

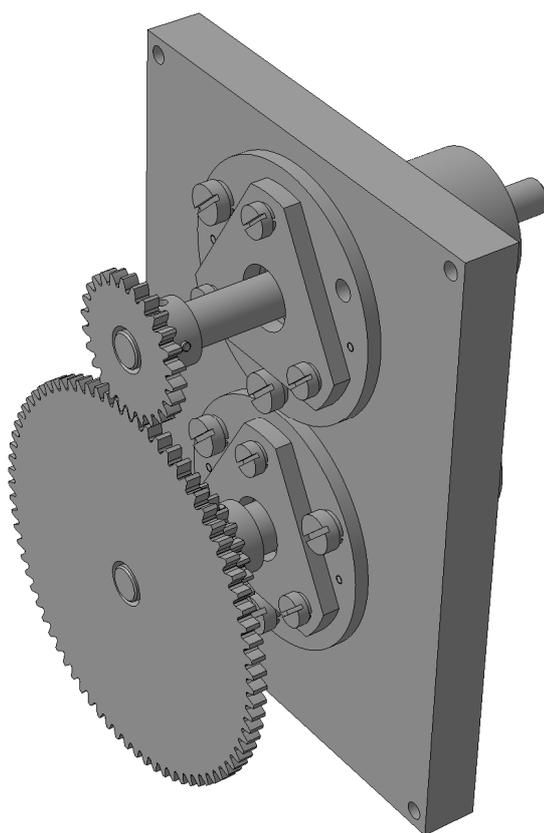
**Б.П. Тимофеев, М.В. Абрамчук, Д.С. Смирнов**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ  
СТАНДАРТОВ (ИСО) ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ТОЧНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ  
ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ**



Кафедра Мехатроники

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**



**Санкт-Петербург**

**2012**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**Б.П. Тимофеев, М.В. Абрамчук, Д.С. Смирнов**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ  
СТАНДАРТОВ (ИСО) ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ТОЧНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ  
МЕХАНИЗМОВ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург**

**2012**

УДК 621.833.15

Б.П. Тимофеев, М.В. Абрамчук, Д.С. Смирнов Использование международных стандартов (ИСО) для повышения точности отечественных передаточных механизмов. Учебное пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 92 с.

Учебное пособие посвящено проблемам проектирования, изготовления и эксплуатации зубчатых передаточных механизмов в ходе международного сотрудничества, которое будет существенно расширяться вследствие вступления РФ в ВТО. Рассматривается нормативно-техническая документация в области точности зубчатых колёс и передач, проводятся сравнения стандартов ISO и базовых ГОСТ РФ. Сравнительный анализ требований приводит к формулированию предложений по структуре и содержанию новых отечественных стандартов, очищенных от недостатков действующих документов и не противоречащих рекомендациям ISO. Овладение специалистами материалом пособия послужит повышению конкурентоспособности продукции отечественных производителей в области передаточных механизмов.

Предназначено для студентов кафедры «Мехатроника», обучающихся по направлениям подготовки 221000 «Мехатроника и робототехника», 200100 «Приборостроение» и специальности 220401 – «Мехатроника» при изучении курса «Точность механизмов и систем», а также обучающихся в магистратуре кафедры «Мехатроника» и в аспирантуре по специальности 05.02.18 «Теория механизмов и машин» и 05.02.02 «Машиноведение, системы приводов и детали машин».

Рекомендовано к печати Ученым Советом факультета ТМиТ, протокол № 5 от 19.06.2012 г.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012  
© Б.П. Тимофеев, М.В. Абрамчук, Д.С. Смирнов, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие непосредственно связано со вступлением нашей страны в ВТО. Необходимо отметить, что международное сотрудничество в области проектирования, конструирования, изготовления и эксплуатации машин и приборов на уровне международной кооперации стало уже правилом. Особенно широко в нашем машино и приборостроении используются передаточные механизмы. Имеются очень существенные различия в вопросах стандартизации геометрических параметров. Так в США вместо понятия «модуль» используется понятие «питч» (pitch). Причём, если у нас модуль есть некая единая стандартная величина, в «масштабе» которой строится зубчатое колесо, то за рубежом различают окружной и диаметральный питчи, что позволяет иметь огромное разнообразие свойств зубчатых механизмов. Ещё более отличается подход к вопросам точности и взаимозаменяемости элементов зубчатого механизма. И здесь важно то обстоятельство, что зубчатое колесо является деталью наиболее общего вида, и наработанные в области его точности приёмы являются наиболее общими по отношению к более простым деталям. Важнейшим различием является также подход к выбору объекта взаимозаменяемости: отдельно взятое колесо, зубчатая пара или зубчатая передача. Выбор объекта взаимозаменяемости безусловно связан с уровнем точности производства.

Ранее речь велась о рекомендациях ISO и их учёте в отечественных стандартах. Но дело состоит в том, что базовый стандарт «ГОСТ 1643–81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» [1] не перерабатывался уже 30 лет и конечно ни в коем случае не учитывает прогресса в области производства передач, редукторов и мультипликаторов, произошедшего в течение последних десятилетий. Ранее этот стандарт пересматривался каждые 10–15 лет – ГОСТ 1643–56, ГОСТ 1643–72, ГОСТ 1643–81. Однако и прежние редакции базового стандарта вызывали существенную критику, в частности, и авторов настоящего пособия [2]. Стандарт «ГОСТ 21098–82. Цепи кинематические. Методы расчета точности» [3] во многом противоречит ГОСТ 1643–81, причём, и тот и другой во многом, в свою очередь, противоречат ЕСКД.

Итак, мы имеем сейчас устаревшие, противоречивые стандарты, которые сдерживают далеко не только международное сотрудничество и торговлю, но и производство конкурентоспособных передач в нашей стране.

Читатель может из предыдущего сделать вывод, что уровень нашей нормативно-технической документации существенно и во всем отстает от международного. Это не так. Например, содержащееся в ГОСТ 1643-81 положение о разделении норм точности на 4 группы позволяет учесть условия работы той или иной передачи с высокой полнотой. Однако это разделение никоим образом не учтено в рекомендациях ISO. Настоящее пособие как раз и направлено на то, чтобы учитывать специфику работы тех или иных передач, не входя в противоречие с нормами ISO.

Ещё один важнейший отличительный признак рекомендаций ISO – это то, что они вовсе не являются неким международным стандартом, а содержат

нормы и правила, которым не должны противоречить стандарты отдельных стран. Но кроме стандартов стран, имеются документы, которые у нас назывались – ОСТ, то есть, стандартами отдельных отраслей. Например, в США, это – ASME (американское общество инженеров-механиков) [4]. И далее – существуют аналоги наших СТП (стандартов предприятий). Итак, существует некоторая цепочка (вертикаль стандартизации), а именно: ISO, далее (выражаясь привычными нам терминами), – ГОСТ, далее – ОСТ и СТП. При этом нижестоящие стандарты не должны копировать вышестоящие, главное, чтобы они им не противоречили по основным положениям.

Можно спорить о том, кому и как возродить уровень проектирования, конструирования и производства зубчатых передач, однако, гораздо продуктивнее именно в пределах НИУ ИТМО, всегда занимавшемся вопросами производства, а особенно метрологическими аспектами точных зубчатых механизмов, воспитывать специалистов, готовых к происходящим в стране и мире переменам в области международной кооперации, производства и торговли.

В приложении приведен перевод некоторых положений рекомендаций «ISO 1328. Cylindrical gears - ISO system of accuracy» [5, 6], а также ISO/TR 10064-2:1996, выполненный авторами данного пособия. Это необходимо для понимания многих разделов пособия, ибо упомянутые рекомендации ISO не были переведены и опубликованы в РФ [7, 8]. Одновременно следует сказать, что сотрудники кафедры Мехатроники НИУ ИТМО планомерно ведут работу в данной области. Достаточно сослаться, например, на опубликованную в 2010 году статью в журнале «Стандарты и качество» [9] и доклад на конференции, посвящённой столетию со дня рождения В.Н. Кудрявцева [10].

Настоящее пособие предназначено для использования студентами кафедры «Мехатроника» при изучении курса «Точность механизмов», студентами, обучающимися по направлению «Приборостроение» при изучении курса «Точность приборов и систем», а также обучающимися в магистратуре кафедр «Мехатроника» и «Измерительных технологий и компьютерной томографии» и в аспирантуре по специальности 05.02.18 «Теория механизмов и машин» и 05.02.02 «Машиноведение, детали машин».

Особую ценность пособие представляет для студентов 4-го курса, выполняющих курсовую работу по упомянутым предметам.

Необходимость в таком пособии вызвана устарелостью отечественной нормативной научно-технической документации и её несоответствиям современным рекомендациям ISO с одной стороны, стремление нашей страны к вступлению в ВТО и необходимость повысить конкурентноспособность нашей продукции и наших инженеров в этой области на международной арене – с другой.

Поэтому пособие содержит прежде всего перевод рекомендаций ISO (переведено на русский язык и печатается в нашей стране впервые), а далее рекомендации по отнесению зубчатого колеса, зубчатой пары, зубчатой передачи или многозвенного передаточного механизма к той или иной степени точности согласно ISO по заданному набору показателей точности

(комплексных или поэлементных). Пособие содержит таблицы, позволяющие соотносить показатели точности в той или иной степени по отечественным стандартам с показателями ISO. Следует учесть, что сам набор показателей у нас и в ISO различен. Таким образом появляется возможность отнесения продукции к таким группам по точностным показателям, которые сопоставимы с международно принятыми и понятны зарубежным партнерам. Необходимость в приобретении сведений по классификации отечественной продукции в понятиях ISO для современного инженера несомненна. Тот факт, что у нас как в ISO установлены 12 степеней точности для зубчатых колёс и передач приводит к серьёзной путанице, ибо зубчатое колесо 5-й степени по нашим стандартам, по ISO может по некоторым показателям относиться к 4-й, а по другим – аж к 7-й. Это обстоятельство усугубляется при переходе от отдельно взятых колёс к передачам и многозвенным механизмам.

Активное включение отечественных производителей в мировой процесс породило массу подобных проблем, например, в стандартизации подшипников, где, кроме отечественных, широко используются подшипники фирм FAG, SKF, Timken. Маркировка материалов, в частности, сталей тем и сложна, что за внешне похожим наименованием скрываются сильно отличающиеся по свойствам и составу материалы. Однако в этих отраслях имеются многочисленные каталоги аналогичных по размерам (маркировке) изделий. Здесь же предлагается первый опыт сравнительной характеристики передаточных механизмов и их элементов на основе рекомендаций ISO. По нашему мнению распространение этого опыта назрело, прежде всего, в таких дисциплинах как «Материаловедение», «Детали приборов и основы конструирования», «Основы взаимозаменяемости и сертификация продукции» и т.д. После вступления страны в ВТО упомянутые знания позволят выпускникам нашего университета быть конкурентноспособными при международной кооперации производства.

Настоящее издание предусматривает ревизию следующих стандартов:

1. ГОСТ 1643–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски» в части установления допусков и предельных отклонений для зубчатых колёс согласно установившейся в стране практике;
2. ГОСТ 21098–82 «Цепи кинематические. Методы расчета точности» в части расчетного установления параметров точности зубчатых передач и передач винт-гайка;
3. ГОСТ 1758–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые конические и гипоидные. Допуски»;
4. ГОСТ 3675–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи червячные цилиндрические. Допуски»;
5. ГОСТ 10242–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые реечные. Допуски».
6. Для параметров точности аналогичных мелко модульных ГОСТов:
  - 6.1. ГОСТ 9178–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические мелко модульные. Допуски».

- 6.2.ГОСТ 9368–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые конические мелко модульные. Допуски»;
- 6.3.ГОСТ 13506–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые реечные мелко модульные. Допуски»;
- 6.4.ГОСТ 9774–81 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи червячные цилиндрические мелко модульные. Допуски»;
- 7. Предусмотрены рекомендации для внесения изменений в ISO 1328.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СТАНДАРТА ГОСТ 1643-81

ГОСТ 1643-81 распространяется на эвольвентные цилиндрические зубчатые колёса и зубчатые передачи внешнего и внутреннего зацепления с прямозубыми, косозубыми и шевронными зубчатыми колёсами с делительным диаметром до 6300 мм, шириной зубчатого венца или полушеврона до 1250 мм, модулем зубьев от 1 до 55 мм [1, с. 1].

ГОСТ 1643-81 устанавливает 12 степеней точности зубчатых колёс и передач, обозначаемых в порядке убывания точности цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12. Для степеней точности 1 и 2 допуски и предельные отклонения не даются. Эти степени предусмотрены для будущего развития. Для каждой степени точности зубчатых колёс и передач устанавливаются нормы: кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев зубчатых колёс в передаче. Нормы точности стандарта ГОСТ 1643-81 включают в себя поэлементные показатели (объединённые в комплексы) и комплексные показатели точности зубчатых колёс и передач [11, с. 326].

Напомним, что **нормы кинематической точности** регламентируют наибольшую погрешность функции положения, т.е. погрешность угла поворота для зубчатого колеса – в пределах его оборота, для передачи – за полный цикл изменения относительного положения зубчатых колес пары (для реечных передач – при перемещении рейки на заданную длину). Значение и характер кинематических погрешностей являются определяющими для зубчатых передач точных кинематических целей, отсчетных и делительных механизмов и планетарных передач с несколькими сателлитами. Государственные стандарты не регламентируют амплитуды гармонических составляющих различных частот, а также сдвиги фаз этих составляющих, оставляя такую возможность отраслевым стандартам, которые могут учесть конкретную технологию изготовления и эксплуатационные требования к передачам в отрасли.

**Нормы плавности работы** регламентируют (косвенно) циклические погрешности – составляющие полной погрешности угла поворота зубчатого колеса, многократно повторяющиеся за один оборот колеса. Такие погрешности наиболее важны для точных отсчетных и делительных устройств, высокоскоростных передач, механизмов, обеспечивающих высокую плавность перемещения.

Вопреки распространенному в технической литературе мнению, нормы кинематической точности и плавности работы не регламентируют погрешность передаточного отношения, а представляют собой лишь исходные данные для ее ориентировочного расчета. Точный расчет погрешности передаточного отношения [12-16] связан с регламентацией не только амплитуд и частот гармонических составляющих кинематической погрешности, но и сдвига начальных фаз этих составляющих.

