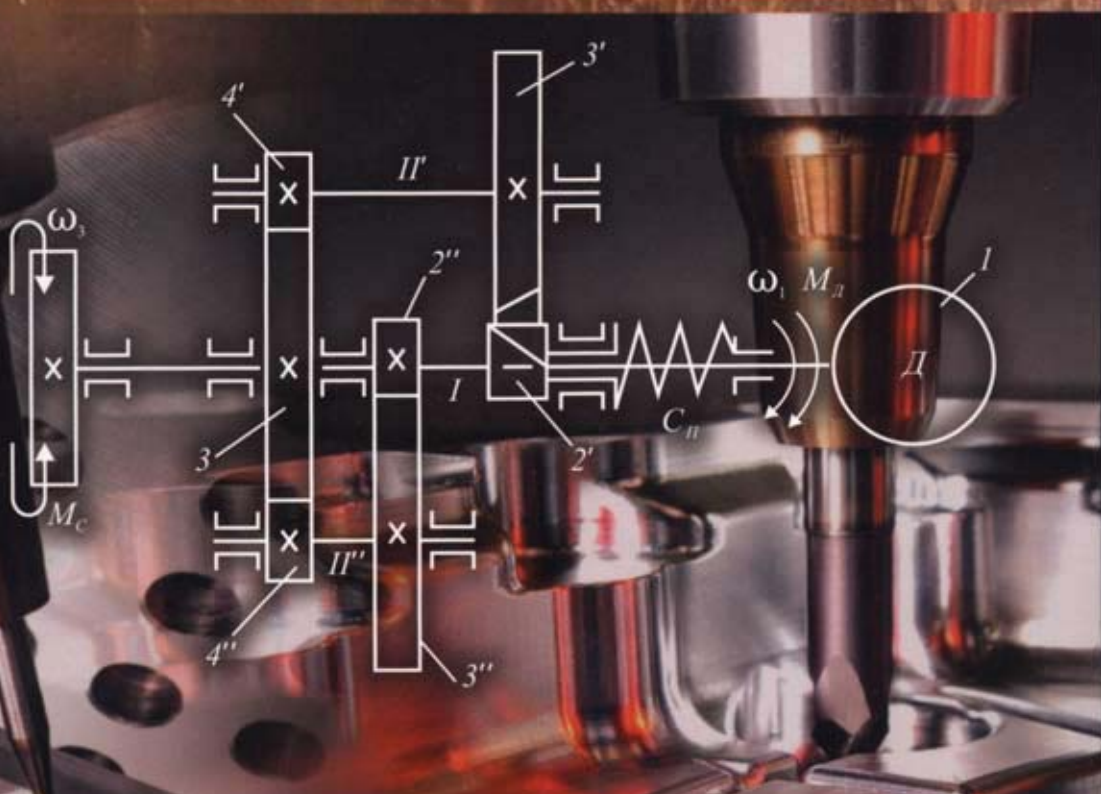




Д. В. Васильков,
В. Л. Вейц,
А. Г. Схиртладзе

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

Расчет и конструирование



Электронный аналог печатного издания: Васильков Д. В. Электромеханические приводы металлообрабатывающих станков. Расчет и конструирование : учебник / Д. В. Васильков, В. Л. Вейц, А. Г. Схиртладзе. — СПб. : Политехника, 2010. — 759 с. : ил.

УДК 621.9.06-001
ББК 34.5-5
В19



ПОЛИТЕХНИКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Санкт-Петербург 2011

www.polytechnics.ru

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Издание выпущено при поддержке Комитета по печати и взаимодействию со средствами массовой информации Санкт-Петербурга

Р е ц е н з е н т ы: д-р техн. наук проф. *В. В. Максаров*
(Северо-Западный государственный технический университет,
Санкт-Петербург);

д-р техн. наук проф. *М. Т. Коротких*
(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет).

Васильков, Д. В.
В19 **Электромеханические приводы металлообрабатывающих станков. Расчет и конструирование: учебник / Д. В. Васильков, В. Л. Вейц, А. Г. Схиртладзе. — СПб. : Политехника, 2011. — 759 с. : ил.**

ISBN 978-5-7325-0990-8

В учебнике изложены основы расчетов и конструирования электромеханических приводов металлорежущих станков. Рассмотрены характеристики приводных электродвигателей, методика определения потерь на трение в главных приводах и приводах подач, а также мощности приводного двигателя в приводах станков.

Изложены методы разработки кинематических схем проектируемых приводов при ступенчатом и бесступенчатом регулировании частот вращения. Рассмотрены ступенчатые коробки с нормальной структурой и структурой, отличной от нормальной. Предложена методика кинематического проектирования ступенчатых коробок.

Рассмотрены методы определения зазоров в кинематических парах различных механизмов, расчета мертвого хода в кинематических цепях приводов. Предложены схемы выборки зазоров в кинематических цепях приводов главного движения и подач.

Учебник рассчитан на студентов старших курсов технических вузов и начинающих преподавателей.

