмиссии в составе мобильной машины .....</b>	<b>295</b>
19.1. Моделирование динамики трансмиссии как системы с изменяемыми состояниями.....	297
19.1.1 Составление уравнений динамики системы с переменной структурой, содержащей жесткие компоненты.....	297
19.1.2. Метод внутренних моментов. Общий случай составления уравнений динамики.....	298
19.1.3. Логические уравнения для описания состояний устройств с переменной структурой.....	300
19.1.4. Обобщенная динамическая схема машинного агрегата с гидротрансформатором .....	301
19.2. Моделирование процесса переключения передач.....	302
19.3. Определение эксплуатационных показателей мобильной машины на основе моделирования ее рабочего процесса .....	303
19.3.1. Параметры автомобиля, трансмиссий, дорожные условия.....	304
19.3.2. Результаты моделирования.....	306
19.4. Максимальные динамические нагрузки. Трогание транспортного средства с механической трансмиссией .....	310
19.5. Максимальные динамические нагрузки гидромеханической трансмиссии.....	312
19.5.1. Технология переключения фрикционов «Clutch-to-Clutch» .....	312
19.5.2. Динамическая нагруженность ГМП при трогании машины .....	316
Литература.....	324
<b>20. Расчеты частот и форм собственных колебаний механических систем.....</b>	<b>327</b>
20.1. Использование известных матричных операций .....	328
20.2. Введение конечных жесткостей и использование индикаторов состояния для формирования универсальной модели.....	329
20.3. Программная реализация расчета.....	331
20.4. Демонстрация основных этапов работы программы CFVARSYS .....	333
20.5. Пример расчета многоступенчатой планетарной трансмиссии.....	335
20.6. Расчет с использованием системы компьютерной алгебры Mathematica .....	339
Литература.....	342

<b>21. Установившиеся колебания механических систем. Расчет передаточных функций...</b>	344
21.1. Передаточная функция и методы ее расчета .....	344
21.2. Типовые расчеты нагруженности трансмиссии в установившихся колебательных процессах .....	348
Литература .....	355
<b>22. Комплексная функциональность транспортного средства. Использование трансмиссии при экстренном торможении .....</b>	357
22.1. Системы ассистирования водителю .....	357
22.2. Классификация и концепция ассистента для критических ситуаций .....	359
22.3. Тормозной ассистент с использованием трансмиссии.....	360
22.4. Построение динамических моделей.....	362
22.5. Моделирование процесса экстренного торможения .....	364
22.6. Техническая реализация ассистента водителю и способа экстренного торможения .....	366
Выводы .....	371
Литература .....	372
<b>VI. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ. РЕСУРСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ.....</b>	374
<b>23. Анализ проблемы. Разработка методологии проектирования и прогнозирования надежности сборочных единиц машин.....</b>	375
23.1. Проблемы прогнозирования надежности и проектирования изделий с требуемой надежностью.....	375
23.2. Определение комплекса размеров сборочной единицы. Ресурсное проектирование.....	382
23.3. Основные определения и общая схема ресурсного проектирования .....	385
23.4. Специфические задачи ресурсного проектирования.....	389
23.4.1. Выбор расчетных характеристик внешней нагруженности и несущей способности элементов .....	389
23.4.2. Поиск функциональных размеров .....	391
23.5. Определение функциональных размеров составных частей сборочных единиц трансмиссии .....	394
23.6. Весовое проектирование.....	396
Литература .....	398
<b>24. Выбор функциональных размеров основных элементов коробки передач .....</b>	401
24.1. Выбор размеров на основе показателей надежности, нагруженности и несущей способности (ресурсное проектирование) .....	401
24.2. Проектно-расчетный расчет зубчатых передач .....	403
24.2.1. Нагрузочный режим .....	403
24.2.2. Методика проектно-расчетного расчета .....	405
24.3. Выбор размеров подшипников сателлитных узлов .....	410
24.4. Выбор размеров фрикционов .....	417
Литература .....	419
<b>25. Типовые конструктивные виды основных элементов и компоновка коробки передач .....</b>	420
25.1. Преобразующие элементы .....	420
25.2. Передающие элементы.....	422
25.3. Элементы управления .....	423
25.4. Корпусные элементы .....	427
25.5. Компоновка планетарных коробок передач .....	428
25.6. Определение массинерционных параметров планетарных коробок передач ...	432
Литература .....	434



