

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Литература	5
Введение	12
Литература	32
Глава 1. Электромеханический привод. Выбор электродвигателя и кинематический расчет механизма на начальном этапе проектирования. Компонировочные схемы механизмов	34
1.1. Назначение и классификация электромеханических приводов малой мощности. Мотор-редукторы	34
1.2. Микроэлектродвигатели. Классификация и характеристики	37
1.3. Выбор электродвигателя	38
1.4. Приборный привод как мехатронный модуль. Мехатронные модули и робототехника	43
1.5. Общие указания по расчету и проектированию приборных зубчатых передач ..	49
1.6. Предварительный выбор модуля зацепления, передаточного отношения и чисел зубьев	50
1.6.1. Выбор параметров проектирования	50
1.6.2. Исходный контур и расчетный модуль	51
1.6.3. Выбор модуля из конструктивных соображений	61
1.6.4. Предварительный выбор передаточного отношения и чисел зубьев	67
1.6.5. Переход от передаточного отношения к передаточному числу	75
1.6.6. Закон сохранения энергии в зубчатых передачах	76
1.7. Многоступенчатые зубчатые механизмы. Предварительный расчет числа ступеней и их передаточных отношений	77
1.7.1. Компонировочные схемы многоступенчатых механизмов	77
1.7.2. Общие указания по выбору числа ступеней и их передаточных отношений ..	83
1.7.3. Особенности компоновки механизмов с пластмассовыми зубчатыми колесами ..	86
1.7.4. Примеры расчета	87
1.8. Компонировочные схемы планетарных передач	90
1.8.1. Термины и определения	90
1.8.2. Схемы компоновки планетарных передач	91
1.9. Компоновка редукторов с цилиндрическими (плоскоцилиндрическими) зубчатыми передачами	97

1.10. Фрикционные передачи и вариаторы	102
1.10.1. Общие положения	102
1.10.2. Классификация фрикционных передач	105
1.10.3. Классификация фрикционных вариаторов	106
1.10.4. Лобовые вариаторы с роликами	108
1.10.5. Лобовые вариаторы с шариками	109
1.10.6. Компонентные схемы и кинематика фрикционных планетарных эксцентриковых передач	111
Литература	119
Глава 2. Расчет геометрических параметров зубчатых колес и передач	122
2.1. Цилиндрическая зубчатая передача внешнего зацепления	122
2.2. Цилиндрическая зубчатая передача внутреннего зацепления	126
2.3. Реечная цилиндрическая зубчатая передача	130
2.4. Коническая зубчатая передача	131
2.5. Червячная передача	133
2.6. Винтовая зубчатая передача [4]	135
2.7. Особенности расчета геометрии передач с пластмассовыми зубчатыми колесами	139
2.7.1. Расчет геометрических параметров зубчатых колес и передач с учетом отклонений, обусловленных условиями работы передачи, погрешностями изготовления и монтажа	139
2.7.2. Расчет сборочных зазоров в зацеплении	142
2.7.3. Примеры расчета	149
2.7.4. Блокирующие контуры для зубчатых передач с пластмассовыми колесами	154
2.8. Расчет геометрии зубчатых колес в параметрах, не связанных с производящим исходным контуром	157
2.8.1. Методика расчета геометрии цилиндрической зубчатой передачи в системе обобщающих параметров	157
2.8.2. Использование обобщающих параметров при расчете коэффициентов технологической усадки	172
2.9. Расчет геометрических параметров передачи внешнего зацепления, сформированной из колес, образованных в станочном зацеплении обобщенным производящим исходным реечным контуром	173
Литература	179
Глава 3. Расчеты на прочность приборных зубчатых передач	181
3.1. Общие указания по расчету приборных зубчатых передач	181
3.2. Цилиндрическая зубчатая передача	182
3.2.1. Расчет цилиндрических зубчатых колес на контактную выносливость	183
3.2.2. Расчет зубьев цилиндрических колес на выносливость при изгибе	191
3.3. Расчет передач с винтовыми зубчатыми колесами	196
3.3.1. Расчет на износ и заедание	196
3.3.2. Пример расчета	197
3.4. Расчет на прочность конических зубчатых колес	200
3.5. Расчеты на прочность червячных передач	202
3.5.1. Расчет на контактную выносливость	202
3.5.2. Расчет на выносливость при изгибе	205
3.5.3. Материалы и допускаемые напряжения	206
3.6. Расчет на прочность зубьев планетарных передач	209
3.6.1. Порядок расчета	209
3.6.2. Пример расчета планетарной передачи	210