УДК 621.9.06-001
ББК 34.5-5

ISBN 978-5-7325-0990-8 © Издательство «Политехника», 2011

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	7
Введение	9
Г л а в а 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	15
1.1. Основные требования, предъявляемые к металлорежущим станкам	—
1.2. Современные тенденции в развитии станкостроения	26
1.3. Электродвигатели станочных приводов	29
1.3.1. Асинхронные электродвигатели	—
1.3.2. Электродвигатели постоянного тока	33
1.4. Коэффициент полезного действия тиристорного электропривода главного движения металлорежущих станков	45
1.5. Расчет потерь на трение в механической системе приводов главного вращательного движения металлорежущих станков	48
1.5.1. Коэффициент полезного действия привода станка	—
1.5.2. Некоторые сведения о смазочных материалах	50
1.5.3. Потери на трение в элементах механических систем приводов	51
Гидродинамические подшипники	62
Гидростатические подшипники	68
1.6. Расчет мощности электроприводов главного движения станков	77
1.7. Характеристики процессов резания металлорежущих станков	84
1.8. Определение мощности двигателя в приводе подач	101
Г л а в а 2. РАЗРАБОТКА КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРИВОДА ПРОЕКТИРУЕМОГО СТАНКА	111
2.1. Основные кинематические зависимости для приводов главного движения и подач	—
2.1.1. Ряды частот вращения (двойных ходов) и подач	—
2.1.2. Параметры стандартизированного геометрического ряда частот вращения	116
2.2. Кинематическое проектирование ступенчатых коробок	118
2.2.1. Аналитический метод проектирования ступенчатых коробок	—
2.2.2. Графоаналитический метод проектирования ступенчатых коробок	123
2.2.3. Ступенчатые коробки с многоскоростными электродвигателями	130
2.2.4. Ступенчатые коробки со сменными зубчатыми колесами	134
2.2.5. Ступенчатые коробки со свободно вращающимися блоками	136
2.3. Ступенчатые коробки с отклоняющейся от нормальной структурой	137
2.3.1. «Потери» ступеней частот вращения	—
2.3.2. Кинематическая увязка регулируемых электродвигателей с механическими групповыми передачами	139
2.3.3. Ступенчатые коробки со связанными колесами	140
2.3.4. Ступенчатые коробки со ступенями возврата	145
2.3.5. Ступенчатые коробки со сложной структурой	147
2.4. Подбор чисел зубьев колес в множительных группах	149
2.5. Порядок кинематического проектирования ступенчатых коробок	152
2.6. Зазоры в приводах металлорежущих станков	156

2.6.1.	Определение зазоров в механических передачах	156
2.6.2.	Определение зазоров в многоступенчатых непланетарных зубчатых редукторах с простыми связями	172
2.6.3.	Зазоры в соединениях деталей приводов с валами	174
2.6.4.	Методика определения мертвого хода кинематической цепи	180
2.6.5.	Влияние зазоров в механической системе приводов металло-режущих станков на формирование их характеристик	183
2.7.	Выборка зазоров в приводах с несамотормозящимися механизмами	185
2.8.	Выборка зазоров в приводах с самотормозящимися механизмами	195
2.8.1.	Самотормозящийся механизм как механическая система с существенно неидеальными связями	—
2.8.2.	Схемы приводов с замкнутыми самотормозящимися механизмами	203
Глава 3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ		209
3.1.	Конструкционные материалы деталей приводов и их механические характеристики	—
3.2.	Основные понятия и положения надежности машин	221
3.2.1.	Понятия и термины надежности	—
3.2.2.	Физика отказов	229
3.2.3.	Закономерности изменения свойств материалов	231
3.3.	Расчеты деталей станочных приводов на прочность при переменных режимах нагрузки	236
3.3.1.	Анализ кривых усталости	—
3.3.2.	Закон суммирования относительных повреждений и коэффициент долговечности	238
3.3.3.	Оценка надежности элементов по усталости	242
Глава 4. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ		247
4.1.	Общие положения. Определения	—
4.2.	Технология изготовления и точность зубчатых колес	251
4.3.	Работоспособность зубчатых передач	262
4.4.	Расчет зубьев на выносливость по контактным напряжениям	271
4.4.1.	Цилиндрические прямозубые передачи	—
4.4.2.	Цилиндрические косозубые и шевронные колеса	274
4.4.3.	Конические зубчатые колеса	275
4.5.	Расчет прочности зубьев передач на изгиб	278
4.5.1.	Цилиндрические прямозубые передачи	—
4.5.2.	Цилиндрические косозубые и шевронные, конические зубчатые передачи	281
4.6.	Расчетная нагрузка	282
4.7.	Допускаемые напряжения	287
4.7.1.	Допускаемые контактные напряжения	—
4.7.2.	Допускаемые напряжения при расчете зубьев на изгиб	—
4.8.	Параметры и конструкции зубчатых передач	298
4.8.1.	Материалы зубчатых колес и термообработка	—
4.8.2.	Конструкции зубчатых колес станочных приводов	301
4.9.	Квазистатические режимы замкнутых зубчатых механизмов	318