**Нормы контакта зубьев** определяют полноту прилегания рабочих поверхностей зубьев сопряженных колес в передаче, что наиболее существенно для тяжело нагруженных передач. Для передач точных приборов, как правило, мало нагруженных, полнота прилегания рабочих поверхностей зубьев не

является существенной. Ввиду малой ширины венцов зубчатых колес такой показатель, как суммарное пятно контакта, практически в точном приборостроении не применяется.

Из сказанного ясно, что передачи, для которых все три вида норм точности следует выдерживать с одинаковой степенью точности, редки. В связи с этим, в зависимости от конкретных эксплуатационных требований к передаче, стандартами разрешается комбинирование норм кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев из различных степеней точности. При комбинировании норм разных степеней точности нормы плавности работы зубчатых колес и передач могут быть не более чем на две степени точнее или на одну степень грубее норм кинематической точности. Нормы контакта зубьев могут назначаться по любым степеням, более точным, чем нормы плавности работы зубчатых колес и передач, а также на одну степень грубее норм плавности [1, с. 2].

Нормы кинематической точности, кроме  $F_r$  (допуск на радиальное биение зубчатого венца),  $F_{vw}$  (допуск на колебание длины общей нормали),  $F''_i$  (допуск на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого венца), нормы плавности работы, кроме  $f''_i$  (допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе), и нормы контакта зубьев в передаче, кроме  $f_x$  (допуск параллельности осей) и  $f_y$  (допуск на перекос осей), в зависимости от условия работы зубчатых колес по правым и левым профилям допускается назначать из разных степеней точности. Для нерабочих боковых поверхностей зубьев или поверхностей, используемых ограниченное время при пониженных нагрузках, допускается снижение точности, но не более чем на две ступени [1, с. 8].

Следует сказать, что нормы кинематической точности, нормы плавности и нормы контакта (сюда же относятся и нормы бокового зазора) не являются независимыми показателями. Нет ни одной нормы, которая не влияла бы в той или иной степени на тот или иной эксплуатационный показатель – будь то шум, износостойкость, виброактивность и т.д. Однако три нормы, да к тому же возможно различные, установлены обоснованно: они свидетельствуют о преимущественном влиянии точностного (функционального) показателя на эксплуатационный.

Высокая кинематическая точность нужна, прежде всего, отсчетным передачам, высокая плавность – высокоскоростным и силовым для уменьшения вредного влияния динамики, большое суммарное пятно контакта – силовым, тяжело нагруженным передачам. Наличие трех норм, тесно взаимосвязанных, позволяет полнее учесть эксплуатационные характеристики зубчатых передач.

Показатели плавности работы зубьев и показатели контакта [1, с. 6–7] в ГОСТ 1643-81 устанавливаются в зависимости от граничных значений номинального коэффициента осевого перекрытия.

Напомним, что коэффициент перекрытия  $\varepsilon_\gamma$  зубчатой передачи рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\beta, \quad (1.1)$$

где  $\varepsilon_\alpha$  – коэффициент торцового перекрытия,  $\varepsilon_\beta$  – коэффициент осевого перекрытия.

Коэффициент торцового перекрытия определяется по формуле:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{z_1 \operatorname{tg} \alpha_{a1} + z_2 \operatorname{tg} \alpha_{a2} - (z_1 + z_2) \operatorname{tg} \alpha_{tw}}{2\pi}, \quad (1.2)$$

где  $z_1, z_2$  – числа зубьев соответственно шестерни и колеса;  $\alpha_{a1}, \alpha_{a2}$  – углы профиля зуба в точке на окружности вершин соответственно шестерни и колеса;  $\alpha_{tw}$  – угол зацепления.

Коэффициент осевого перекрытия рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_\beta = \frac{b_w}{p_x}, \quad (1.3)$$

где  $b_w$  – рабочая ширина венца;  $p_x$  – осевой шаг [17–19]. У прямозубых зубчатых колёс  $\varepsilon_\beta = 0$ .

Боковой зазор нормируется следующим образом. Для передач с модулем  $m \geq 1$  мм стандартом ГОСТ 1643-81 установлены шесть видов сопряжения: А, В, С, D, E, H и восемь видов допуска  $T_{jn}$  на боковой зазор: x, y, z, a, b, c, d, h. Видам сопряжения H и E соответствует вид допуска на боковой зазор h; а видам сопряжения D, C, B и A – виды допуска d, c, b, и a соответственно. Соответствие между видом сопряжения колес и видом допуска на боковой зазор допускается менять. При этом также могут быть использованы виды допусков x, y, z, которые не связаны с определенным видом сопряжения, т.е. предусматривается возможное увеличение величины допуска  $T_{jn}$ .

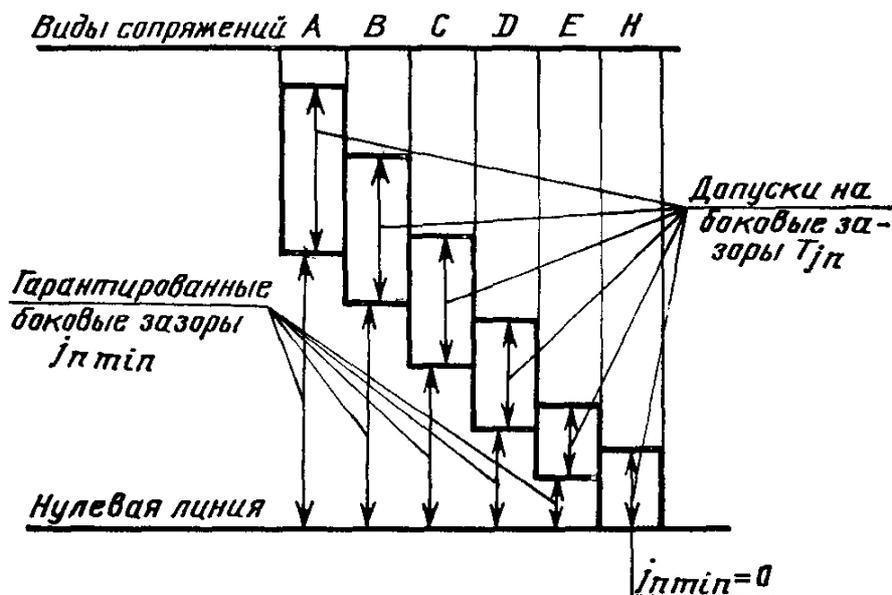


Рис. 1.1 Виды сопряжений и гарантированные боковые зазоры.

Устанавливаются 6 классов отклонений межосевого расстояния (по сути неподвижного звена передачи), обозначаемых в порядке убывания точности римскими цифрами от I до VI.

Гарантированный боковой зазор  $j_{n \min}$  в каждом сопряжении обеспечивается при соблюдении предусмотренных классов отклонений межосевого расстояния (для сопряжений Н и Е – II класса, а для сопряжений D, С, В и А – классов III, IV, V, и VI соответственно). Допускается изменять соответствие между видом сопряжения и классом отклонения межосевого расстояния.

Точность изготовления зубчатых колес и передач задается степенью точности, а требования к боковому зазору – видом сопряжения по нормам бокового зазора.

Имеем обозначение следующей зубчатой передачи: 7 – С ГОСТ 1643-81. Это передача со степенью точности 7 по всем трем нормам точности, с видом сопряжения зубчатых колес С и соответствием между видом сопряжения и видом допуска на боковой зазор, а также между видом сопряжения и классом отклонений межосевого расстояния.

При комбинировании норм различных степеней точности и изменении соответствия между видом сопряжения и видом допуска на боковой зазор, но при сохранении соответствия между видом сопряжения и классом отклонений межосевого расстояния, точность зубчатых колес и передач обозначается последовательным написанием трех цифр и двух букв. Первая цифра обозначает степень по нормам кинематической точности, вторая – степень по нормам плавности работы, третья – по нормам контакта зубьев. Первая из букв обозначает вид сопряжения, вторая – вид допуска на боковой зазор.

Условное обозначение точности цилиндрической передачи со степенью 8 по нормам кинематической точности, со степенью 7 по нормам плавности, со степенью 6 по нормам контакта зубьев, с видом сопряжения В, видом допуска на боковой зазор а и соответствием между видом сопряжения и классом отклонений межосевого расстояния имеет следующий вид:

$$8 - 7 - 6 - Va \text{ ГОСТ } 1643 - 81.$$

При выборе более грубого класса отклонений межосевого расстояния, чем это предусмотрено для данного вида сопряжения, гарантированный боковой зазор уменьшается и, наоборот, увеличивается при выборе более точного класса отклонений межосевого расстояния [20, с. 131]. В условном обозначении точности цилиндрической передачи указывается принятый класс и рассчитанный по формуле уменьшенный гарантированный боковой зазор [1, с. 4]:

$$j'_{n \min} = j_{n \min} - 0,68(|f'_a| - |f_a|), \quad (1.4)$$

где  $j_{n \min}$  и  $f_a$  – табличные значения гарантированного бокового зазора и предельного отклонения межосевого расстояния для данного вида сопряжения;  $j'_{n \min}$  – рассчитанный гарантированный боковой зазор;  $f'_a$  – отклонение межосевого расстояния для более грубого класса.

Пример условного обозначения точности передачи со степенью точности 7 по всем нормам, с видом сопряжения зубчатых колес С, видом допуска на

боковой зазор  $a$  и классом отклонений межосевого расстояния  $V$  (при межосевом расстоянии  $a_w = 450$  мм,  $j'_{n \min} = 128$  мкм):

$$7 - Ca/V - 128 \text{ ГОСТ } 1643-81$$

В данном случае указанием класса отклонений межосевого расстояния  $V$  определено значение  $f'_a$  (120 мкм); значение  $j'_{n \min}$  рассчитано по формуле (1.4) и проставлено в обозначении передачи;  $T_{jn}$  определен видом допуска на боковой зазор  $a$ , а обозначение вида сопряжения  $C$  использовано для определения табличных значений гарантированного бокового зазора  $j_{n \min}$  (155 мкм) и предельного отклонения межосевого расстояния  $f_a$  (80 мкм) в формуле (1.4).

При принятии более точного класса отклонений межосевого расстояния наименьший зазор в передаче будет больше бокового зазора, указанного в стандарте. Его значение, рассчитанное по формуле (1.4), может не указываться в условном обозначении точности передачи.

Нормы бокового зазора в передаче устанавливают взаимосвязь между отклонениями, определяющими утонение зубьев, исходным боковым зазором и предельными отклонениями межосевого расстояния в передаче. Утонение зубьев должно обеспечить гарантированный минимальный боковой зазор  $j_{n \min}$  и зазор  $k_j$ , компенсирующий уменьшение зазора возможными погрешностями изготовления и монтажа. Сумма наименьших смещений исходного контура:

$$E_{Hs_1} + E_{Hs_2} = (j_{n \min} + k_j) / 2 \sin \alpha, \quad (1.5)$$

где  $E_{Hs_1}, E_{Hs_2}$  – наименьшее дополнительное смещение исходного контура соответственно шестерни и зубчатого колеса;  $\alpha$  – угол профиля.

Отметим, что в стандартах других стран допускается получение бокового зазора в передаче за счет утонения зубьев только одного из колес передачи или неравного утонения зубьев колес.

Допускаются также такие «виды сопряжений», при которых  $j_{n \min} < 0$ , что представляется разумным для пластмассовых, например, колес, подвергаемых приработке до эксплуатации.

Иногда в литературе делается вывод о том, что вид сопряжения, обусловленный  $E_{Hs}$ , практически не зависит от степени точности. Так как в правую часть формулы (1.5) входят члены, определяемые всеми тремя нормами точности и нормой бокового зазора, такая зависимость на самом деле существует. Например, вид сопряжения  $H$  регламентирован для степени точности не ниже 7-й. Но и эти меры не гарантируют в действительности минимальный зазор, указанный в стандартах. Все вышесказанное свидетельствует о сложности выбора параметров бокового зазора. Наиболее распространенный метод выбора вида сопряжения – метод аналогий – приводит к тому, что целые отрасли промышленности используют один вид сопряжения для передач определенного типа. Переход к выпуску передач с новыми свойствами (повышенная скорость, нагрузка, новые материалы элементов

передач, новая смазка и т.д.) и смена эксплуатационных условий требуют значительной экспериментальной проработки вопроса о выборе параметров нормы бокового зазора.

Для передач с регулируемым расположением осей показателем, обеспечивающим гарантированный боковой зазор, является величина  $j_{n \min}$ . В этом случае, характерном для приборостроения, регулированием расположения осей обычно оптимизируют два показателя – боковой зазор и момент трогания (потери на трение), причем эти показатели противоречивы: чем больше зазор, тем меньше потери и выше КПД, и наоборот. Поэтому, регулируя расположение осей, стараются достигнуть оптимального значения указанных двух показателей, а вовсе не минимизировать боковой зазор.

## 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ МНОГОЗВЕННЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

### 2.1 Основные положения стандарта ГОСТ 21098–82

ГОСТ 21098-82 [3] устанавливает методы расчета точности кинематических цепей, состоящих из нерегулируемых зубчатых, червячных и реечных передач и передачи винт - гайка, без учета упругих деформаций. Под нерегулируемыми понимают передачи, в конструкциях которых не предусмотрено регулирование взаимного расположения осей подвижных элементов (например, зубчатых колес). Используемый подход может быть вполне распространен и на кинематические цепи, включающие в себя передачи с регулируемым межосевым расстоянием.

Методы расчёта, приведенные в стандарте, предназначены для проведения анализа точности кинематических цепей с использованием вероятностного метода и метода максимума – минимума.

Анализ точности имеет своей целью определение значений показателей точности кинематических цепей, исходя из известных значений показателей точности составляющих звеньев. Сразу же отметим, что согласно основным положениям ТММ кинематическая цепь отличается от механизма тем, что в ней стойка (неподвижное звено) еще не выбрано. Следовательно, никаких показателей точности у кинематической цепи нет, речь идет о механизмах, полученных из кинематических цепей выбором стойки, то есть о многозвенных зубчатых механизмах и механизмах винт-гайка.