<b>VII. РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ .....</b>	<b>435</b>
<b>26. Методология расчета надежности машин и их систем.....</b>	<b>436</b>
26.1. Особенности оценки и обеспечения прочностных свойств машин .....	436
26.2. Оценка прочности (ресурса) компонентов машин.....	439
26.3. Расчет реальной надежности в рамках ресурсной механики машин .....	443
26.4. Особенности расчета надежности трансмиссии как технически сложного изделия .....	450
Литература .....	454
<b>27. Типовые случаи расчета надежности .....</b>	<b>456</b>
27.1. Расчет надежности трансмиссионного узла с сильной связью элементов по нагруженности .....	456
27.2. Общий случай расчета показателей надежности трансмиссии с применением основной имитационной процедуры.....	459
27.3. Пример расчета показателей долговечности машины.....	463
Литература.....	465
<b>28. Оценка режимов движения, нагруженности и ресурса в условиях неопределенности и неполноты данных .....</b>	<b>466</b>
28.1. Методы определения и использования нагрузочного режима автомобиля.....	467
28.2. Базовое представление нагрузочного режима.....	469
28.3. Стиль вождения и ресурс .....	470
28.4. Оценка ресурса при неполноте исходных данных о трансмиссионном узле .....	472
Выводы .....	477
Литература .....	478
<b>VIII. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ПРИВОДОВ .....</b>	<b>479</b>
<b>29. Электрификация городского транспорта. Основные этапы создания парка электробусов .....</b>	<b>480</b>
29.1. Обзор исследований электрических автобусов.....	480
29.1.1. Общий обзор результатов .....	480
29.1.2. Спецификация, систематизация и развитие данных по тематике электрических автобусов.....	484
29.2. Анализ требований к основным этапам и данным при переходе к парку электрических автобусов.....	486
29.2.1. Основные этапы перехода к парку электрических автобусов .....	486
29.2.2. Подробное описание данных и их форматов.....	488
29.3. Чувствительность ТСО к различным факторам .....	493
29.3.1. Структура ТСО .....	493
29.3.2. Оплата водителя, стоимость покупки транспортных средств и батарей .....	495
29.3.3. Чувствительность ТСО к конфигурации зарядки и пробегу .....	496
29.3.4. ТСО в зависимости от годового пробега автобусов .....	497
Выводы .....	498
Литература .....	499
<b>30. Энергоэффективность транспортных средств .....</b>	<b>501</b>
30.1. Типовые циклы движения автомобилей .....	501
30.2. Использование типовых ездовых циклов при моделировании .....	506
30.3. Оценка и оптимизация энергопотребления транспортного средства .....	508

30.3.1. Кинетическая интенсивность .....	508
30.3.2. Энергоэффективное движение.....	509
30.4. Характерные изобретения в области оценки энергопотребления и стиля вождения .....	510
30.4.1. Оценка стиля вождения по затраченной энергии .....	510
30.4.2. Корректировка скорости автомобиля в процессе движения с учетом предстоящего изменения уклона дороги .....	511
30.4.3. Управление автомобилем для обеспечения движения в заданных пределах скоростей в холмистой местности .....	513
30.4.4. Автоматическое получение характеристик дороги/рельефа на борту транспортного средства без привлечения внешних источников .....	513
30.4.5. Определение квалификации водителя автомобиля по углу открытия дросселя .....	515
30.4.6. Метод и устройство для оценки расхода топлива на основе учета факторов, определяемых в процессе движения с использованием параметров автомобиля и системы диагностирования .....	515
30.4.7. Система для имитации использования энергии транспортного средства, содержащая вычислительное устройство, конфигурация которого предусматривает оценку полезной нагрузки в процессе движения .....	517
Литература .....	521
<b>31. Расчетные режимы для оценки эксплуатационных свойств и надежности транспортных средств .....</b>	<b>523</b>
31.1. Проблема определения расчетных значений параметров, характеризующих эксплуатационные свойства и надежность.....	523
31.2. Расчетный режим .....	525
31.2.1. Анализ данных об энергопотреблении электробусов .....	525
31.2.2. Обоснование расчетного режима.....	527
31.3. Метод оценки энергопотребления электробуса, основанный на данных для дизельного автобуса .....	530
31.4. Построение типовых циклов движения электробусов «от остановки к остановке» .....	531
Выводы .....	536
Литература.....	536
<b>Заключение .....</b>	<b>538</b>