Глава 5. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧ	325
5.1. Общие положения. Определения	—
5.2. Технология изготовления и точность червячных передач	332
5.3. Работоспособность червячных передач	340
5.4. Расчет червячных передач на контактную выносливость и заедание	343
5.5. Расчет зубьев червячных колес на выносливость при изгибе	344
5.6. Проверка зубьев на статическую прочность при пиковых нагрузках	345
5.7. Расчетная нагрузка	347
5.8. Допускаемые напряжения	351
5.9. Параметры и конструкции червячных передач	357
5.10. Выборка зазоров в кинематических цепях с червячными передачами	369
5.10.1. Системы с пассивной выборкой зазоров	—
5.10.2. Системы с активной выборкой зазоров	376
Глава 6. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ РЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ	383
6.1. Общие положения. Определения	—
6.2. Передачи плоским ремнем	385
6.3. Передачи клиновыми и узкими клиновыми ремнями	396
6.4. Шкивы плоскоременных и клиноременных передач	404
6.5. Проектирование механизмов с зубчатыми ременными передачами	413
Глава 7. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ РЕЕЧНЫХ ПЕРЕДАЧ	424
7.1. Основные типы реечных передач	425
7.2. Конструкции деталей и параметры реечных передач	428
7.3. Выборка мертвого хода в реечных передачах	435
7.4. Примеры конструкций реечных передач	440
7.5. Расчет реечных передач	447
7.5.1. Кинематический расчет реечных передач	—
7.5.2. Силовой расчет реечных передач	450
7.5.3. Расчет реечных передач на жесткость	451
Глава 8. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧ ВИНТ—ГАЙКА	459
8.1. Общие положения	—
8.2. Механизмы винт—гайка скольжения (МВГС)	461
8.2.1. Силовые и энергетические характеристики	—
8.2.2. Элементы конструкций МВГС	464
8.2.3. Примеры конструкций МВГС	476
8.2.4. Вопросы выборки зазоров в МВГС	486
8.3. Вопросы расчетов МВГС	487
8.4. Механизмы винт-гайка качения	496
8.5. Комбинированные (составные) механизмы	506
Глава 9. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ВАЛОВ И ШПИНДЕЛЕЙ	511
9.1. Общие положения. Определения	—
9.2. Конструктивные элементы прямых валов	513
9.3. Конструктивные элементы шпинделей станков	520
9.4. Опоры шпинделей	528
9.5. Привод шпинделей	541
9.6. Конструкции шпиндельных узлов	545
9.7. Расчеты валов и шпинделей	557
9.7.1. Расчеты на прочность	—
9.7.2. Расчеты валов и шпинделей на жесткость	568

9.8. Изгибные колебания валов и шпинделей	583
9.9. Вопросы крутильных деформаций и крутильных колебаний валов и шпинделей	604
Глава 10. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СТАНОЧНЫХ ОПОР НА ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ	610
10.1. Общие положения	—
10.2. Посадки шарико- и роликоподшипников на валах и в корпусах .	612
10.3. Технические условия на детали, сопрягаемые с подшипниками качения	618
10.4. Закрепление шарико- и роликоподшипников на валах и в корпусах	620
10.5. Установка шарико- и роликоподшипников в опорах валов металлорежущих станков	626
10.6. Опоры валов прямозубых, косозубых и шевронных цилиндрических зубчатых колес	627
10.7. Опоры валов с коническими прямозубыми зубчатыми колесами	630
10.8. Опоры валов червяков	631
10.9. Опоры валов червячных колес	635
10.10. Расчеты подшипников качения	637
10.10.1. Основные определения	—
10.10.2. Формулы для расчета	639
Глава 11. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНЫХ ПРИВОДОВ	653
11.1. Общие положения	—
11.2. Штифтовые соединения	658
11.3. Шпоночные соединения	664
11.4. Шлицевые (зубчатые) соединения	674
Глава 12. КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МУФТ	688
12.1. Общие положения	—
12.2. Жесткие неподвижные муфты	689
12.3. Жесткие компенсирующие муфты	693
12.4. Упругие компенсирующие муфты	707
12.4.1. Общие положения	—
12.4.2. Муфты со стальными упругими элементами	710
12.4.3. Муфты с неметаллическими упругими элементами	716
12.5. Сцепные управляемые механические муфты	726
12.5.1. Зубчатые муфты	—
12.5.2. Фрикционные сцепные муфты	727
12.6. Муфты свободного хода	734
Заключение	740
Список литературы	742

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ,
ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МЕТАЛЛОРЕЖУЩИМ СТАНКАМ

Электромеханический привод технологической машины вообще и металлорежущего станка в частности является основным структурным компонентом машины. По мнению д-ра техн. наук проф. С. И. Артоболевского, саму машину следует рассматривать как комплекс приводов ее исполнительных органов, объединенных системой управления циклом движения машины [6]. Поэтому требования, предъявляемые к станочным приводам, обусловлены соответствующими требованиями, предъявляемыми к современным станкам.

Производительность. Одним из основных требований является обеспечение заданной *экономически обоснованной производительности*. Различают *производительность резания*, которая характеризуется количеством металла, снимаемого с заготовки в единицу времени цикла используемого инструмента, — так называемая объемная производительность Π_V , мм³/мин, определяемая по формуле [118],

$$\Pi_V = V/(T + \tau_{\text{см}}). \quad (1.1)$$

Здесь V — объем припуска, снятого за цикл использования инструмента, мм³; T — стойкость инструмента, мин; $\tau_{\text{см}} = \tau'_{\text{см}} + \tau_{\text{в}}$, где $\tau'_{\text{см}}$ — время смены инструмента, мин; $\tau_{\text{в}}$ — вспомогательное время работы станка, мин.

Критерий (1.1) является удобной характеристикой для станков общего назначения, предназначенных для выполнения черновых операций.

Различают также *производительность формообразования* $\Pi_{\text{ф}}$, которая определяется площадью поверхности, обрабатываемой на станке в единицу времени, мм²/мин. Такая характеристика используется для сравнительной оценки производительности при выполнении отдельных операций.

При измерении стойкости числом изделий $T_{\text{и}}$, обработанных за цикл использования инструмента, производительность $\Pi_{\text{шт}}$, шт./мин, определяется по формуле

$$\Pi_{\text{шт}} = T_{\text{д}}(T_{\text{д}}\tau_{\text{м}} + \tau_{\text{см}}), \quad (1.2)$$

где $\tau_{\text{м}}$ — машинное время обработки одного изделия, мин.