В ГОСТ 21098-82 даются формулы для расчёта минимального и максимального значений кинематической погрешности передач –  $F'_{i0\min}$  и  $F'_{i0\max}$ , мкм. Для цилиндрических зубчатых передач по ГОСТ 1643-81 и ГОСТ 9178-81 [1, 21]:

– для степеней точности 3 – 6:

$$F'_{i0\min} = 0,62K_s(F'_{i1} + F'_{i2}). \quad (2.1)$$

– для степеней точности 7, 8:

$$F'_{i0\min} = 0,71K_s(F'_{i1} + F'_{i2}). \quad (2.2)$$

$$F'_{i0\max} = K \left[ \sqrt{(F'_{i1})^2 + E_{\Sigma M_1}^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + E_{\Sigma M_2}^2} \right], \quad (2.3)$$

где  $K$ ,  $K_s$  – коэффициенты фазовой компенсации, т.е. коэффициенты, учитывающие степень изменения кинематической погрешности от начального положения звеньев;  $F'_{i1}$ ,  $F'_{i2}$  – кинематические погрешности соответственно ведущего и ведомого колёс;  $E_{\Sigma M_1}$ ,  $E_{\Sigma M_2}$  – суммарная приведенная погрешность монтажа (в ГОСТ 21098–82 определяется по Приложению 2).

Для передач зубчатых конических по ГОСТ 1758-81 и ГОСТ 9368-81 [22, 23]:

– для степеней точности 3 – 6:

$$F'_{i0\min} = 0,67K_s(F'_{i1} + F'_{i2}). \quad (2.4)$$

– для степеней точности 7, 8:

$$F'_{i0\min} = 0,72K_s(F'_{i1} + F'_{i2}). \quad (2.5)$$

$$F'_{i0\max} = K \left[ \sqrt{(F'_{i1})^2 + E_{\Sigma M_1}^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + E_{\Sigma M_2}^2} \right], \quad (2.6)$$

Для передач червячных цилиндрических по ГОСТ 3675-81 и ГОСТ 9774-81 [24, 25]:

$$F'_{i0\min} = 0,62[0,7(f_{hk} + f_{f1}) + F'_{i2}]. \quad (2.7)$$

$$F'_{i0\max} = 0,8\sqrt{(f_{hk} + f_{f1})^2 + E_{\Sigma M_1}^2} + \sqrt{(F'_{i2})^2 + E_{\Sigma M_2}^2}, \quad (2.8)$$

где  $f_{hk}$  – допуск на погрешность винтовой линии на длине нарезанной части червяка;  $f_{f1}$  – допуск на погрешность профиля витка червяка.

Для передач зубчатых реечных по ГОСТ 10242–81 и ГОСТ 13506–81 [26, 27]:

– для степеней точности 3 – 6:

$$F'_{i0\min} = 0,62K_s(F'_{i1} + F'_{i2}). \quad (2.9)$$

– для степеней точности 7, 8:

$$F'_{i0\min} = 0,71K_s(F'_{i1} + F'_{i2}). \quad (2.10)$$

$$F'_{i0\max} = K \left[ \sqrt{(F'_{i1})^2 + E_{\Sigma M_1}^2} + F'_{i2} \right]. \quad (2.11)$$

Передача винт-гайка [28]:

$$F'_{i0\min} = 0,62\delta t_{\Sigma}, \quad (2.12)$$

$$F'_{i0\max} = \sqrt{(\delta t_{\Sigma})^2 + E_{\Sigma M}}, \quad (2.13)$$

где  $\delta t_{\Sigma}$  – накопленная погрешность шага резьбы, т.е. разность между действительным и номинальным расстояниями между любыми несоседними профилями витков по образующим среднего диаметра.

Также в стандарте приводятся формулы для расчёта минимального и максимального значений мёртвого хода передач, мкм.

Величины минимального мёртвого хода передач. Передача винт-гайка:

$$j_{t\min} = b'' \operatorname{tg} \psi, \quad (2.14)$$

где  $j_{t\min}$  – наименьший окружной боковой зазор в передаче;  $b''$  – нижнее предельное отклонение среднего диаметра винта [29];  $\psi$  – угол наклона винтовой линии [30].

Остальные виды передач:

$$j_{t \min} = \frac{j_{n \min}}{\cos \alpha \cos \beta}, \quad (2.15)$$

где  $j_{n \min}$  – гарантированный боковой зазор (нормальный);  $\alpha$  – угол исходного профиля;  $\beta$  – делительный угол наклона линии зуба.

Величины максимального мёртвого хода передач. Цилиндрическая зубчатая передача:

$$j_{t \max} = 0,7(E_{Hs_1} + E_{Hs_2}) + \sqrt{0,5(T_{H_1}^2 + T_{H_2}^2 + 2f_a^2 + G_{r_1}^2 + G_{r_2}^2)}, \quad (2.16)$$

где  $j_{t \max}$  – наибольший окружной боковой зазор в передаче,  $E_{Hs}$  – наименьшее дополнительное смещение исходного контура;  $T_H$  – допуск на смещение исходного контура;  $\pm f_a$  – предельные отклонения межосевого расстояния;  $G_r$  – радиальный зазор в опорах вращения, принимается равным радиальному биению (в ГОСТ 21098–82 определяется по Приложению 2 [3]).

Передачи зубчатые конические:

$$j_{t \max} = 0,94(E_{\bar{S}s_1} + E_{\bar{S}s_2}) + \sqrt{0,46\left\{[f_{AM_1} \sin \delta_1]^2 + [f_{AM_2} \sin \delta_2]^2 + (G_{a_1} \sin \delta_1)^2 + (G_{a_2} \sin \delta_2)^2 + E_{\Sigma}^2 + (G_{r_1} \cos \delta_1)^2 + (G_{r_2} \cos \delta_2)^2\right\} + 0,9(T_{\bar{S}_1}^2 + T_{\bar{S}_2}^2)}, \quad (2.17)$$

где  $E_{\bar{S}s}$  – наименьшее отклонение средней делительной толщины зуба по хорде;  $\pm f_{AM}$  – предельные осевые смещения зубчатого венца;  $\delta$  – угол делительного конуса;  $G_a$  – осевой зазор в опорах вращения (в ГОСТ 21098-82 определяется по Приложению 2);  $\pm E_{\Sigma}$  – предельные отклонения межосевого угла передачи;  $T_{\bar{S}}$  – допуск на среднюю делительную толщину зуба по хорде.

Передачи червячные цилиндрические:

$$j_{t \max} = 0,94E_{\bar{S}s} + \sqrt{0,9(T_{\bar{S}}^2 + G_{a1}^2) + 2(f_a^2 + f_{ac}^2) + G_{r1}^2 + G_{r2}^2}, \quad (2.18)$$

где  $E_{\bar{S}s}$  – наименьшее отклонение толщины витка червяка по хорде;  $T_{\bar{S}}$  – допуск на толщину витка червяка по хорде;  $\pm f_a$  – предельные отклонения межосевого расстояния в червячной передаче;  $\pm f_{ac}$  – предельные отклонения межосевого расстояния в обработке.

Передачи зубчатые реечные:

$$j_{t \max} = 0,7(E_{Hs_1} + E_{Hs_2}) + \sqrt{0,5(T_{H_1}^2 + T_{H_2}^2) + 2f_a^2 + G_r^2}. \quad (2.19)$$

Передача винт-гайка:

$$j_{t \max} = b' \operatorname{tg} \psi + \sqrt{[(b'' - b') \operatorname{tg} \psi]^2 + (b \operatorname{tg} \psi)^2 + G_{a_1}^2 + G_{a_2}^2}, \quad (2.20)$$

где  $b'$  – верхнее предельное отклонение среднего диаметра винта;  $b$  – верхнее отклонение среднего диаметра гайки.

Приводятся также и формулы для расчета указанных величин в угловых единицах, угл. мин. (...').

Кинематическая погрешность для зубчатых и червячных передач:

$$\delta\varphi = \frac{6,88F'_{i0}}{d}, \quad (2.21)$$

где  $d$  – диаметр делительной окружности ведомого колеса.

Мертвый ход для зубчатых и червячных передач:

$$j_\varphi = \frac{7,32j_t}{d}. \quad (2.22)$$

Кинематическая погрешность для передачи винт-гайка:

$$\delta\varphi = \frac{21,6F'_{i0}}{P_h}, \quad (2.23)$$

где  $P_h$  – ход резьбы.

Мертвый ход для передачи винт-гайка:

$$j_\varphi = \frac{21,6j_t}{P_h}. \quad (2.24)$$

Суммарная приведенная погрешность монтажа для цилиндрических, конических и червячных зубчатых колёс вычисляется на основании зависимости:

$$E_{\Sigma M} = \sqrt{\left(\frac{e_r \operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta}\right)^2 + (e_a \operatorname{tg} \beta)^2}, \quad (2.25)$$

где  $e_r$  и  $e_a$  – монтажные радиальное и осевое биения зубчатого колеса соответственно (показатели точности монтажа зубчатых колёс) [3, с. 14]. Значения  $e_r$  и  $e_a$  вычисляются по формулам:

$$e_r = 0,85 \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2}. \quad (2.26)$$

$$e_a = 0,85 \sqrt{\sum_{j=1}^n e_j^2}, \quad (2.27)$$

где  $e_i$  и  $e_j$  – допуски на погрешности, создающие первичные радиальные и осевые биения колеса соответственно.

Монтажное радиальное биение зубчатого колеса  $e_r$  – составляющая радиального биения зубчатого венца колеса, вращающегося на рабочей оси, определяемая радиальным биением поверхности, сопряженной с посадочным местом колеса. Монтажное осевое биение зубчатого колеса  $e_a$  – составляющая осевого биения зубчатого венца колеса, вращающегося на рабочей оси,

определяемая осевым биением поверхности, сопряженной с посадочным местом колеса.

Первичные радиальные биения колеса – погрешности, создающие радиальные биения поверхности, сопрягаемой с посадочным местом колеса. Первичные осевые биения колеса – погрешности, создающие осевые биения поверхности, сопрягаемой с посадочным местом колеса.

Авторы настоящей работы считают необходимым определять монтажное радиальное биение как  $F_{rm}$  по нижеследующей формуле. При этом в отличие от ГОСТ 21098–82, не обязательно, а во многих случаях и не нужно, знать все первичные величины  $e_a$  и  $e_r$ .

Определим монтажное радиальное биение зубчатого колеса следующим образом:

$$F_{rm} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} \left( F_r + e_n + e_B + e_K \frac{a+b}{l} \right), \quad (2.28)$$

где  $F_r$  – допуск на радиальное биение зубчатого колеса;  $e_n$  – зазор в посадке колеса на вал, зависящий от конструкции соединения и используемой посадки;  $e_B$  – допуск на радиальное биение посадочной ступени вала под зубчатое колесо относительно цапфы вала, причем для гладких валов  $e_B = 0$ ;  $e_K$  – допуск на радиальное биение внутренних колец подшипников;  $a$ ,  $b$ ,  $l$  – размеры, указанные на рис. 2.1, а и рис. 2.1, б.

Отношение  $(a+b)/l$  служит для приведения радиального биения колец подшипников к средней плоскости зубчатого венца.

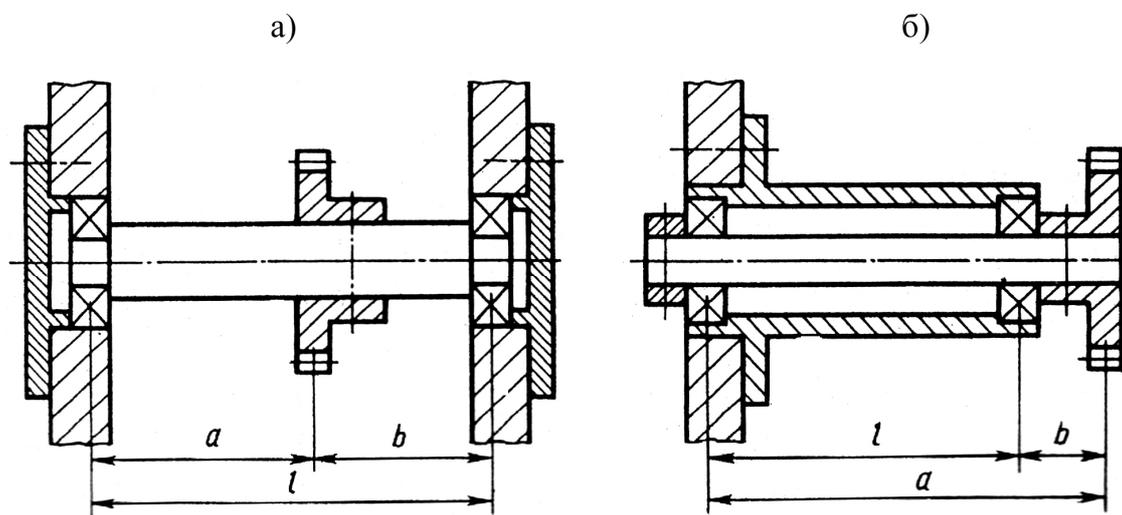


Рис. 2.1. Межопорное и консольное расположения колес.

С учетом используемого вероятностного характера суммирования погрешностей перепишем (2.28) в виде:

$$F_{rm} = 0,85 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \beta} \sqrt{F_r^2 + e_n^2 + e_B^2 + e_K^2 \left( \frac{a+b}{l} \right)^2}. \quad (2.29)$$

Приведенные зависимости явно свидетельствуют о том, что  $E_{\Sigma M}$  и  $F_{rm}$  можно вычислить только при наличии рабочих чертежей всех деталей передачи (механизма).

Главное отличие ГОСТ 1643-81 и ГОСТ 9178-81 от стандарта ГОСТ 21098-82 заключается в подходе к показателям точности зубчатых колёс. Если в ГОСТ 1643-81 и ГОСТ 9178-81 представлены допуски и предельные отклонения относительно **рабочих осей**, т.е. тех осей, вокруг которых колеса вращаются в передаче, то ГОСТ 21098-82 считает, что указанные допуски и предельные отклонения относятся к **базовым осям** и, переходя к отысканию максимальных значений кинематической погрешности и мертвого хода передачи, неизменно учитывают погрешности монтажа.