3.7.1. Проектировочный расчет	212
3.7.2. Проверочный расчет на прочность гибкого колеса	213
3.7.3. Пример расчета волновой передачи	215
3.8. Особенности расчета на прочность приборных зубчатых передач с пластмассовыми колесами	217
3.8.1. Выбор материала	217
3.8.2. Упрощенная методика определения модуля при проектировочном расчете	221
3.8.3. Выбор модуля по критерию жесткости	222
3.8.4. Проектировочный расчет зубчатой передачи на прочность	224
3.8.5. Проверочный расчет на прочность	227
3.8.6. Сравнение прочности пластмассовых зубчатых колес с симметричным и асимметричным профилем зубьев	228
3.9. Применение численных методов в расчетах элементов приводов	234
3.9.1. Возможности численных методов	234
3.9.2. Метод конечных элементов, программное обеспечение и примеры расчета	235
3.9.3. Метод граничных элементов	248
3.10. Метод определения пределов изгибной и контактной усталости	253
3.10.1. Процедура испытаний. Испытательное оборудование	253
3.10.2. Способ построения кривых усталости	255
3.10.3. Пример построения кривых усталости	255
Литература	257
Глава 4. Автоматизированное проектирование зубчатых передач	259
4.1. Анализ методов автоматизированного проектирования зубчатых передач	259
4.2. Автоматизированное проектирование зубчатых передач с помощью динамич- ных блокирующих контуров	263
4.2.1. Концепция динамичного блокирующего контура	264
4.2.2. Система построения и использования динамичного блокирующего контура	266
4.3. Концепция САПР зубчатых передач с использованием универсальных про- граммных модулей	269
4.4. Программа автоматизированного проектирования цилиндрических и кониче- ских зубчатых передач с пластмассовыми колесами	273
4.4.1. Назначение и содержание программы	273
4.4.2. Работа с программой	276
4.4.3. Примеры расчета по программе	283
4.4.4. Методика и результаты экспериментального исследования точности пласт- массовых зубчатых колес и рекомендации по корректировке размеров формо- образующих матриц	288
4.5. Метод Direct Gear Design автоматизированного проектирования зубчатых пере- дач в обобщающих параметрах	300
4.5.1. Общие положения	300
4.5.2. Анализ области существования передач, спроектированных по системе Direct Gear Design	302
4.5.3. Методика Genetic Molding Solution для корректировки размеров формоо- бразующих матриц при проектировании зубчатых передач с пластмассовыми ко- лесами	305
Литература	306
Глава 5. Трение и износ зубчатых передач	311
5.1. Трение в зубчатых передачах	312
5.2. Основные классы и виды износа зубчатых колес	314

5.4.1. Расчет долговечности зубчатых передач по теории усталостного износа	318
5.4.2. Расчет на прочность зубьев мелко модульных зубчатых колес с учетом износа	319
5.5. Особенности трения и изнашивания пластмассовых мелко модульных зубчатых колес	327
5.5.1. Коэффициент трения и КПД	327
5.5.2. Износостойкость пластмассовых зубчатых колес (ПМЗК)	330
5.6. Особенности расчета износостойкости пластмассовых зубчатых колес	337
5.7. Расчет на износ композитных зубчатых колес	340
Литература	348
Глава 6. Надежность приборных мелко модульных зубчатых передач	35
6.1. Прогнозирование показателей надежности зубчатых механизмов	351
6.1.1. Основы прогнозирования надежности механических систем	351
6.1.2. Методика прогнозирования надежности зубчатых механизмов	352
6.2. Расчет показателей надежности по критериям износа и свободного хода	367
6.2.1. Предельная величина износа зубьев	367
6.2.2. Методика расчета показателей надежности по критерию износа	371
6.2.3. Методика расчета надежности по критерию свободного хода	374
6.2.4. Проектный расчет модуля по критерию предельно допустимого износа	377
6.2.5. Примеры расчета по критериям износа, свободного хода и прочности изношенных зубьев	380
Литература	390
Глава 7. Выбор, распределение и оптимизация передаточного отношения зубчатых механизмов	392
7.1. Основы оптимизационных расчетов деталей и узлов механизмов	392
7.1.1. Общие положения	392
7.1.2. Методика оптимизационного расчета по целевым функциям	396
7.2. Выбор и распределение передаточного отношения зубчатых механизмов	398
7.2.1. Основные критерии оптимизации передаточных механизмов	398
7.2.2. Основные соотношения для расчета габаритов зубчатых механизмов	399
7.3. Оптимизационные расчеты при проектировании одно- и двухступенчатых редукторов	401
7.3.1. Автоматизированное проектирование типовых редукторов по принципу многокритериальной оптимизации	402
7.3.2. Закономерности распределения передаточных чисел для одно- и двухступенчатых передач минимальных габаритов [12]	408
7.3.3. Оптимизация цилиндрического редуктора по массе зубчатых колес	413
7.4. Общие принципы распределения передаточного отношения по ступеням многоступенчатого редуктора	414
7.4.1. Распределение u_p по закону арифметической прогрессии	416
7.4.2. Распределение u_p по закону геометрической прогрессии	417
7.4.3. Распределение u_p по экспоненциальному закону	419
7.5. Оптимизация многоступенчатых механизмов по габаритам	420
7.5.1. Механизмы с кинематической схемой уступом	421
7.5.2. Многоступенчатые соосные механизмы	424
7.5.3. Многоступенчатый механизм с орбитальной компоновкой	423
7.5.4. Пример оптимизации соосного редуктора	429
7.5.5. Сравнение размеров оптимизированных по габаритам многоступенчатых механизмов	43
7.5.6. Общие выводы	432