В соответствии с общепринятой в теории резания эмпирически получаемой формулой стойкости инструментов является [10, 42, 128]

$$T = m \sqrt[m]{\frac{318c_v k_v D^{q_v-1}}{nh^{x_v} s_z^{y_v} z^{u_v} b^{r_v}}}, \quad (1.3)$$

где c_v — постоянная величина для определенной группы обрабатываемых материалов; k_v — коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, режущей части инструмента, типа используемой СОТС; D — диаметр заготовки или фрезы, развертки, зенкера, мм; n — частота вращения заготовки или инструмента, об/мин; $s_z = s/(nz)$ — подача, мм/об, мм/зуб; z — число зубьев фрезы; h и b — глубина и ширина резания, мм; $x_v, y_v, r_v, q_v, u_v, m$ — показатели степеней, зависящие от вида обработки, свойств материала режущей части инструмента и условий резания.

Указанные показатели степеней определяются в результате обработки данных экспериментальных исследований резания металлов. Вопросы, связанные с рациональными методами обработки результатов экспериментальных исследований резания металлов, подробно рассмотрены в работе [41]. В табл. 1.1 согласно [118] представлены показатели при величинах, входящих в формулу (1.3), причем знак x указывает, что данный показатель отличен от нуля и выбирается по литературным источникам [10, 42, 128].

Эффективность производства. Современный подход к проектированию технологических процессов механической обработки заключается в повышении эффективности производства относительно критерия \mathcal{E} мультипликативного характера типа [99]:

Т а б л и ц а 1.1

Показатели степеней при величинах, входящих в формулу (1.3)

Вид обработки	h	x_v	y_v	q_v	u_v	r_v
Продольное наружное точение и подрезка торца	h	x	x	0	0	0
Фасонное точение	1	0	x	0	0	0
Строгание	h	x	x	0	0	0
Фрезерование	h	x	x	x	x	x
Сверление	1	0	x	x	0	0
Рассверливание, зенкерование, развертывание	h	x	x	x	0	0

$$\Delta = MQ/K. \quad (1.4)$$

Здесь M — параметр производительности (см. выше), причем в простейших случаях, в частности при составлении вариантов процессов, принимается

$$M = (T_{\text{ш}} - T_{\text{п}})/T_{\text{м}}, \quad (1.5)$$

где $T_{\text{ш}}$ — штучное время; $T_{\text{п}}$ — потери времени на обработку, $T_{\text{п}} = T_1 + T_2$; T_1 — цикловые потери; T_2 — внецикловые потери; $T_{\text{м}}$ — основное (машинное) время; Q — параметр качества обработки [при решении задач, связанных с переходом к автоматизированному изготовлению изделий в серийном и мелкосерийном производствах, параметр Q определяется на основе сравнения параметров качества: $Q_{\text{тp}}$ — требуемого и $Q_{\text{ф}}$ — фактического — по отдельным критериям (точности размеров и формы, шероховатости обрабатываемой поверхности, уровню остаточных напряжений и пр.); в целях дифференциации подхода к критериям используются весовые коэффициенты p_i , которые согласно [99] рекомендуется принимать в пределах 0–1,5:

$$Q = p_{\Sigma} \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (Q_{\text{ф}}/Q_{\text{тp}})_i^{p_i}}, \quad (1.6)$$

где n — число принятых критериев оценки качества; $p_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n p_i$;

K — суммарные капитальные затраты на обработку,

$$K = K_0 + K_{\text{в}} + K_{\text{ш}}, \quad (1.7)$$

где $K_0 = K_{\text{а}}/n$; $K_{\text{а}}$ — капитальные затраты, отнесенные к одному году амортизации; $K_{\text{в}}$ — временные затраты; $K_{\text{ш}}$ — затраты, отнесенные к изготавливаемой детали.

П р и м е ч а н и е. По мере интеграции с зарубежными экономика-ми методы исчисления суммарных капитальных затрат на обработку будут уточняться, а соответствующий опыт — обобщаться.

Снижение себестоимости проектируемого станка при неременном обеспечении качества достигается за счет ряда мероприятий:

а) уменьшения материалоемкости путем применения рационального проектирования базовых корпусных деталей, в которых располагаются приводы, с использованием ЭВМ [55, 89];

б) рационального использования легированных сталей, высокопрочных чугунов, применения неметаллических материалов с высокими износостойчивыми характеристиками, высокоэффективных методов упрочнения;

в) обеспечения технологичности конструкций станков в целом и отдельных деталей и узлов (включая приводы) [43, 89, 133];
г) рационального выбора параметров точности деталей и узлов станка, обеспечивающего требуемые показатели качества [111].

Точность. *Геометрическая и кинематическая точность* применительно к станочным приводам регламентируется в зависимости от степени влияния отклонений в узлах на точность обработки изделий. Наиболее важными в указанном отношении являются шпиндельные узлы, поскольку точность их вращения и расположение осей определяют точность выполнения обрабатываемых поверхностей по таким важнейшим показателям, как биение, некруглость и конусность поверхностей изделий, непараллельность или неперпендикулярность плоскостей и осей поверхностей вращения к базовым поверхностям [45, 111].

Обеспечение точности шпиндельных узлов достигается путем рационального проектирования и применения соответствующих технологий изготовления и сборки. Помимо геометрической точности, рассматриваемой как начальная точность, регламентируется *жесткость шпинделей и опор*. Так, расчетная жесткость шпинделей $c_{\text{шп}}$ прецизионных станков при нагружении их силой посередине и представлении жестких точечных опор должна для обеспечения хорошей работы подшипников быть не менее 500 Н/мм [111].

Технология изготовления шпинделей должна обеспечить отклонения посадочных поверхностей, не превышающие отклонения элементов подшипников. Что касается шпиндельных подшипников, то они выбираются соответствующих классов точности. В частности, для станков высокой точности (класс А) и особо точных (класс С) в передней и задней опорах применяются подшипники класса 2. Для станков высокой точности (класс В) применяются подшипники класса 2 — в передней и класса 4 — в задней опорах.