В стандартах ЕСКД принято правило, согласно которому на рабочих чертежах изделий указываются допуски и предельные отклонения, которым изделия должны соответствовать перед сборкой [31, с. 2, п. 1.1.7]. Стандарты на допуски зубчатых колес и передач устанавливают точностные требования для зубчатых колес, реек, червяков относительно их рабочих осей в передаче (для реек – базовых поверхностей), т.е. нормы, которым изделия должны соответствовать после сборки передачи. Стандарты допускают установление требований к точности зубчатых колес, реек, червяков относительно другой оси (поверхности), не совпадающей с рабочей. При этом различие базовой и рабочей осей (поверхностей) должно быть учтено при установлении точности передачи или компенсировано введением сокращенного производственного допуска.

На предприятиях нормы точности, установленные, например, ГОСТ 1643-81 и ГОСТ 9178-81 для рабочих осей, проставляются на рабочих чертежах зубчатых колес относительно базовых осей. Поэтому ГОСТ 21098-82 в этой части отражает положение, сложившееся в практике [32].

На этапах проектирования зубчатой передачи, пользуясь формулами (2.1) – (2.29) из ГОСТ 21098-82, можно получить существенное уменьшение наибольшей кинематической погрешности и (или) мертвого хода механизма. В частности, для этого необходимо выполнить ряд действий. А именно – произвести изменение кинематической схемы механизма, в которой, по сравнению с исходной:

- изменена разбивка общего передаточного отношения механизма по ступеням;
- изменены точностные параметры одной или нескольких передач (ступеней) механизма.

В результате проведенных действий последняя, ближняя к выходу передача, во-первых, должна иметь значительное передаточное отношение, чтобы свести к минимуму влияние погрешностей предыдущих звеньев на показатели всего механизма и, во-вторых, именно эта передача должна быть выполнена с максимально возможной точностью. Таким образом, можно получить значительное уменьшение величин мертвого хода и кинематической погрешности механизма.

## **2.2 Основные требования к созданию стандарта параметров точности передач и многозвенных зубчатых механизмов**

В новом стандарте взамен ГОСТ 21098-82 прежде всего, следует четко определить объект взаимозаменяемости. Здесь необходимо дать определение зубчатой передачи, ориентируясь на классическом определении, данном М.Л. Ериховым [33]. Таким образом, предполагается изменить базовый стандарт ГОСТ 1643-81 и другие основанные на тех же принципах стандарты, т.к. данные этих документов относятся к колесам на базовых осях и проставляются на чертежах зубчатых и червячных колес, червяков и реек. Параметры точности передач рассчитываются в соответствии с принципами ГОСТ 21098-82, который, однако, нуждается в коренном пересмотре. Верен только принцип – чтобы получить параметры точности передач необходимо добавить к параметрам точности колес монтажные погрешности, т.е. сумму погрешностей всех элементов передачи.

Необходимо привести типовые схемы зубчатых передач с гораздо большей полнотой, чем это сделано для цилиндрических передач [34, с. 144]. Предполагается придать стандарту, вводимому взамен ГОСТ 21098-82, расчетный характер. При этом табличные показатели норм точности и бокового зазора будут относиться к отдельным типовым схемам передач. Необоснованное требование одинаковой степени точности по каждому отдельному показателю для шестерни и колеса передачи становится в таком случае излишним. Необходимо учесть существенные недостатки ГОСТ 21098-82, которые рассматриваются в главе 4 настоящего пособия.

### 3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ ISO 1328

Рекомендации ISO 1328, в отличие от ГОСТ 1643-81, состоят из следующих частей (ISO 1328-1:1995, ISO 1328-2:1997) [5, 6], имеющих общий заголовок *Передачи зубчатые цилиндрические – Система точности по ISO*:

- Часть 1: Определения и допустимые значения отклонений соответствующих боковых поверхностей зацепляющихся зубьев;

- Часть 2: Определения и допустимые значения отклонений, относящихся к радиальным составным отклонениям (колебаниям измерительного межосевого расстояния), и информация по износу (радиальному биению).

Пункт 2 рекомендаций [5, 6, с. 1] гласит, что ISO 1328 «не содержит все необходимые положения. Но он использует положения (ресурсы) из других документов. На эти другие положения в стандарте есть ссылки. И эти положения тоже становятся частью этого стандарта» [35–47].

Стандарт ISO 1328 [5, 6, с. 1] устанавливает систему точности, относящуюся к отдельным эвольвентным цилиндрическим колёсам, пары колёс не учитываются. В ISO 1328-2 [6, с. 3] отмечается, что «по соглашению между покупателем и производителем, допуски могут быть аналогично использованы для цилиндрических косозубых зубчатых колёс».

В ISO 1328 применяются ряды параметров. В первой части [5, с. 7-8]:

- делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1 000 / 1 600 / 2 500 / 4 000 / 6 000 / 8 000 / 10 000 мм;

- модуль зубьев: 0,5 / 2 / 3,5 / 6 / 10 / 16 / 25 / 40 / 70 мм;

- ширина зубчатого венца: 4 / 10 / 20 / 40 / 80 / 160 / 250 / 400 / 650 / 1 000 мм.

Во второй части [6, с. 5], для колебаний измерительного межосевого расстояния:

- делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1 000 мм;

- модуль зубьев: 0,2 / 0,5 / 0,8 / 1 / 1,5 / 2,5 / 4 / 6 / 10 мм.

Таким образом, мы видим, что диапазон делительных диаметров  $d$  и модулей  $m$  существенно ограничен сверху, скорее всего, за счёт отсутствия приборов для измерения зубчатых колёс больших размеров.

Та же, вторая часть [6, с. 8], для радиального биения:

- делительный диаметр: 5 / 20 / 50 / 125 / 280 / 560 / 1 000 / 1 600 / 2 500 / 4 000 / 6 000 / 8 000 / 10 000 мм;

- модуль зубьев: 0,5 / 2,0 / 3,5 / 6 / 10 / 16 / 25 / 40 / 70 мм.

Ширина зубчатого венца во второй части стандарта ISO 1328 в учёт не берётся, поскольку радиальное биение может быть измерено в одной точке

посередине ширины венца. Радиальное биение предполагается измерять во всём диапазоне зубчатых колёс, считающихся стандартными.

Каждая часть ISO 1328 устанавливает свою структуру системы точности для зубчатых колёс. В первой части ISO 1328 [5, с. 7] отмечается, что «система точности по ISO включает в себя 13 степеней точности, где 0 – самая высокая, а 12 – самая низкая». Во второй части ISO 1328 [6, с. 1] говорится, что «система точности радиальных измерений имеет иные диапазоны степеней, чем ISO 1328-1. Ряды диаметра и модуля для радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния) и радиального биения также другие. Система точности радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния) включает в себя 9 степеней точности, где 4 – самая высокая степень, а 12 – самая низкая». Далее [6, с. 3] читаем: «определение степени точности с помощью измерения радиальных составных отклонений (колебаний измерительного межосевого расстояния) согласно этой части ISO 1328 не подразумевает, что погрешности элементов (например, шага, профиля, хода винтовой линии зуба и т.д. из ISO 1328-1) будут соответствовать той же самой степени (точности). Положения в документах относительно требуемой точности должны включать ссылку на соответствующий стандарт, ISO 1328-1 или ISO 1328-2, соответственно».

Первая часть ISO 1328 содержит допустимые значения погрешностей шага, общие погрешности профиля зуба и общие погрешности направления зуба. Вторая часть рекомендаций содержит допустимые значения колебаний измерительного межосевого расстояния и радиального биения.

В ISO 1328 местная кинематическая погрешность  $f_i'$  определяется по формуле:

$$f_i' = K(4,3 + f_{pt} + F_\alpha), \quad (3.1)$$

где  $f_{pt}$  – погрешность шага;  $F_\alpha$  – погрешность профиля зуба общая.

Коэффициент  $K$  в формуле (3.01) зависит от коэффициента перекрытия  $\varepsilon_\gamma$ , т.е. местная кинематическая погрешность зависит от коэффициента перекрытия. Вместо таблицы допустимых значений местной кинематической погрешности в ISO 1328 приведена таблица значений  $f_i'/K$  [5, с. 18-19].

В ISO 1328 пункт В.1 приложения В гласит: «Так как для погрешностей формы профиля и контактной линии, а также наклона профиля зуба и наклона винтовой линии зуба допуски приводить не обязательно, то они не предусматриваются в качестве нормативных элементов в этой части ISO 1328. Однако поскольку погрешности наклона и формы имеют существенное влияние на рабочие характеристики колеса, то соответствующие значения приведены в таблицах» [5, с. 20]. Радиальное биение во второй части ISO 1328 [6, с. 8] также не является нормативной величиной и носит информационный характер.

В ISO 1328 многие погрешности определяются частью профиля зуба до начала модифицированного участка. В ГОСТ 1643-81 модификация профиля не оговорена.

Во второй части ISO 1328 [6, с. 2] контроль полного колебания измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса  $F_i''$

предусматривает двухпрофильный контакт. Этот метод контроля прост, но имеет неустранимые недостатки, которые описаны в целом ряде работ отечественных учёных [48].

В ISO 1328 отсутствует таблица допустимых значений накопленной погрешности шага  $F_{pk}$ . Эта величина рассчитывается по формуле:

$$F_{pk} = f_{pt} + 1,6\sqrt{(k-1)m}, \quad (3.2)$$

где  $f_{pt}$  – погрешность шага;  $k$  – число шагов;  $m$  – модуль.

Стандарт ISO 1328 содержит определение зубчатого колеса механизма [6, с. 2] и требования к измерительному зубчатому колесу. В частности, пункт 5.5 [6, с. 3]: «При использовании измерительного колеса с цилиндрическими косозубыми колёсами, ширина зубчатого венца измерительного колеса должна быть такой, чтобы коэффициент осевого перекрытия  $\varepsilon_\beta$ , в сравнении с зубчатым колесом механизма, был меньше или равен 0,5».

Величины допустимых значений погрешностей в ISO 1328 рассчитываются по формулам для 5-ой степени точности. Пункт 5.2 [5, с. 7]: «Коэффициент шага между двумя последовательными степенями равен  $\sqrt{2}$ ; т.е. величины каждой следующей большей (меньшей) степени определяются умножением (делением) на  $\sqrt{2}$ . Требуемая величина для любой степени точности может быть определена умножением неокруглённой вычисленной величины для 5-ой степени точности на  $2^{0,5(Q-5)}$ , где  $Q$  – это число степени точности требуемой величины».

Таким образом, видна универсальность рекомендаций стандарта ISO 1328 в данном вопросе. Для получения величины допуска нужной степени точности используется всего один коэффициент. И это правило распространяется на все параметры точности в обеих частях стандарта ISO 1328. В ISO 1328-2 [6, с. 3] к этому добавляется: «если геометрические параметры зубчатого колеса выходят за пределы определённых рядов (см. пункт 1), то использование формул должно производиться по договорённости между покупателем и производителем». Зубчатые колёса, выходящие за пределы рядов, считаются нестандартными, однако и для них допуски и предельные отклонения могут быть вычислены по приведённым в стандарте ISO 1328 формулам.

Нормы кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев в ISO 1328 не устанавливаются. Также отсутствуют: виды сопряжений зубчатых колёс в передаче, виды допуска на боковой зазор, классы отклонения межосевого расстояния, нормы бокового зазора. Боковой зазор упоминается в первой части ISO 1328 [5, с. 17] среди требований для проверки степени точности кинематической погрешности.

В дальнейшем вопрос контроля бокового зазора рассматривается в отдельном стандарте, техническом отчёте ISO/TR 10064-2:1996 [41, 42]. Рекомендации стандарта ISO/TR 10064-2 не связывают величину зазора и её нормирование ни с видом сопряжения, ни с видом допуска на боковой зазор, ни с классом отклонения межосевого расстояния. Однако требуют обязательного учёта погрешности изготовления и монтажа незубчатых деталей передачи

(корпуса, валов, подшипников и т.д.), условий работы зубчатой передачи, а также вида смазки, её загрязнения, наличия неметаллических частей колёс и других элементов. При этом всё говорящееся в данном документе носит рекомендательный характер.

В первом пункте Приложении А стандарта ISO/TR 10064-2 даётся метод выбора допусков на толщину зуба колёс и минимального бокового зазора. Кроме того, приводятся метод расчёта максимального предполагаемого бокового зазора в зубчатом зацеплении и рекомендуемые величины минимального бокового зазора [41, с. 23].

Во втором пункте Приложения А даётся определение бокового зазора и приводится обоснование необходимой его величины. Также говорится, что «боковой зазор в зацеплении изменяется в процессе функционирования передачи вследствие изменения скорости вращения колес, температуры, нагрузки и т.д.»

Третий пункт Приложения А стандарта ISO/TR 10064-2 называется «Максимальная толщина зуба колеса». В нём даётся определение этого понятия. Также приводятся рекомендации по определению максимальной и минимальной толщины зуба.

В четвертом пункте Приложения А, имеющем заголовок «Минимальный боковой зазор» даётся определение минимального бокового зазора и описывается необходимость его наличия – «это так называемый традиционный «допуск на боковой зазор», который создается конструктором, чтобы компенсировать:

- (а) погрешности корпуса и подшипников, прогибы валов;
- (б) несоосность осей колес вследствие погрешностей корпуса и зазоров в подшипниках;
- (в) перекося осей вследствие погрешностей корпуса и зазоров в подшипниках;
- (г) погрешности монтажа, такие как эксцентриситет валов;
- (д) биения опор;
- (е) температурные воздействия (функция разности температуры между корпусом и элементами колеса, межосевого расстояния и разница по материалам);
- (ж) увеличение центробежной силы вращающихся элементов;
- (з) другие факторы, такие как загрязнение смазки и увеличение в размерах неметаллических частей колеса».