7.6. Автоматизированное проектирование многоступенчатых механизмов	434
7.6.1. Алгоритм проектирования многоступенчатых механизмов по схеме уступом и схеме соосной компоновки	434
7.6.2. Алгоритм проектирования механизма с орбитальной компоновкой и равномерным распределением u_p	436
7.6.3. Программа автоматизированного проектирования многоступенчатых зубчатых механизмов приборов	439
7.7. Оптимизация по приведенному моменту инерции	440
7.7.1. Методика расчета моментов инерции зубчатых колес	440
7.7.2. Оптимизация по критерию минимизации приведенного момента инерции редуктора	444
7.8. Оптимизация по суммарной угловой погрешности передачи	447
7.9. Оптимизация кинематических схем механизмов по КПД	449
7.9.1. Оптимизация кинематической схемы механизма с орбитальной компоновкой по КПД	450
7.9.2. Сравнительный анализ оптимизации по габаритам и КПД	452
7.10. Примеры расчета	454
7.11. Оптимизационные расчеты двухпоточных зубчатых механизмов	456
7.11.1. Общие положения	456
7.11.2. Алгоритм расчета двухпоточного редуктора	461
7.11.3. Подготовка данных для программы автоматизированного расчета	463
7.11.4. Программа автоматизированного расчета	466
Литература	469
Глава 8. Точность и контроль зубчатых передач	472
8.1. Определения и терминология	472
8.1.1. Параметры точности передачи	472
8.1.2. Взаимосвязь параметров точности зубчатых передач и общей теории точности механизмов	475
8.2. Система нормирования точности зубчатых механизмов	477
8.2.1. Нормирование кинематической точности	477
8.2.2. Нормирование бокового зазора	478
8.2.3. Замечания по использованию норм точности	480
8.2.4. Примеры условного обозначения передач	481
8.3. Контроль зубчатых колес и передач	483
8.3.1. Оборудование для двухпрофильного контроля измерительного межосевого расстояния	486
8.3.2. Зарубежное оборудование для двухпрофильного контроля измерительного межосевого расстояния	488
8.3.3. Программное обеспечение и особенности трактовки параметров двухпрофильного контроля по ГОСТ и DIN	491
8.3.4. Идентификация параметров измерительного межосевого расстояния для цилиндрических зубчатых колес	498
8.3.5. Основные требования к выбору и расчету измерительных колес	500
8.4. Расчет кинематической погрешности (КП)	510
8.4.1. Общие положения	510
8.4.2. Расчет КП по методу максимума-минимума	511
8.4.3. Нестандартная методика расчета КП	513
8.4.4. Расчет КП по вероятностному методу	513
8.4.5. Расчет суммарной приведенной погрешности монтажа	514
8.4.6. Уточненный расчет суммарной приведенной погрешности монтажа передачи	515

8.5. Расчет кинематического мертвого хода (КМХ)	516
8.5.1. Расчет по методу максимума-минимума	516
8.5.2. Расчет по вероятностному методу	517
8.5.3. Определение КМХ, вызванного зазорами в опорах передачи	517
8.5.4. Минимизация КМХ, вызванного зазорами в опорах, выбором оптимально- го взаимного расположения валов редуктора.	521
8.5.5. Определение КМХ передачи по методу Ф. Л. Литвина.	522
8.5.6. Выбор вида сопряжения зубчатых колес в передаче	523
8.5.7. Расчет упругого мертвого хода	525
8.5.8. Пример расчета КП и КМХ кинематической цепи	528
8.6. Конструкторско-технологическое обеспечение качества приборных зубчатых передач	532
8.6.1. Способы снижения кинематической погрешности	533
8.6.2. Способы снижения мертвого хода	535
8.7. Конструкторско-технологические методы обеспечения точности и жесткости узлов редуктора	536
8.8. Методика определения степени точности зубчатых колес в передаче по нормам кинематической точности с учетом погрешностей изготовления и монтажа деталей	537
8.8.1. Методика расчета	538
8.8.2. Пример использования метода	543
8.8.3. Заключение	544
8.9. Соотношение уровней точности элементов зубчатых механизмов (условие «рав- ноточности»)	545
8.10. Анализ и сравнение стандартов, нормирующих параметры точности зубчатых передач	547
8.10.1. Особенности назначения контрольных параметров точности зубчатых пе- редач в системах ГОСТ и DIN.	547
8.10.2. Сравнение показателей точности по ГОСТу и ISO.	552
Литература.	559