Рекомендуется выбор оптимального натяга подшипников шпиндельных опор исходя из совокупности требований точности вращения, жесткости и виброустойчивости. В станках, работающих при существенно переменном режиме, применяются подшипники с автоматическим регулированием натяга (например, подшипники фирмы «Timken», США). В прецизионных станках (шлифовальных, внутришлифовальных, токарных), имеющих шпиндельные опоры с подшипниками скольжения, используются многоклиновые гидродинамические подшипники, а также замкнутые гидростатические подшипники и аэростатические опоры. Вопросы проектирования шпиндельных узлов с заданными характеристиками точности рассмотрены в работах [100, 101].

Жесткость является важной характеристикой для приводов подач, поскольку оказывает существенное влияние на плавность и чувствительность медленных перемещений подвижных узлов на направляющих скользящих [21, 32, 146]. В работе [146] показано, что наименьшее возможное перемещение x_1 подвижного узла при ручной установке можно определить по приближенной формуле

$$x_1 \approx 2(1 + \beta_2) \delta F_\infty / c, \quad (1.8)$$

где $\beta_2 \approx 0,87$; δF_∞ — «скачок» силы трения на направляющих при переходе из состояния длительного покоя в состояние движения; c — приведенный коэффициент жесткости привода.

Этой формулой удобно пользоваться для предварительной оценки требуемого значения приведенного коэффициента жесткости $c_{тр}$ по заданному значению допускаемого $[x_1]$:

$$c_{тр} \geq 2(1 + \beta_2) \delta F_\infty / [x_1]. \quad (1.9)$$

Значение регламентированного $[x_1]$, по данным работы [146], принимается для тяжелых станков в пределах 0,005–0,02 мм.

Точность передач зацеплением (цилиндрических, конических, червячных) регламентируется соответствующими государственными стандартами (ГОСТ 1643–81 и ГОСТ 9178–81 — для цилиндрических зубчатых передач и колес; ГОСТ 1758–81 и ГОСТ 9368–81 — для конических зубчатых передач и колес; ГОСТ 3675–81 и ГОСТ 9774–81 — для червячных цилиндрических передач; ГОСТ 10242–81 и ГОСТ 13506–81 — для зубчатых реечных передач). Первый из указанных стандартов в каждом виде передач охватывает передачи с модулем $m \geq 1$ мм, второй — мелкомодульные с $m < 1$ мм. Стандарты регламентируют степени точности, обозначаемые цифрами 3, 4, ..., 12, причем в приводах металлорежущих станков применяются в основном передачи 6, 7, 8-й степеней точности. Для каждой степени точности колес и передач установлены нормы: кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев колес в передаче. Установлены шесть видов сопряжений зубчатых колес в передаче ($m \geq 1$ мм) Н, Е, D, С, В, А и восемь видов допуска на боковой зазор x , y , z , a , b , c , d , h . Сопряжение вида В обеспечивает минимальный боковой зазор, при котором исключается возможность заклинивания стальной передачи от нагрева при разности температур колес и корпуса 25 °С.

Основы расчета точности кинематических цепей металлорежущих станков, вопросы точности и оптимизации кинематических

цепей станков рассмотрены в работах [72, 94]. В соответствии с предложением, представленным в работе [94], кинематические цепи, связывающие конечные звенья со строго согласованными движениями, называются *точностными цепями*. Именно такие цепи характерны для зубообрабатывающих станков, работающих методом обката. В резьбообрабатывающих станках (токарно-винторезных, резьбофрезерных, резьбошлифовальных и червячно-шлифовальных) точностные цепи осуществляют согласование вращения заготовки с поступательным перемещением инструмента или самой детали и настраиваются на шаг или на модуль резьбы на детали [72].

Естественно, для точностных цепей определяющей является кинематическая точность. Для цепей главных приводов, не относящихся к точностным, определяющими являются плавность работы и контакт зубьев в передаче. В настоящем учебном пособии приводы с точностными кинематическими цепями не рассматриваются. При необходимости с особенностями проектирования приводов с точностными цепями можно ознакомиться по специальной литературе [17, 72, 94].

Прочность. Для приводов металлорежущих станков одним из важнейших критериев является прочность деталей. Вместе с тем, как указано в работе [45], в связи с повышенными значениями критериев жесткости и точности разрушения деталей металлорежущих станков вследствие единичных перегрузок или по причине усталости наблюдаются редко.

В приводах металлорежущих станков характер изменения нагрузочно-скоростных режимов связан с закономерностями процессов обработки на определенных типах станков. Многорежимность является характерным признаком универсальных и многооперационных станков. Поэтому для расчета прочности необходимо задавать определенные значения и длительности действия усилий, нагружающих передачи, подшипники и шпиндели. При этом приходится прибегать к определенной схематизации режимов исходя из обобщенного опыта эксплуатации станков различных групп. основополагающие работы в этой области выполнены в ЭНИМСе д-ром техн. наук проф. Д. Н. Решетовым [106, 107, 129, 130] и развиты канд. техн. наук Р. М. Пратусевичем [146].

В станкостроении в основном применяется расчет на прочность, основанный на простейшем (линейном) законе суммирования повреждений (или относительной долговечности), являющийся наиболее удобным и дающий результаты, приемлемые для практики. Учет нерегулярного характера нагруженности в современных методиках расчетов на прочность осуществляется на основе скор-

ректированной линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений, согласно которой условие прочности [58]

$$a_{pi} = n_{ai} / N_{ai}, \quad (1.10)$$

где $a_{pi} = 0,1 \div 1,0$ — скорректированное значение суммы относительной долговечности, соответствующее предельному повреждению на i -м режиме; методика определения a_p представлена в работе [58]; n_{ai} — число циклов повторения амплитуды σ_{ai} напряжения за весь срок службы на i -м режиме; N_{ai} — число циклов по кривой усталости, полученной при регулярном нагружении, соответствующее амплитуде σ_{ai} .