Также говорится, что «величина минимального бокового зазора может быть небольшой при условии того, что приведенные выше факторы контролируются. Каждый из факторов можно оценить посредством анализа допусков, а затем вычислить минимальные требования» [41, с. 24]. Также в этом пункте стандарта ISO/TR 10064-2 приведена таблица с величинами минимального бокового зазора  $j_{bmin}$ , рекомендуемыми для промышленных приводов с колесами из черных металлов в корпусах из черных металлов, работающих при окружных скоростях меньше, чем 15 м/с, с типичными (нормальными) коммерческими (термин оригинала, у нас более принятым

является термин «экономически обоснованными») производственными допусками для корпусов, валов и опор.

Величины минимального бокового зазора, приведенные в таблице стандарта ISO/TR 10064-2, можно рассчитать, пользуясь выражением:

$$j_{bn\min} = \left(\frac{2}{3}\right) [0,06 + 0,0005 a_i + 0,03 m_n], \quad (3.3)$$

где  $m_n$  – нормальный модуль;  $a_i$  – минимальное межосевое расстояние.

Также в ISO/TR 10064-2 приводится формула для расчета бокового зазора:

$$j_{bn} = \left( E_{sns1} + E_{sns2} \right) \cos \alpha_n, \quad (3.4)$$

где  $E_{sns1}$  и  $E_{sns2}$  – верхнее отклонение толщины зуба шестерни и колеса соответственно;  $\alpha_n$  – угол профиля нормальный.

Шестой пункт ISO/TR 10064-2 содержит рекомендации по нормированию максимального бокового зазора  $j_{bn\max}$ . Приводится определение этого параметра точности – «максимальный боковой зазор в зубчатой передаче  $j_{bn\max}$  – это сумма допуска на толщину зуба, влияния отклонений межосевого расстояния и влияния отклонений геометрических параметров зуба колеса и условие его возникновения – «теоретический максимальный боковой зазор возникает, когда два качественных зубчатых колеса, изготовленных по техническому требованию с минимальной толщиной зуба, находятся в зацеплении на максимально допустимом межосевом расстоянии. Приводятся формулы для подсчёта минимальной действительной толщины зуба и максимального окружного бокового зазора, а также формула перевода величины окружного зазора в нормальный боковой зазор. Также говорится, что «любые производственные отклонения зуба будут увеличивать максимальный предполагаемый боковой зазор. Для оценки приемлемых величин требуется серьезная исследовательская работа на базе большого количества опытов». Подчеркивается, что «если требуется контролировать максимальный боковой зазор, то нужно провести тщательное изучение каждого его компонента и выбранной степени точности, ограничивающей отклонения геометрии зуба колеса» [41, с. 25].

В качестве показателей зазора используются величины  $E_{sns}$  и  $T_{sn}$  (верхнее отклонение толщины зуба и допуск на толщину зуба колеса). Величины  $E_{sns}$  и  $T_{sn}$  в ISO/TR 10064-2 не нормируются, а даются только рекомендации в части методов их определения.

Еще один документ, который тесно связан с ISO 1328 – это технический отчет ISO/TR 10064-4 [44, 45]. В нем содержатся рекомендации по вопросу измерения шероховатости поверхности и контролю пятна контакта. Пятна контакта используют в качестве количественной и качественной меры оценки поверхности зубьев колеса. Объясняются методы получения и анализа пятен контакта – условия проверки, состав и марка применяемой краски, калибровка,

запись результатов проверки и т.д. Также приводится руководство по оценке точности зубчатой передачи по пятнам контакта.

Ещё раз нужно отметить, что положения ISO/TR 10064-2 и ISO/TR 10064-4 носят рекомендательный характер, строгих требований по нормированию в них не содержится.

## 4. КРИТИКА ПОЛОЖЕНИЙ СТАНДАРТОВ ГОСТ 1643-81 И ГОСТ 21098-82

ГОСТ 1643-81 [1] выпущен тридцать лет назад. За это время произошли большие перемены, как в теории точности передач, так и в технологии производства и контроля зубчатых колёс и передач. Основные положения стандарта сдерживают прогресс в области зубонарезания и контроля зубчатых колёс и передач главным образом потому, что не стимулируют отечественного производителя к производству конкурентоспособной продукции.

Критика положений стандартов ГОСТ 1643-81 и ГОСТ 21098-82 ведётся давно и разными авторами [49-53]. Работа авторов направлена на исследование недостатков действующих стандартов и поиск путей исправления существующего положения, как в области стандартизации, так и в области производства и контроля зубчатых колёс и передач.

Документ имеет название: «ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски». Как видно из названия, объект стандартизации – зубчатая передача. Следовательно, документ должен устанавливать нормы и показатели точности для цилиндрических зубчатых передач. Однако это не так, поскольку большое внимание уделяется показателям точности зубчатых колёс. По сути, исследуются зубчатые колёса, а не передачи, и из суммы их показателей точности находятся показатели точности для передач.

Рассмотрим примечание к таблице 6, пункт 3 в ГОСТ 1643-81 [1, с. 13]. «Допуск на кинематическую погрешность зубчатой передачи  $F'_{i0}$  равен сумме допусков на кинематическую погрешность её зубчатых колёс». Допуск на кинематическую погрешность зубчатого колеса  $F'_i$  – величина табличная, а допуск на кинематическую погрешность передачи – расчётная.

То же самое касается допуска на местную кинематическую погрешность передачи  $f'_{i0}$  – примечание к таблице 8, пункт 3 [1, с. 21]. В документе эта величина определяется по следующей формуле:

$$f'_{i0} = 1,25 f'_i, \quad (4.01)$$

где  $f'_i$  – допуск на местную кинематическую погрешность зубчатого колеса (тоже табличная величина).

Далее читаем пункт 2.9 [1, с. 30]: «Точностные требования установлены настоящим стандартом для зубчатых колёс, находящихся на рабочих осях. На чертеже требования к точности зубчатого колеса допускаются устанавливать относительно другой оси (например, оси отверстия под вал), которая может не совпадать с рабочей осью. Погрешности, вносимые при использовании в качестве измерительной базы поверхностей, имеющих неточности формы и расположения относительно рабочей оси, должны быть учтены при установлении точности передачи или компенсированы введением уменьшенного производственного допуска». Однако упомянутые погрешности

не являются единственными. Напомним, что в случае измерения кинематической точности передачи стандарт рассчитывает точность передачи, как сумму показателей точности колёс, в неё входящих. При этом не оговаривается, что свой вклад вносят также погрешности остальных элементов передачи: валов, подшипников, неподвижного звена – корпуса и др. Стандарт не оговаривает влияние упомянутых элементов передачи на её кинематическую точность, т.е. точность передачи движения с одного вала на другой, что немаловажно.

В документе также отсутствует определение зубчатой передачи и не упоминается количество элементов, в неё входящих. По умолчанию принимается, что передача состоит из трёх звеньев (рис. 4.1). Первое и второе звенья – зубчатые, а третье, неподвижное, – состоит из многих деталей. Как было сказано, влияние третьего звена на точность передачи не оговорено. Нет схемы передачи, а она важна.

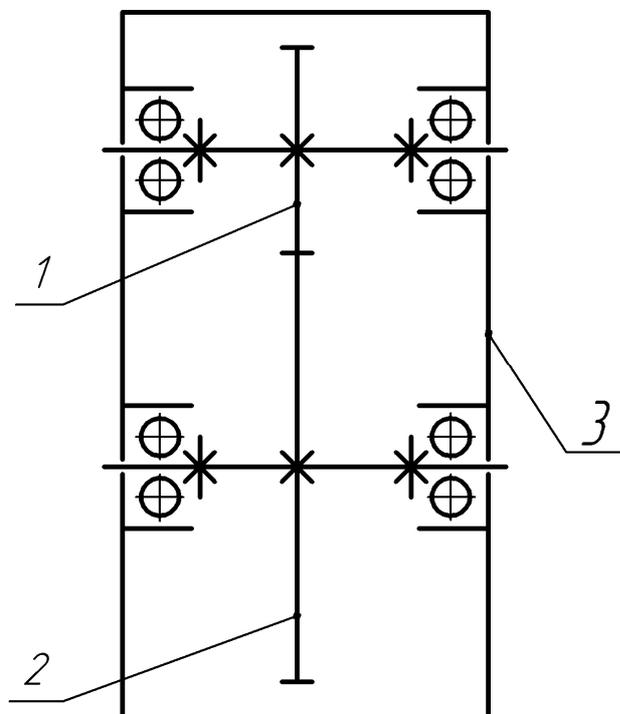


Рис. 4.1. Зубчатая передача с расположением колёс между опорами.

Если расположить колёса по-другому, то точность передачи будет иная при той же точности входящих в неё зубчатых колёс (рис. 4.2).

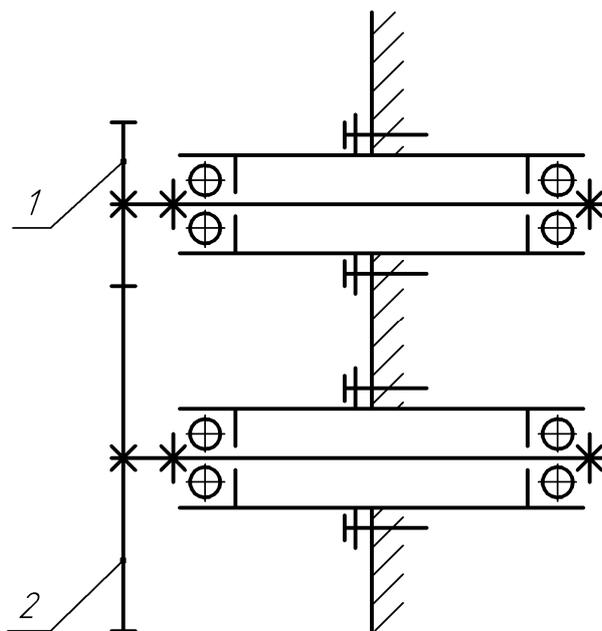


Рис. 4.2. Зубчатая передача с консольным расположением колёс.

В связи со сказанным не ясно, что подвергается замене в случае поломки, т.е. что является объектом взаимозаменяемости [49] (колесо, пара колёс, корпус или совокупность всех элементов – передача). В то время как в зарубежных редукторах, например, объектом взаимозаменяемости является, как правило, отдельно взятое колесо. Следовательно, в названии стандарта должен быть полностью отражён объект стандартизации: зубчатое колесо, пара колёс или зубчатая передача.

ГОСТ 1643-81 устанавливает 12 степеней точности для зубчатых колёс и передач [1, с. 1, п. 1.1]. По умолчанию считается, что степени точности колёс в передаче для каждой нормы должны совпадать. При этом в документе не оговаривается, что на практике это не всегда возможно.

Пункт 2.1.1 [1, с. 4]: «Если кинематическая точность зубчатых колёс относительно рабочей оси соответствует требованиям настоящего стандарта и требование селективной сборки не выдвигается, кинематическую точность зубчатых передач допускается не контролировать». Как уже говорилось выше, на кинематическую точность передачи влияют не только зубчатые колёса. К тому же, на практике, зубчатые передачи практически не контролируются, контролю подвергаются только колёса. Безусловно, необходим контроль передач, особенно под нагрузкой при скоростях, близких к рабочим.

Пункт 2.1.2 [1, с. 4]: «При совпадении кинематической точности окончательно собранной передачи требованиям настоящего стандарта контроль кинематической точности зубчатых колёс не является необходимым». Если следовать этому пункту и не измерять точность колёс, то не представляется возможным изготовить корпус и зубчатые колёса для замены. К тому же, как уже говорилось, измерение точности передач на практике затруднено.

Пункт 2.2.1 [1, с. 5] «Если точность зубчатых колёс по нормам плавности соответствует требованиям настоящего стандарта, плавность работы передач

допускается не контролировать». Опять же, измерение точности передачи на практике затруднено. И, как и в предыдущем пункте, отсутствуют нормы, регламентирующие нагрузку, скорость и т.д. в процессе контроля, длительность самого процесса.

Пункт 2.2.2 [1, с. 6]: «При соответствии плавности работы передачи требованиям настоящего стандарта контроль плавности работы зубчатых колёс не является необходимым». Вновь, следование этому пункту ведёт к невозможности изготовления отдельно взятых зубчатых колёс.

Упомянутое выше положение о том, что уменьшение величины  $f_a$  приводит к увеличению минимального гарантированного бокового зазора и наоборот, кажется нам неверным. Зависимость должна быть прямой, а не обратной. К тому же, предлагается полностью отказаться от такого понятия как класс отклонения межосевого расстояния, поскольку эта норма переопределяет боковой зазор в зубчатой передаче. И для оптимизации нормирования предлагается менять соответствие между видом сопряжения и видом допуска на боковой зазор.

К сожалению, по сравнению с предыдущим документом – ГОСТ 1643-72 [54] в издании стандарта от 81 года уменьшился объём графической информации, что несколько затрудняет работу с документом и, а также были произведены другие изменения. Разберём их подробнее.

Пункт 6 [1, с. 47]: «Радиальное биение зубчатого венца  $F_{rr}$ ». Убран рисунок, поясняющий данный термин.

Пункт 8 [1, с. 47]. Исключён рисунок к пояснению параметра  $F_{vwr}$  – колебание длины общей нормали.

Пункт 22 [1, с. 52]. Исключено определение термина «контактная линия», которое было в документе 1972 года.

Пункт 26 [1, с. 53]. Из рисунка (черт. 15) убрано обозначение средней плоскости и изображение параметра  $f_{ar}$  – отклонение межосевого расстояния.

Пункт 27 [1, с. 53]. Исключён рисунок к параметру  $j_{n\min}$  – гарантированный боковой зазор.

Имеются и опечатки, недопустимые в стандартах. Так, в определении действительного торцевого профиля зуба [1, с. 50] вместо «в плоскости» следует читать «плоскостью».

В связи со сказанным предлагается следующее. Прежде всего, необходимо в стандарте чётко определить объект взаимозаменяемости. Дать определение зубчатой передачи и упомянуть, какие звенья передачи могут быть подвижными и неподвижными. Необходимо привести типовые схемы зубчатых передач так, как это сделано в стандарте расчётов на прочность. Возможно наличие двух стандартов, один из которых регламентирует нормы точности и бокового зазора только для зубчатых колёс, а второй – для передач. Имеющаяся научно-техническая литература в области точности передач предполагает расчётный характер такого стандарта. При этом, однако, табличные показатели норм точности и бокового зазора будут относиться к отдельным типовым

схемам передач. Необоснованное требование одинаковой степени точности по каждому отдельному показателю для шестерни и колеса передачи становится при этом излишним.