Глава 9. Конструирование зубчатых колес и передач	564
9.1. Валы-шестерни	564
9.2. Комбинированные и сборные зубчатые колеса	571
9.3. Червяки и червячные колеса	573
9.4. Конструирование деталей волновых передач	576
9.4.1. Конструкции деталей волновых передач	576
9.4.2. Особенности конструирования пластмассовых гибких колес волновых пе- редач	580
9.5. Конструкции зубчатых передач с компенсацией кинематического мертвого хода	586
9.6. Особенности конструирования пластмассовых зубчатых колес	591
9.6.1. Этапы конструирования и учет специфических свойств полимерного мате- риала	591
9.6.2. Общие рекомендации по конструированию	592
9.6.3. Конструирование пластмассовых зубчатых колес с металлической арматурой	597
9.7. Зубчатые передачи с термо- и гидрокомпенсаторами	602
9.8. Соединение колеса с валом	604
9.8.1. Варианты разъемных и неразъемных соединений колеса с валом.	604
9.8.2. Соединения с натягом	606
9.9. Выполнение чертежей зубчатых колес	619
Литература.	623

Глава 10. Зубчатые передачи в приводах микромеханических систем	625
10.1. Общие сведения о приводах МЭМС	625
10.1.1. Достигнутый уровень миниатюризации	625
10.1.2. Особенности приводов МЭМС в сравнении с полноразмерными аналогами	626
10.1.3. Проблемы обеспечения работоспособности	633
10.2. Краткий обзор технологических процессов обработки деталей микроприводов	635
10.2.1. Технология поверхностной микромеханики	636
10.2.2. Технология объемной микромеханики	637
10.2.3. Технологии индивидуального формообразования	641
10.3. Изготовление, сборка и испытания зубчатых микромеханизмов	647
10.4. Пример использования лазерной технологии для изготовления миниатюрных зубчатых колес	651
10.5. Примеры реализации приводов зубчатых микромеханизмов	652
Литература	656
Глава 11. Валы и оси	659
11.1. Классификация и назначение	659
11.2. Конструирование осей и валов	660
11.3. Расчет валов	663
11.3.1. Проектный расчет	663
11.3.2. Проверочный расчет	664
11.3.3. Расчет диаметра вала по условию прочности штифтового соединения	668
11.4. Пример расчета вала	668
11.5. Расчет на прочность с учетом износоусталостных повреждений	671
11.5.1. Определение размера поперечного сечения вала	671
11.5.2. Выбор материала	673
Литература	674
Глава 12. Расчет и конструирование подшипниковых опор	675
12.1. Подшипники качения	679
12.1.1. Выбор подшипников качения	679
12.1.2. Допуски и посадки подшипников качения	688
12.2. Подшипники скольжения	692
12.2.1. Конструкции и расчет подшипников скольжения	692
12.2.2. Допуски и посадки подшипников скольжения	698
12.2.3. Примеры расчета параметров подшипников скольжения по номограмме (рис. 12.10)	701
12.3. Выбор полимерного материала для подшипников скольжения	701
Литература	703
Глава 13. Муфты	704
13.1. Общие сведения	704
13.2. Муфты постоянного сцепления	704
13.3. Муфты сцепные управляемые	710
13.4. Муфты сцепные самоуправляющиеся	712
Литература	714
Приложения	715
Приложение 1. Характеристики микроэлектродвигателей	715
Приложение 2. Характеристики радиальных и радиально-упорных шарикоподшипников	718

Приложение 3. Значения эвольвентной функции	729
Приложение 4. Геометрические параметры зубчатых колес в системе Plastic Gearing Technology	730
Приложение 5. Коэффициенты перевода единиц измерения из дюймовой системы мер в метрическую (1) и обратно (2).	737
Приложение 6. Таблицы для вычисления статистических характеристик	738
Приложение 7. Механические характеристики сталей, бронз и чугунов, применяемых для изготовления зубчатых и червячных колес.	742
Приложение 8. Физико-механические, теплофизические, триботехнические и технологические свойства конструкционных термопластов и композиционных материалов на их основе	744
Приложение 9. Сравнение показателей точности зубчатых колес по ГОСТ и DIN ..	759