Расчет на прочность по форме сводится к определению *эквивалентной нагрузки*, получаемой умножением максимальной нагрузки на так называемый *коэффициент долговечности*, вычисляемый по формуле

$$k = k_T k_{N,n}, \quad (1.11)$$

где k_T — коэффициент, характеризующий потребный срок службы,

$$k_T = m \sqrt{\frac{60Tn_1}{N_0}}; \quad (1.12)$$

T — общее расчетное время работы, ч; n_1, n_i — частоты вращения соответственно при максимальной нагрузке Q_1 и в i -м режиме Q_i , об/мин; N_0 — число циклов нагружения в минуту, соответствующее излому кривой усталости, при котором достигается предел выносливости; m — показатель степени уравнений кривых усталости в координатах напряжения — число циклов нагружений; $k_{N,n}$ — коэффициент, характеризующий переменность работы вследствие изменения мощности N и частоты вращения n ,

$$k_{N,n} = m \sqrt{\sum_{i=1}^{i_1} \left(\frac{Q_i}{Q_1} \right)^m \frac{n_i}{n_1} \frac{T_i}{T_1}}; \quad (1.13)$$

T_i — время работы в i -м режиме, ч.

Суммированию подлежат члены от 1 до i_1 , соответствующие нагрузкам $Q_i > kQ_1 = Q_0$, где Q_1 — максимальная нагрузка; Q_0 — предельная нагрузка, еще не вызывающая повреждения материала, деленная на коэффициент безопасности.

Приближенное значение коэффициента $k_{N,n}$ определяется по формуле

$$k_{N,n} = k_N k_n, \quad (1.14)$$

где k_N — коэффициент, учитывающий переменность потребляемой мощности; k_n — коэффициент, учитывающий различные нагрузочно-скоростные режимы (работа с частотами n_i и нагрузками Q_i , $i = 1, 2, \dots$, при принятой схеме распределения времени работы на всех ступенях частот вращения).

По данным работы [107] для широкоуниверсальных станков в предположении треугольного распределения времени работы по эффективной мощности коэффициент k_N определяется по формуле

$$k_N = m\sqrt{2/[(m+1)(m+2)]}. \quad (1.15)$$

При расчете контактной прочности $m = 3$ и $k_N = 0,46$; при расчете на изгиб $m = 9$ и $k_N = 0,64$.

Для первых элементов цепи привода при треугольном законе распределения времени на всем диапазоне мощности от αN (мощности холостого хода) до N

$$k_N = m\sqrt{\frac{2}{(1-\alpha)^2} \left[\frac{1-\alpha^{m-1}}{m+1} - \frac{1-\alpha^{m+2}}{m+2} \right]}. \quad (1.16)$$

При $\alpha = 0,2$ для расчета контактной прочности $k_N = 0,54$, для расчета на изгиб $k_N = 0,68$.

Для станков общего назначения в предположении равномерно распределения времени работы при каждом значении эффективной мощности в диапазоне $0 - N$

$$k_N = m\sqrt{1/(m+1)}, \quad (1.17)$$

причем для расчета поверхностных слоев $k_N = 0,63$, для расчета на изгиб $k_N = 0,78$.

Для первых элементов цепи привода в предположении равномерного распределения времени работы при каждом значении эффективной мощности в диапазоне $\alpha N - N$

$$k_N = m\sqrt{(1-\alpha^{m+1})/[(m+1)(1-\alpha)]}. \quad (1.18)$$

При $\alpha = 0,2$ для расчета контактной прочности $k_N = 0,68$, а на изгиб $k_N = 0,8$.

Значения коэффициента k_n для ступенчатых коробок скоростей в зависимости от полного числа ступеней z и числа ступеней, на которых работа производится с постоянным моментом, представлены в работах [102, 106, 129, 130]* в виде таблиц и графиков. В регулируемых приводах с двигателями постоянного тока

* См. ниже в разделах, посвященных расчетам зубчатых и червячных передач.

используется, как правило, двухзонное регулирование: 1) изменением напряжения якоря с постоянным вращающим моментом — изменением до номинальной частоты; 2) ослаблением магнитного потока — при постоянной мощности — от $n_{\text{ном}}$ до n_{max} . В универсальных станках полная мощность, как правило, используется начиная с некоторого значения частоты вращения шпинделя. В среднем можно считать, что полная мощность используется начиная с первой ступени второй снизу четверти полного диапазона регулирования частот вращения шпинделя.

Расчетная нагрузка элементов привода корректируется введением коэффициента k_0 , учитывающего перегрузки, динамичность и неравномерность распределения нагрузки (для зубчатых и червячных передач),

$$k_0 = k_{\text{пер}} k_{\text{д}} k_{\text{нер}}, \quad (1.19)$$

где $k_{\text{пер}} = 1, 0 \div 1, 3$ — коэффициент перегрузки, принимаемый для станков непрерывного резания $k_{\text{пер}} > 1$ только в случаях, когда перегрузка является систематической; $k_{\text{д}}$ — коэффициент динамичности, отображающий динамические нагрузки, обусловленные наличием ошибок в зацеплении передач; $k_{\text{нер}}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки по контактным линиям (для передач).

Представленные выше положения относятся к *усталостному разрушению* деталей приводов металлорежущих станков и к соответствующему расчету на ограниченную долговечность. Отметим, что усталостные разрушения характерны для деталей приводов (зубчатых передач, валов и пр.) в металлорежущих станках с повышенной динамической нагрузкой, обусловленной неравномерным или прерывистым резанием (фрезерных, строгальных, долбежных).