Критика стандарта ГОСТ 21098-82 [3], которому в следующем году исполнится тридцать лет, заключается в следующих положениях. Во-первых, как уже говорилось выше, имеются претензии к названию документа – «ГОСТ 21098-82. Цепи кинематические. Методы расчета точности». У кинематических цепей нет точности, пока не выбрана стойка. Речь идёт о многосвязных зубчатых механизмах и механизмах винт-гайка.

Во-вторых, принятые законы распределения при вероятностном суммировании зачастую ни в коей мере не основаны на практике производства. В то время как имеются работы [55], основанные на анализе точности довольно большого объёма выборок в приборостроительном производстве.

В-третьих, коэффициенты фазовой компенсации берутся по диапазону передаточного отношения, в то время как их следует связывать с конкретными числами зубьев шестерни и зубчатого колеса.

В-четвёртых, совершенно справедливо замечено, что кроме погрешностей изготовления надо учитывать также и погрешности сборки. Логика расчёта при этом говорит о том, что следовало бы также учитывать деформацию элементов передачи, изменение положения рабочих осей зубчатых колёс. Методики же учёта монтажных погрешностей в стандарте ГОСТ 21098-82 как таковой нет. Совершенно игнорируются различные взгляды на монтажные погрешности в типовых видах соединений. Повторим выше сделанные выводы: монтажные погрешности можно вычислить только при наличии рабочих чертежей деталей механизма.

Заметим, что определение параметров точности механизма по рабочим чертежам деталей – это анализ точности. Каких-либо рекомендаций в случае создания новых передаточных механизмов (при синтезе) в ГОСТ 21098-82 не содержится.

Как и в ГОСТ 1643-81 в данном стандарте также есть опечатки. В определении величины мёртвого хода для зубчатых и червячных передач вместо коэффициента 6,88 должен быть коэффициент 7,32 [3, с. 4] и т.д.

И всё же добавим, что ГОСТ 21098-82 отвечает практике приборостроения в РФ. В нём отыскание максимальных значений кинематической погрешности и мертвого хода передачи производится с учётом погрешностей монтажа, чего нет в упомянутом ГОСТ 1643-81.

## 5. ПРОБЛЕМЫ ВВЕДЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ISO В ПРАКТИКУ ОТЕЧЕСТВЕННОГО РЕДУКТОРОСТРОЕНИЯ

Многие годы ГОСТ 1643–81 был базовым стандартом, широко используемым, как производителями, так и потребителями зубчатых передач. Базовым стандарт считается потому, что он содержит нормы точности для цилиндрических передач, которые потом переносятся на червячные, конические, реечные и т.д. передачи. Хотя, по мнению многих специалистов базовым должен быть ГОСТ на передачи более общего вида – передачи со скрещивающимися осями. Но сейчас речь идет более о восстановлении разрушенного, чем о продвижении вперед, поэтому по-прежнему будем считать, что общей основой для назначения допусков и предельных отклонений на зубчатые колёса на базовых осях должен быть ГОСТ 1643–81.

Необходимо помнить, что рекомендации ISO 1328 содержат, наряду с таблицами допусков и предельных отклонений для некоторых относительно немногочисленных показателей, рекомендации и расчетные формулы для вычисления отклонений других показателей. В то время как абсолютное большинство отклонений в отечественных стандартах можно было найти непосредственно в таблицах. Таким образом, коротко можно характеризовать наши стандарты как документы, удобные для использования с очень подробной дифференциацией свойств зубчатых передач, с возможностью комбинирования норм точности по показателям кинематической точности, плавности, контакта зубьев и бокового зазора, с возможностью использования различных классов отклонения межосевого расстояния и т.д., с одной стороны, и противоречащими рекомендациям ISO 1328 и сильно устаревшими положениями за прошедшие 28 лет – с другой [53].

Одним из достоинств стандарта ГОСТ 1643–81 является то, что предельные отклонения и допуски можно найти в подробных таблицах, однако, имеются два исключения, что противоречит построению ГОСТ 1643–81. В данном документе два параметра находятся посредством суммирования слагаемых:

- 1)  $-E_{Wms}$  (наименьшее отклонение средней длины общей нормали для зубчатого колеса с внешними зубьями) и  $+E_{Wmi}$  (наименьшее отклонение средней длины общей нормали для зубчатого колеса с внутренними зубьями) по таблицам 16-17 [1, с. 36-38];
- 2)  $F'_i$  (кинематическая погрешность зубчатого колеса) по примечанию 2 к таблице 6 [1, с. 12–13].

Проанализируем примечание к таблице 6 [1, с. 12-13]. Пункт 2 гласит: «Для определения  $F'_i$  (допуска на кинематическую погрешность зубчатого колеса) принимают  $F_p$  (допуск на накопленную погрешность шага зубчатого колеса) по таблице 7 и  $f_f$  (допуск на погрешность профиля зуба) по таблице 8. Допускается нормировать кинематическую погрешность на  $k$  шагах –  $F'_{ik}$ , величина которой определяется по формуле:  $F'_{ik} = F_{Pk} + f_f$ . Величина  $F_{Pk}$  (допуск на накопленную погрешность  $k$  шагов) определяется по таблице 7». В

общем случае кинематическая погрешность зубчатого колеса определяется по формуле  $F'_i = F_p + f_f$ , т.е. через сумму двух слагаемых. Данное положение абсолютно обосновано, пока мы используем пункт 1.9 [1, с. 3], говорящий о комбинировании норм разных степеней точности и изменении соответствия между видом сопряжения и допуском на боковой зазор. Но поскольку ISO 1328 не предполагает такого комбинирования, то допуски на наибольшую кинематическую погрешность должны содержаться в новом стандарте, аналогичном ГОСТ 1643–81, но учитывающем требования ISO.

Пункт 3 примечаний [1, с. 12–13]: «Допуск на кинематическую погрешность зубчатой передачи  $F'_{i0}$  равен сумме допусков на кинематическую погрешность её зубчатых колёс». Этого не достаточно, поскольку, как уже говорилось выше, не учитываются погрешности монтажа и предполагается, что в зубчатую передачу входят колёса одинаковой степени точности, что бывает редко. Ведь с увеличением размеров величина относительной точности зубчатых колёс меняется.

Читаем далее пункт 3: «Для передач, составленных из зубчатых колес, имеющих кратные между собой числа зубьев при отношении этих чисел не более трёх (1, 2, 3), допуск на наибольшую кинематическую погрешность передачи, при её селективной сборке, может быть сокращён на 25% или более, исходя из расчёта» [1, с. 12-13]. Следует здесь заметить, что важно говорить не о кратности чисел зубьев. Если сборка передачи селективная, то должен быть вероятностный подход к оценке кинематической погрешности. К тому же, речь о селективной сборке может быть там, где говорится о зубчатой передаче на рабочих осях, а не о колёсах (см. ГОСТ 21098–82 [3]).

Пятый пункт: «При комбинировании норм кинематической точности и плавности работы из разных степеней точности допуск на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса ( $F''_i$ ) определяют по формуле:  $[F''_i]_{komb} = [F''_i - f''_i] F + [f''_i] f$ , где допуски, входящие в первое слагаемое (с индексом F), принимаются по степени для норм кинематической точности, а допуск, входящий во второе слагаемое (с индексом f), принимается по степени для норм плавности работы» [1, с. 12-13]. Введение в ГОСТ 1643-81 обязательного нормирования кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев с одной стороны существенно расширяет возможности конструктора и позволяет иметь более индивидуальный подход к группе передач, но с другой - не учитывает того важнейшего обстоятельства, что все эти качества формируются в едином технологическом процессе, и потому производственные возможности комбинирования норм точности ничтожны. Не даром классы отклонения межосевого расстояния и несовпадение видов сопряжения с видом допуска на боковой зазор используется на практике чрезвычайно редко. При переходе на рекомендации стандарта ISO норм кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев, скорее всего, к сожалению, не будет, поскольку мы не можем в данный момент доказать международному сообществу необходимость деления показателей точности на 4 нормы. Отсутствие вышеупомянутых норм в стандарте ISO упрощает подход

к контролю зубчатых передач. Заметим, что установление многочисленных показателей для норм кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и бокового зазора является для нашей страны чрезвычайно важным. Наличие на предприятиях различного измерительного оборудования и отсутствие комплексных измерительных лабораторий, позволяющих во времена СССР измерить любую комплексную и поэлементную погрешность, объясняет необходимость наличия в ГОСТ 1643-81 различных показателей.

И, наконец, шестой пункт примечаний: «Допускается, чтобы одна из величин, входящих в комплекс показателей кинематической точности, превосходила предельное значение, если суммарное влияние обеих величин не превышает  $F'_i$ » [1, с. 12-13]. Данный пункт нарушает концепцию ГОСТ 1643-81 о предельно допустимых значениях по каждой погрешности.

Одним из положительных свойств отечественных стандартов было и остается предложение вполне определенных комплексных показателей и комплексов показателей параметров точности для зубчатых колес и передач определенных степеней точности. Другим важнейшим свойством отечественных стандартов, в частности ГОСТ 1643–81, является наличие подробнейших таблиц, из которых конструктор непосредственно выбирал показатели согласно выбранному комплексу. Конечно, существует противоречие между требованием ЕСКД о простановке параметров точности колеса относительно имеющейся на чертеже базовой оси и указанием ГОСТ, согласно которому все нормы приведены относительно рабочих осей [1, с. 30, п. 2.9], которое на практике обычно игнорируется. Таким образом, практически, нормы, установленные в ГОСТ для рабочих осей, записываются в чертежах зубчатых колес относительно базовых. И эта практика привычна и повсеместна. Следует сказать, что пожелание о совмещении конструкторских, технологических и метрологических баз при изготовлении зубчатых колес является при сегодняшнем уровне производства невыполнимым.

Когда затрагивается вопрос о точности зубчатых колёс и передач в стандартах ГОСТ и ISO, положение осложняется наличием в них примерно одинакового количества степеней точности, которые, однако, представляют собою во многих степенях различный уровень точности. Это может вносить большую путаницу в случае международного сотрудничества и торговли техническими устройствами. Таким образом, международное сотрудничество немислимо без приведения отечественного стандарта в полное соответствие с рекомендациями ISO [56–64].

В отдельных положениях стандарта ISO 1328 рассматриваются зубчатые колеса с модулем зубьев до 0,2 мм (в ISO 1328–2 [6]: для колебаний измерительного межосевого расстояния). Данные положения, отражающие существующую практику изготовления зубчатых колес и передач, оспаривать или как-то изменять не имеет смысла. Таким образом, существующее у нас до сего времени положение о мелко модульных зубчатых колесах представляется совершенно бессмысленным, и стандарт ГОСТ 9178-81, нормирующий точность зубчатых колёс и передач с модулем зубьев меньше 1 мм, в дальнейшем рассматриваться не будет. Вместе с тем, не ставится под сомнение

необходимость в стандартизации зубчатых колес с модулем зубьев менее 0,5 мм, однако, параметры точности таких колёс должны устанавливаться в соответствии с их назначением стандартами предприятий (СТП). Разработка СТП является важнейшей задачей специализированных предприятий. При этом, отражая специфику производства и использования таких передач, СТП не должны противоречить ни государственным стандартам, ни рекомендациям ISO.

В ГОСТ 1643-81 заполнение таблиц происходит согласно формулам, приведённым в таблице 1 [3, с. 56–57] имеющей заголовок «Зависимости предельных отклонений и допусков по нормам кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев от геометрических параметров зубчатых колёс» и таблице 2 приложения 2 [3, с. 58–59] – «Зависимости для гарантированных боковых зазоров, отклонений и допусков по нормам бокового зазора».

Например, для расчёта величины допуска на накопленную погрешность шага зубчатого колеса  $F_p$  приведена следующая формула:  $F_p = B\sqrt{d} + C$ , где  $d$  – делительный диаметр зубчатого колеса, коэффициенты  $B$  и  $C$  имеют разное значение для каждой степени точности. Для 5-ой степени точности:  $B=2$ ,  $C=4$ .

Во втором пункте примечаний к таблице 1 [3, с. 56] говорится, что «при расчёте допусков значения делительного диаметра  $d$ , модуля  $m$ , ширины зубчатого венца  $b_w$ , наибольшей длины контактной линии на одном зубе  $l_b$  и длины дуги делительной окружности  $L$  принимаются среднеарифметическими в интервале, а значения числа зубьев колеса передачи  $z$  – среднегеометрическими (параметры в миллиметрах, допуски – в микрометрах)». Далее в пункте 4: «числовые значения допусков в таблицах настоящего стандарта округлены по рядам R20 и R40».

Таким образом, мы видим явное отличие между формулами для вычисления допусков в ISO 1328 и ГОСТ 1643-81. В стандарте ISO 1328 приводятся формулы для вычисления допусков для пятой (базовой) степени точности и один универсальный коэффициент для перехода к любой степени точности. В стандарте ГОСТ 1643–81 приведены формулы для вычисления допусков и таблица значений коэффициентов для каждой степени точности.

Из сравнения стандартов ISO 1328 и ГОСТ 1643–81 видно, что численные величины допусков в таблицах ISO 1328 рассчитываются по простым формулам, в то время как ГОСТ 1643–81 приводит отдельные формулы для пересчёта каждого допуска с различными значениями коэффициентов при переходе к следующей степени точности. В этом смысле построение стандарта ISO 1328 гораздо проще и логичней. Вместе с тем ГОСТ 1643–81 во многом опирался на практику применений в СССР предыдущих изданий ГОСТ.

Подытоживая, повторим, что насущной является задача разработки нового базового стандарта взамен ГОСТ 1643–81, который отражал бы развитие теории и практики зубчатых передач за истекший период, не противоречил рекомендациям ISO и вместе с тем, по возможности, сохранял положительные стороны стандарта ГОСТ 1643-81. До сих пор ГОСТ 1643–81 и аналогичные ему стандарты на другие передачи широко применяются в нашей стране.