К другим видам разрушений деталей приводов относятся: *пластическая деформация* при перегрузках деталей из вязких материалов; *хрупкое разрушение* деталей при большой остаточной напряженности или концентрации напряжений; *ползучесть* — малая непрерывная пластическая деформация при длительном нагружении (в станках свойственна деталям из неметаллических материалов). Современные методы оценки прочности при любых видах разрушений изложены в капитальных работах [58, 122].

Надежность. Надежность — это свойство объекта (в рассматриваемом случае — металлорежущего станка) сохранять во времени в установленных пределах все параметры, обеспечивающие выполнение требуемых функций в заданных условиях [110, 112, 141]. Требуемые функции включают производительность, точность размеров и формы производимых изделий и шероховатость обра-

батываемых поверхностей. Надежность характеризуется следующими основными состояниями и событиями.

Работоспособность — состояние объекта (станка), при котором он способен нормально выполнять функции механической обработки изделий с параметрами, установленными рабочими чертежами и техническими условиями.

Долговечность — свойство объекта (станка) сохранять работоспособность до перехода в предельное состояние с возможными перерывами для технического обслуживания и ремонтов.

Под предельным состоянием понимается состояние объекта, при достижении которого его дальнейшее применение по назначению недопустимо или невозможно.

Безотказность — свойство объекта (станка) сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки (продолжительности или объема работы).

Исправность — состояние объекта (станка), при котором он удовлетворяет всем требованиям нормативно-технической документации (НТД). Исправный объект обязательно должен быть работоспособен.

Неисправность — состояние объекта (станка), при котором он не удовлетворяет хотя бы одному из требований НТД.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

Причины отказов, их классификация и модели рассмотрены с необходимой полнотой применительно к различным машинам, включая металлорежущие станки, в специальной технической литературе [95, 96, 110]. Отказы в станках вызваны в основном износом деталей, усталостью и старением. Это относится как к деталям приводов, так и к несущим системам. В надежности технологических процессов решающее значение имеют отказы инструмента и расстройка станка, например вследствие тепловых деформаций [150].

Надежность механизмов и узлов металлорежущих станков рассматривается в связи с возникновением внезапных отказов вследствие усталостных разрушений и заедания, а также в связи с монотонным понижением работоспособности, что обусловлено износом фрикционных узлов, старением и коррозией [113]. Поскольку прочность редко является лимитирующим фактором в станках, то отказы, связанные с поломкой деталей приводов, наблюдаются только в станках, работающих с большими длительно действующими нагрузками (преимущественно в специализированных станках). Такого рода отказы возникают в приводах при существенном динамическом характере сил резания [92].

Поскольку, как указывалось выше, в металлорежущих станках преимущественное распространение имеют электромеханические приводы с соответствующими системами управления, большое значение в оценке надежности привода и станка в целом имеет надежность системы управления. В работе [114] изложены инженерная методика проектирования надежных систем управления электроприводами, эффективные методы обеспечения надежности, а также вопросы оптимизации уровня надежности таких систем.

Хотя проблема обеспечения надежности электромеханических приводов станков, безусловно, является актуальной, особенно для автоматизированных станков (включая станки с ЧПУ), подробное ее изложение не входит в задачу настоящего учебника. При необходимости выполнения анализа и соответствующих расчетов можно обратиться к специальной технической литературе [95, 96, 110, 112, 114, 141, 150].

Виброустойчивость. Термин «виброустойчивость» часто применяется в литературе по станковедению, хотя и не имеет четкого определения. Металлорежущие станки относятся к *виброактивным системам*, склонным к возникновению механических колебаний различных видов. Отметим, что термины «вибрация» и «механические колебания» применяются в технической литературе почти как синонимы, хотя и с некоторыми нюансами [33]. В металлорежущих станках при определенных условиях могут возникать колебательные процессы всех видов: *свободные колебания, параметрические колебания, автоколебания (самовозбуждающиеся колебания)*. По своему воздействию на характеристики качества механической обработки наибольшее влияние оказывают интенсивные вынужденные колебания и автоколебания [22, 32, а—д, 68].

Расчеты вынужденных колебаний в приводах станков — один из важных этапов при проектировании станков. Определение спектра собственных частот изгибных колебаний валов и шпинделей, крутильных колебаний передаточных механизмов в целях исключения опасных резонансных режимов является составной частью расчетов приводов на виброустойчивость.

Металлорежущие станки относятся к потенциально автоколебательным системам. Известно, что при некоторых режимах обработки резанием при данных структуре и параметрах технологической системы нарушаются условия устойчивости процесса резания [32, а—д, 49, 54, 56, 68, 87, 147]. Рассмотрение технологической системы механической обработки как *замкнутой динамической системы* было впервые осуществлено в работах д-ра техн. наук проф. В. А. Кудинова и коллектива сотрудников ЭНИМСа

под его руководством [56, 68, 87]. Исследованию автоколебаний и разработке практических методов расчета устойчивости процессов резания посвящены работы инженера М. Е. Эльясберга, обобщенные в его монографии [147]. В указанной книге была выдвинута идея расширения технологических возможностей станков за счет управления автоколебательным процессом за границей области устойчивости. Некоторые подходы к решению этой проблемы изложены в работе [30].