Поэтому, у стандарта, который придет на смену ГОСТ 1643–81, для удобства пользования желательно оставить тот же номер.

## **6. ВЛИЯНИЕ НОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС И ПЕРЕДАЧ НА ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Задавшись определенными значениями модуля зубьев  $m$ , делительного диаметра  $d$  и ширины зубчатого венца  $b$  произведем сравнение норм точности стандарта ГОСТ 1643–81 с аналогичными нормами стандарта ISO 1328 (ISO 1328–1:1995, ISO 1328-2:1997). Отечественный стандарт ГОСТ 1643–81 имеет большее количество показателей точности и иную структуру системы точности, нежели международный стандарт ISO 1328, поэтому будем использовать только те показатели точности, которые встречаются в обоих стандартах.

Контроль точности зубчатых колес производится при двух – и однопрофильном зацеплениях. При двухпрофильном или беззазорном зацеплении зубчатых колес поверхности обеих сторон зуба одного колеса находятся в одновременном контакте с поверхностями зуба другого. Данный метод контроля обладает рядом недостатков, и был раскритикован, в частности, ещё в 1975 году Б.А. Тайцем [48]. Тем не менее, поскольку метод прост и удобен, то он продолжает использоваться на предприятиях.

При подготовке материала главы 6 авторы исходили из принятой повсеместно у нас практики, а именно: величины допусков и предельных отклонений в ГОСТ 1643-81 проставляются непосредственно в таблицу параметров на чертеже зубчатого колеса, т.е. их практически относят к базовой оси колеса (только эта ось имеется и имеется на чертеже колеса).

То есть происходит сравнение степени точности зубчатых колёс в ГОСТ 1643-81 и рекомендациях ISO 1328. Именно результаты этого сравнения и составляют содержание главы 6. Что касается параметров точности передач с учетом точности всех элементов передачи (корпусов, плат, втулок, подшипников и т.д.), то такой расчёт возможен только на основе переработанного ГОСТ 21098-82 и при этом надо быть готовым к тому, что отечественные передачи сильно уступают зарубежным по параметрам точности.

## 6.1 Сравнительный анализ требований к параметрам точности зубчатых колёс и передач в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 по нормам кинематической точности

### Допуск на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса $F_i''$ (двухпрофильный контроль)

Исходные данные: диапазон изменения модуля  $m$  (1,5 ... 10) мм, делительный диаметр  $d=100$  мм.

Таблица 6.1

| $Q$ | $m=1,5$               |                           | $m=5$                 |                           | $m=10$                |                           |
|-----|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
|     | $F_i''$<br>(ISO 1328) | $F_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_i''$<br>(ISO 1328) | $F_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_i''$<br>(ISO 1328) | $F_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 5   | 19                    | 22                        | <b>31</b>             | 25                        | <b>40</b>             | 28                        |
| 6   | 27                    | 36                        | <b>44</b>             | 40                        | <b>57</b>             | 45                        |
| 7   | 39                    | 50                        | <b>62</b>             | 56                        | <b>80</b>             | 63                        |
| 8   | 55                    | 63                        | <b>88</b>             | 71                        | <b>114</b>            | 80                        |
| 9   | 77                    | 90                        | <b>124</b>            | 112                       | <b>161</b>            | 125                       |
| 10  | 109                   | 140                       | 176                   | 180                       | <b>227</b>            | 200                       |
| 11  | 154                   | 180                       | <b>248</b>            | 224                       | <b>321</b>            | 250                       |
| 12  | 218                   | 224                       | <b>351</b>            | 280                       | <b>454</b>            | 315                       |

Примечания для этой и всех последующих таблиц:

1.  $Q$  – степень точности.
2. Все значения погрешностей приведены в микрометрах.
3. Жирным выделены значения погрешностей в ISO 1328, которые больше, чем нормируемые ГОСТ 1643–81.

Изменим исходные данные, увеличив делительный диаметр на порядок: диапазон изменения модуля  $m$  (1,5 ... 10) мм, делительный диаметр  $d=1000$  мм.

Таблица 6.2

| $Q$ | $m=1,5$               |                           | $m=5$                 |                           | $m=10$                |                           |
|-----|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
|     | $F_i''$<br>(ISO 1328) | $F_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_i''$<br>(ISO 1328) | $F_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_i''$<br>(ISO 1328) | $F_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 5   | 38                    | 45                        | 50                    | 50                        | <b>59</b>             | 56                        |
| 6   | 54                    | 71                        | 70                    | 80                        | 83                    | 90                        |
| 7   | 76                    | 100                       | 99                    | 112                       | 118                   | 125                       |
| 8   | 107                   | 125                       | <b>141</b>            | 140                       | <b>166</b>            | 160                       |
| 9   | 152                   | 160                       | <b>199</b>            | 180                       | <b>235</b>            | 200                       |
| 10  | <b>215</b>            | 200                       | <b>281</b>            | 224                       | <b>333</b>            | 250                       |
| 11  | <b>304</b>            | 250                       | <b>398</b>            | 280                       | <b>471</b>            | 315                       |
| 12  | <b>429</b>            | 315                       | <b>562</b>            | 355                       | <b>665</b>            | 400                       |

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. При постоянном значении делительного диаметра ( $d=100$  мм в первом случае и  $d=1000$  мм во втором) и при увеличении модуля зубьев (с  $m=1,5$  мм до

$m=10$  мм) значения допуска на колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса в ISO 1328 становятся грубее, чем в ГОСТ 1643–81. Причем, при модуле зубьев  $m=10$  мм – во всём диапазоне степеней точности (для данной погрешности – от 5 до 12 степени). За небольшим исключением в 6 и 7 степени точности при  $d=1000$  мм.

### Допуск на накопленную погрешность шага зубчатого колеса $F_p$ (однопрофильный контроль)

Эта погрешность в ISO 1328–1 имеет название «полная накопленная погрешность шага» [5, с. 2, 8, 11–12].

Исходные данные: диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...1000) мм, модуль  $m = 1,5$  мм

Таблица 6.3

| $Q$ | $d=100$             |                         | $d=1000$            |                         |
|-----|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
|     | $F_p$<br>(ISO 1328) | $F_p$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_p$<br>(ISO 1328) | $F_p$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | <b>9</b>            | 8                       | 21                  | 25                      |
| 4   | <b>13</b>           | 12                      | 29                  | 40                      |
| 5   | 18                  | 20                      | 41                  | 63                      |
| 6   | 26                  | 32                      | 59                  | 100                     |
| 7   | 37                  | 45                      | 83                  | 140                     |
| 8   | 52                  | 63                      | 117                 | 200                     |

Изменим исходные данные, увеличив значение модуля: диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...2000) мм, модуль  $m = 10$  мм.

Таблица 6.4

| $Q$ | $d=100$             |                         | $d=1000$            |                         | $d=2000$            |                         |
|-----|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
|     | $F_p$<br>(ISO 1328) | $F_p$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_p$<br>(ISO 1328) | $F_p$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_p$<br>(ISO 1328) | $F_p$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | <b>10</b>           | 8                       | 22                  | 25                      | 33                  | 36                      |
| 4   | <b>14</b>           | 12                      | 31                  | 40                      | 46                  | 56                      |
| 5   | 20                  | 20                      | 44                  | 63                      | 65                  | 90                      |
| 6   | 29                  | 32                      | 62                  | 100                     | 92                  | 140                     |
| 7   | 41                  | 45                      | 87                  | 140                     | 130                 | 200                     |
| 8   | 58                  | 63                      | 123                 | 200                     | 184                 | 280                     |

Выводы по таблицам 6.3 и 6.4: при постоянном значении модуля зубьев ( $m=1,5$  мм в первом случае и  $m=10$  мм во втором случае) и при увеличении делительного диаметра (от  $d=100$  до  $d=1000$  мм в первом случае и от  $d=100$  до  $d=2000$  мм во втором случае) разность значений допусков на накопленную погрешность шага в ISO 1328 и ГОСТ 1643–81 увеличивается с повышением степени точности (с третьей до восьмой для данной погрешности). При больших значениях делительного диаметра ( $d=2000$  мм) в восьмой степени

точности допуск на накопленную погрешность шага в ГОСТ 1643–81 больше аналогичного допуска в ISO 1328 почти на 100 мкм. В высоких степенях точности (3 и 4) при диаметрах колес до  $d=2000$  мм величины допусков в обоих стандартах совпадают или незначительно отличаются (в пределах трех микрометров).

### Допуск на радиальное биение зубчатого венца $F_r$ (двухпрофильный контроль)

Исходные данные: диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...1000) мм, модуль  $m = 1,5$  мм.

Таблица 6.5

| $Q$ | $d=100$             |                         | $d=500$             |                         | $d=1000$            |                         |
|-----|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
|     | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | <b>7,5</b>          | 6                       | <b>13</b>           | 11                      | <b>17</b>           | 13                      |
| 4   | 10                  | 10                      | 18                  | 18                      | <b>23</b>           | 20                      |
| 5   | 15                  | 16                      | 26                  | 28                      | <b>33</b>           | 32                      |
| 6   | 21                  | 25                      | 36                  | 45                      | 47                  | 50                      |
| 7   | 29                  | 36                      | 51                  | 63                      | 66                  | 71                      |
| 8   | 42                  | 45                      | 73                  | 80                      | <b>94</b>           | 90                      |
| 9   | 59                  | 71                      | <b>103</b>          | 100                     | <b>133</b>          | 112                     |
| 10  | 83                  | 100                     | <b>146</b>          | 125                     | <b>188</b>          | 140                     |
| 11  | 118                 | 125                     | <b>206</b>          | 160                     | <b>266</b>          | 180                     |
| 12  | <b>167</b>          | 160                     | <b>291</b>          | 200                     | <b>376</b>          | 224                     |

Изменим исходные данные, увеличив значение модуля: диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...1000) мм, модуль  $m = 5$  мм.

Таблица 6.6

| $Q$ | $d=100$             |                         | $d=500$             |                         | $d=1000$            |                         |
|-----|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
|     | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 8                   | 7                       | 13                  | 13                      | <b>17</b>           | 14                      |
| 4   | 11                  | 11                      | 19                  | 20                      | <b>24</b>           | 22                      |
| 5   | 16                  | 18                      | 27                  | 32                      | 34                  | 36                      |
| 6   | 22                  | 28                      | 38                  | 50                      | 48                  | 56                      |
| 7   | 31                  | 40                      | 53                  | 71                      | 68                  | 80                      |
| 8   | 44                  | 50                      | 75                  | 90                      | 96                  | 100                     |
| 9   | 62                  | 80                      | 106                 | 112                     | <b>136</b>          | 125                     |
| 10  | 88                  | 125                     | <b>150</b>          | 140                     | <b>193</b>          | 160                     |
| 11  | 125                 | 160                     | <b>213</b>          | 180                     | <b>272</b>          | 200                     |
| 12  | 176                 | 200                     | <b>301</b>          | 224                     | <b>385</b>          | 250                     |

Изменим исходные данные, ещё раз увеличив значение модуля: диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...1000) мм, модуль  $m = 10$  мм.

Таблица 6.7

| $Q$ | $d=100$             |                         | $d=500$             |                         | $d=1000$            |                         |
|-----|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|
|     | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_r$<br>(ISO 1328) | $F_r$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 8                   | 8                       | 14                  | 14                      | <b>17</b>           | 16                      |
| 4   | 12                  | 13                      | 19                  | 22                      | 25                  | 25                      |
| 5   | 16                  | 20                      | 27                  | 36                      | 35                  | 40                      |
| 6   | 23                  | 32                      | 39                  | 56                      | 49                  | 63                      |
| 7   | 33                  | 45                      | 55                  | 80                      | 70                  | 90                      |
| 8   | 46                  | 56                      | 77                  | 100                     | 98                  | 112                     |
| 9   | 65                  | 90                      | 109                 | 125                     | 139                 | 140                     |
| 10  | 92                  | 140                     | 155                 | 160                     | <b>197</b>          | 180                     |
| 11  | 131                 | 180                     | <b>219</b>          | 200                     | <b>279</b>          | 224                     |
| 12  | 185                 | 224                     | <b>310</b>          | 250                     | <b>394</b>          | 280                     |

Выводы по таблицам 6.5–6.7: при постоянном значении модуля зубьев ( $m=1,5$  мм в первом случае,  $m=5$  – во втором и  $m=10$  мм в третьем случае) и при увеличении делительного диаметра (от  $d=100$  до  $d=1000$  мм) допуски на радиальное биение в ISO 1328 и ГОСТ 1643–81 в высоких степенях точности (3–4) примерно равны или незначительно отличаются (в пределах 3 мкм). С уменьшением модуля зубьев (от  $m=10$  мм до  $m=1,5$  мм) и увеличением делительного диаметра, значения допусков в ГОСТ 1643–81 даже меньше аналогичных в ISO 1328. В низких степенях точности (11–12) при диаметрах от 500 до 1000 мм значения допусков в ГОСТ 1643–81 меньше аналогичных в стандарте ISO 1328 во всех трех случаях. Причем, при уменьшении модуля зубьев (от  $m=10$  мм до  $m=1,5$  мм) и увеличении делительного диаметра, значения допусков в ГОСТ 1643–81 меньше аналогичных в ISO 1328 уже при 8 степени точности. При больших диаметрах и мелких модулях зубьев ( $d=1000$  мм,  $m=1,5$  мм в данном случае) разница допусков для 12 степени точности составляет 152 мкм.

## 6.2 Сравнительный анализ требований к параметрам точности зубчатых колёс и передач в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 по нормам плавности

**Допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе  $f_i''$  (двухпрофильный контроль)**

Исходные данные: диапазон изменения модуля  $m$  (1,5 ... 10) мм, делительный диаметр  $d=100$  мм.