Строго обоснованные нормы по виброустойчивости отдельных узлов приводов, например исполнительных механизмов, не разработаны. Однако известны значения собственных частот исполнительных механизмов различных станков, выпускавшихся серийно в доперестроечный период, в частности тяжелых станков с ЧПУ, автоматических копировальных станков, специальных расточных агрегатов, многоцелевых станков, выпускавшихся Ленинградским станкостроительным производственным объединением (ЛСПО) по проектам Особого конструкторского бюро станкостроения (ОКБС) [11, 145]. Данные по динамическим характеристикам различных станков приводятся (хотя и недостаточно широко) в работах [56, 68, 134] и др. Весьма плодотворна идея так называемой *динамической паспортизации* металлорежущих станков, основанная на разработанных в ЭНИМСе под руководством В. А. Кудинова методах испытаний станков на виброустойчивость при резании [56, 68]. В этом отношении важными характеристиками являются своеобразные *карты устойчивости*, построенные по методике М. Е. Эльясберга [147] в плоскости параметров ширина срезаемого слоя (b_c) — скорость резания (v_s) с нанесением границы области устойчивости технологической системы. Расчеты на виброустойчивость применительно к станочным приводам будут кратко рассмотрены в настоящем учебнике. Более подробно эти вопросы изложены в работе [32, а—д].

1.2. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ СТАНКОСТРОЕНИЯ

Тенденции отечественного станкостроения в доперестроечный период (до 1985 г.) в основном соответствовали мировым, хотя и проявлялись с известным замедлением в силу причин, кратко изложенных во введении к нашему учебнику. В условиях формирования экономики с рыночными отношениями, естественно, тенденции развития должны соответствовать мировым.

Автоматизация технологических процессов в машиностроении, создание и широкое внедрение в промышленность станков с ЧПУ

привели к изменению таких характеристик, как мощность и быстроходность приводов, виброустойчивость, надежность и пр. В соответствии с данными работы [116] требования к электроприводам главного движения и подачи в значительной мере ужесточились (табл. 1.2).

Однако в практике станкостроения известны отклонения от указанных в табл. 1.2 значений параметров:

а) повышение быстроходности: современные станки для обработки цветных сплавов обеспечивают скорости резания при фрезеровании до 10 000 м/мин; частоты вращения шпиндельных головок внутришлифовальных станков достигают 100 000 об/мин;

б) повышение мощности приводов станков как за счет увеличения скорости резания, так и за счет увеличения сечения снимаемой стружки: до 500–800 кВт в одном приводе станки модели ГФ786 фирмы «Ингерсол» для обработки слитков.

Развитие станкостроения характеризуется широким внедрением систем бесступенчатого регулирования скоростей резания и подачи. Повышение производительности и точности металлорежущих станков достигается за счет автоматизации управления, путем создания и расширяющегося внедрения станков с программным управлением. Повышение точности перемещения и стабильности позиционирования рабочих органов станков обеспечивается снижением сил трения в направляющих подвижных узлов, увеличением жесткости приводов и несущих систем, устранением зазоров в кинематических цепях приводов [54, 68, 99, 103, 145].

Т а б л и ц а 1.2

Требования к станочным приводам главного движения и подачи

Параметр	Привод		
	главного движения	подачи	
Диапазон частот вращения, об/мин	До 1:1000	До 1:30 000	
Диапазон мощностей, кВт	2–300	0,05–11	
Закон регулирования при изменении частоты вращения	Постоянство мощности и момента	Постоянство момента	
Погрешность частоты вращения относительно установленной, %:	n	2	2
	$0,1n$	5	10
	$0,01n$	15	15
	$0,001n$	30	25
	$0,0001n$	–	35

В настоящее время в станкостроении наиболее широкое применение имеют электромеханические приводы с двигателями постоянного тока (ДПТ), питание которых осуществляется от транзисторных и тиристорных преобразователей (ТП). Такие приводы удовлетворяют по всем показателям указанным выше требованиям. Как отмечено в работе [3], анализ станков, представленных на ряде Международных станкостроительных выставок, показал, что уже к концу 1970-х гг. многооперационные (многоцелевые) станки оснащались более чем на 80 % регулируемые тиристорными электроприводами с ДПТ.

Однако за рубежом уже начиная с 1980-х гг. проводятся интенсивные работы по созданию регулируемых электроприводов с использованием новейшей элементной базы, которые по многим параметрам превосходят электроприводы с ДПТ [79]. К ним относятся электроприводы с двигателями переменного тока: асинхронными (АД) с короткозамкнутым ротором и синхронные (СД) с использованием сверхбольших интегральных схем (СБИС).

В соответствии с современными тенденциями и основанными на них прогнозами отмечены три фактора, которые будут определять развитие электроприводов в ближайшие годы [79, 152, 154]:

- разработка новых силовых приборов и создание на их основе новейших преобразовательных схем;

- создание новых электродвигателей, приспособленных для совместной работы с разработанными силовыми устройствами;

- широкое использование в новейших схемах микроэлектроники и микропроцессорной (МП) техники.

По данным работы [79], новейшие полупроводниковые приборы для использования их в перспективных электроприводах разрабатывают известные зарубежные фирмы в Японии («Toshiba»), США («General Electric»), Германии («Siemens», AEG, BBC), Англии (SSD).

Естественно, реализация возможностей современных электроприводов требует осуществления ряда мероприятий по повышению статической жесткости и виброустойчивости станков. Разрабатываются и реализуются эффективные методы конструирования основных узлов и компоновок станков [1, 37, 103]. Достаточно четко проявляется стремление к более полному использованию станков (особенно дорогостоящих, тяжелых и уникальных).

Для современного производства характерно развитие комплексного подхода к планированию и координации всего производственного процесса на основе широкого применения ЭВМ [89]. Поскольку, как показывают исследования, продолжительность жизни продукции машиностроения сокращается, то интервалы вре-