Таблица 6.8

| $Q$ | $m=1,5$               |                           | $m=5$                 |                           | $m=10$                |                           |
|-----|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
|     | $f_i''$<br>(ISO 1328) | $f_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) | $f_i''$<br>(ISO 1328) | $f_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) | $f_i''$<br>(ISO 1328) | $f_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 5   | 4,5                   | 10                        | <b>15</b>             | 13                        | <b>24</b>             | 14                        |
| 6   | 6,5                   | 14                        | <b>22</b>             | 18                        | <b>34</b>             | 20                        |
| 7   | 9                     | 20                        | <b>31</b>             | 25                        | <b>48</b>             | 28                        |
| 8   | 13                    | 28                        | <b>44</b>             | 36                        | <b>67</b>             | 40                        |
| 9   | 18                    | 36                        | <b>62</b>             | 45                        | <b>95</b>             | 50                        |
| 10  | 26                    | 45                        | <b>87</b>             | 56                        | <b>135</b>            | 63                        |
| 11  | 36                    | 56                        | <b>123</b>            | 71                        | <b>191</b>            | 80                        |
| 12  | 51                    | 71                        | <b>174</b>            | 90                        | <b>269</b>            | 100                       |

Изменим исходные данные, как и в предыдущем случае: диапазон изменения модуля  $m$  (1,5 ... 10) мм, делительный диаметр  $d=1000$  мм.

Таблица 6.9

| $Q$ | $m=1,5$               |                           | $m=5$                 |                           | $m=10$                |                           |
|-----|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
|     | $f_i''$<br>(ISO 1328) | $f_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) | $f_i''$<br>(ISO 1328) | $f_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) | $f_i''$<br>(ISO 1328) | $f_i''$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 5   | 4,5                   | 14                        | 16                    | 16                        | <b>24</b>             | 18                        |
| 6   | 6,5                   | 20                        | 22                    | 22                        | <b>34</b>             | 25                        |
| 7   | 9,5                   | 28                        | 31                    | 32                        | <b>48</b>             | 36                        |
| 8   | 13                    | 40                        | 44                    | 45                        | <b>68</b>             | 50                        |
| 9   | 19                    | 50                        | <b>62</b>             | 56                        | <b>96</b>             | 63                        |
| 10  | 27                    | 63                        | <b>88</b>             | 71                        | <b>136</b>            | 80                        |
| 11  | 38                    | 80                        | <b>125</b>            | 90                        | <b>192</b>            | 100                       |
| 12  | 53                    | 100                       | <b>176</b>            | 112                       | <b>272</b>            | 125                       |

Выводы к таблицам 6.8 и 6.9: при постоянных значениях делительного диаметра ( $d=100$  мм в первом случае и  $d=1000$  мм во втором случае) и при увеличении модуля зубьев (от  $m=1,5$  мм до  $m=10$  мм) значения допуска на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе в ISO 1328 становятся грубее, чем в ГОСТ 1643–81. При  $d=100$  мм это наблюдается во всем диапазоне степеней точности (от 5 до 12 степени) уже при модуле  $m=5$  мм, а при  $d=1000$  – только для модуля  $m=10$  мм. При  $d=1000$  мм и  $m=5$  мм в средних степенях точности (5–8) значения допусков в ISO 1328 и ГОСТ 1643–81 практически совпадают. При больших значениях модуля зубьев ( $m=10$ ) в обоих случаях, в низких степенях точности (9–12) значения допуска на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе в стандарте ISO 1328 значительно больше (для степеней точности 11–12 – в 2–2,5 раза больше), чем в ГОСТ 1643–81.

## Допуск на погрешность профиля зуба $f_f$ . (однопрофильный контроль)

Эта погрешность в ISO 1328 имеет название «погрешность профиля зуба общая,  $F_\alpha$ » [5, с. 3–4, 8, 13–14].

Исходные данные: диапазон изменения модуля  $m$  (1,5 ... 10) мм, делительный диаметр  $d=100$  мм.

Таблица 6.10

| $Q$ | $m=1,5$                  |                         | $m=5$                    |                         | $m=10$                   |                         |
|-----|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|     | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 2,9                      | 3,6                     | <b>4,8</b>               | 4                       | <b>6</b>                 | 4,5                     |
| 4   | 4,1                      | 4,8                     | <b>6,5</b>               | 5,3                     | <b>8</b>                 | 6                       |
| 5   | 6                        | 6                       | <b>9,5</b>               | 7                       | <b>12</b>                | 8                       |
| 6   | <b>8,5</b>               | 8                       | <b>13</b>                | 10                      | <b>16</b>                | 12                      |
| 7   | <b>12</b>                | 11                      | <b>19</b>                | 14                      | <b>23</b>                | 17                      |
| 8   | <b>17</b>                | 14                      | <b>27</b>                | 20                      | <b>33</b>                | 22                      |

Изменим исходные данные, увеличив делительный диаметр: диапазон изменения модуля  $m$  (1,5 ... 10) мм, делительный диаметр  $d=500$  мм.

Таблица 6.11

| $Q$ | $m=1,5$                  |                         | $m=5$                    |                         | $m=10$                   |                         |
|-----|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|     | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 4,1                      | 4,5                     | <b>6</b>                 | 5                       | <b>7</b>                 | 5,5                     |
| 4   | 6                        | 6,5                     | <b>8,5</b>               | 7                       | <b>10</b>                | 7,5                     |
| 5   | 8,5                      | 9                       | <b>12</b>                | 10                      | <b>14</b>                | 11                      |
| 6   | 12                       | 12                      | <b>17</b>                | 14                      | <b>20</b>                | 16                      |
| 7   | 17                       | 17                      | <b>24</b>                | 20                      | <b>28</b>                | 24                      |
| 8   | 23                       | 25                      | <b>34</b>                | 28                      | <b>40</b>                | 36                      |

Изменим исходные данные, ещё раз увеличив делительный диаметр: диапазон изменения модуля  $m$  (1,5 ... 10) мм, делительный диаметр  $d=1000$  мм.

Таблица 6.12

| $Q$ | $m=1,5$                  |                         | $m=5$                    |                         | $m=10$                   |                         |
|-----|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
|     | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\alpha$<br>(ISO 1328) | $f_f$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 5                        | 5,5                     | <b>7</b>                 | 6                       | <b>8</b>                 | 6,5                     |
| 4   | 7                        | 8                       | <b>9,5</b>               | 9                       | <b>11</b>                | 9,5                     |
| 5   | 10                       | 11                      | <b>14</b>                | 13                      | <b>16</b>                | 14                      |
| 6   | 14                       | 17                      | <b>19</b>                | 18                      | <b>22</b>                | 20                      |
| 7   | 20                       | 24                      | <b>27</b>                | 28                      | <b>31</b>                | 30                      |
| 8   | 28                       | 36                      | <b>38</b>                | 40                      | <b>44</b>                | 45                      |

Выводы по таблицам 6.10–6.12: с увеличением модуля зубьев (от 1,5 мм до 10 мм) и при одинаковых значениях делительного диаметра ( $d=100$ , 500 и 1000 мм) разность допусков на погрешность профиля зуба в ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 увеличивается с ростом степени точности (от 3 до 8-й степени точности

для данной погрешности). Исключение составляет случай при делительном диаметре  $d=1000$  мм и модуле зубьев  $m=5$  мм для 7-й и 8-й степени точности, где допуск на погрешность в стандарте ISO 1328 меньше аналогичного в ГОСТ 1643–81 на 1-2 мкм. При модуле зубьев  $m=1,5$  мм и при значениях делительного диаметра  $d=100$  мм допуски на погрешность профиля зуба в ГОСТ 1643–81 меньше аналогичных допусков в ISO 1328 в средних степенях точности (6–8) или отличаются в большую сторону на 0,5–1 мкм в высоких степенях точности (3–5). При модуле зубьев  $m=1,5$  мм и значениях делительного диаметра  $d=500$  мм и  $d=1000$  мм допуски на погрешность профиля зуба в ISO 1328 меньше, чем в ГОСТ 1643-81 в пределах 0,4–2 мкм (при  $d=500$  мм) и 0,5–8 мкм (при  $d=1000$  мм) соответственно.

### Предельные отклонения шага $\pm f_{pt}$ (однопрофильный контроль)

Исходные: диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...1000) мм, модуль  $m = 1,5$  мм.

Таблица 6.13

| $Q$ | $d=100$                    |                                | $d=500$                    |                                | $d=1000$                   |                                |
|-----|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|     | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | <b>2,7</b>                 | 2,5                            | <b>3,3</b>                 | 3,2                            | <b>3,8</b>                 | 3,6                            |
| 4   | 3,8                        | 4                              | 4,7                        | 5                              | <b>5,5</b>                 | 5,5                            |
| 5   | 5,5                        | 6                              | 6,5                        | 8                              | 7,5                        | 9                              |
| 6   | 7,5                        | 10                             | 9,5                        | 13                             | 11                         | 14                             |
| 7   | 11                         | 14                             | 13                         | 18                             | 15                         | 20                             |
| 8   | 15                         | 20                             | 19                         | 25                             | 21                         | 28                             |
| 9   | 21                         | 28                             | 27                         | 36                             | 30                         | 40                             |
| 10  | 30                         | 40                             | 38                         | 50                             | 43                         | 56                             |
| 11  | 43                         | 56                             | 54                         | 71                             | 61                         | 80                             |
| 12  | 61                         | 80                             | 76                         | 100                            | 86                         | 112                            |

Изменим исходные данные, увеличив модуль и диапазон изменения делительного диаметра: диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...2000) мм, модуль  $m = 5$  мм.

Таблица 6.14

| $Q$ | $d=100$                    |                                | $d=500$                    |                                | $d=2000$                   |                                |
|-----|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|     | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 3,2                        | 3,2                            | <b>3,9</b>                 | 3,6                            | <b>5,5</b>                 | 4,5                            |
| 4   | 4,6                        | 5                              | 5,5                        | 5,5                            | <b>7,5</b>                 | 7                              |
| 5   | 6,5                        | 8                              | 8                          | 9                              | 11                         | 11                             |
| 6   | 9                          | 13                             | 11                         | 14                             | 15                         | 18                             |
| 7   | 13                         | 18                             | 16                         | 20                             | 21                         | 25                             |
| 8   | 18                         | 25                             | 22                         | 28                             | 30                         | 36                             |
| 9   | 26                         | 36                             | 31                         | 40                             | 43                         | 50                             |
| 10  | 36                         | 50                             | 44                         | 56                             | 61                         | 71                             |
| 11  | 52                         | 71                             | 62                         | 80                             | 86                         | 100                            |
| 12  | 73                         | 100                            | 88                         | 112                            | 122                        | 140                            |

Изменим ещё раз исходные данные, увеличив модуль вдвое: диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...2000) мм, модуль  $m=10$  мм.

Таблица 6.15

| $Q$ | $d=100$                    |                                | $d=500$                    |                                | $d=2000$                   |                                |
|-----|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|     | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) | $\pm f_{pt}$<br>(ISO 1328) | $\pm f_{pt}$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 3,7                        | 3,6                            | 4,4                        | 4,5                            | 6                          | 5                              |
| 4   | 5                          | 5,5                            | 6                          | 7                              | 8,5                        | 9                              |
| 5   | 7,5                        | 9                              | 8,5                        | 11                             | 12                         | 13                             |
| 6   | 10                         | 14                             | 12                         | 18                             | 17                         | 20                             |
| 7   | 15                         | 20                             | 17                         | 25                             | 23                         | 28                             |
| 8   | 21                         | 28                             | 25                         | 36                             | 33                         | 40                             |
| 9   | 30                         | 40                             | 35                         | 50                             | 47                         | 56                             |
| 10  | 42                         | 56                             | 49                         | 71                             | 66                         | 80                             |
| 11  | 59                         | 80                             | 70                         | 100                            | 94                         | 112                            |
| 12  | 84                         | 112                            | 99                         | 140                            | 132                        | 160                            |

Выводы по таблицам 6.13–6.15: в высоких степенях точности (3–5) для всех исследуемых значений делительного диаметра (от  $d=100$  мм до  $d=2000$  мм) и модуля зацепления (от  $m=1,5$  мм до  $m=10$  мм) разность предельных отклонений шага в ГОСТ 1643–81 и ISO 1328 не превышает 2,5 мкм. В остальных случаях (6–12 степень точности) величины предельных отклонений шага в ГОСТ 1643–81 больше, чем в ISO 1328.

### 6.3 Сравнительный анализ требований к параметрам точности зубчатых колёс и передач в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 по нормам контакта

#### Допуск на погрешность направления зуба $F_\beta$ (двухпрофильный контроль)

Эта погрешность в ISO 1328 имеет название «Погрешность винтовой линии зуба общая (погрешность направления зуба общая)» [5, с. 5–6, 8, 15–16].

Исходные данные: ширина зубчатого венца  $b=15$  мм, диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...1000) мм, модуль  $m = 1,5$  мм.

Таблица 6.16

| $Q$ | $d=100$                 |                             | $d=500$                 |                             | $d=1000$                |                             |
|-----|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|     | $F_\beta$<br>(ISO 1328) | $F_\beta$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\beta$<br>(ISO 1328) | $F_\beta$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\beta$<br>(ISO 1328) | $F_\beta$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 3,7                     | 4,5                         | 4,3                     | 4,5                         | <b>4,7</b>              | 4,5                         |
| 4   | 5,5                     | 5,5                         | <b>6</b>                | 5,5                         | <b>6,5</b>              | 5,5                         |
| 5   | <b>7,5</b>              | 7                           | <b>8,5</b>              | 7                           | <b>9,5</b>              | 7                           |
| 6   | <b>11</b>               | 9                           | <b>12</b>               | 9                           | <b>13</b>               | 9                           |
| 7   | <b>15</b>               | 11                          | <b>17</b>               | 11                          | <b>19</b>               | 11                          |
| 8   | <b>21</b>               | 18                          | <b>24</b>               | 18                          | <b>26</b>               | 18                          |
| 9   | <b>30</b>               | 28                          | <b>34</b>               | 28                          | <b>37</b>               | 28                          |
| 10  | 42                      | 45                          | <b>48</b>               | 45                          | <b>53</b>               | 45                          |
| 11  | 60                      | 71                          | 68                      | 71                          | <b>74</b>               | 71                          |
| 12  | 84                      | 112                         | 97                      | 112                         | 105                     | 112                         |

Изменим исходные данные, увеличив одновременно модуль и ширину зубчатого венца: ширина зубчатого венца  $b=100$  мм, диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...1000) мм, модуль  $m = 5$  мм.

Таблица 6.17

| $Q$ | $d=100$                 |                             | $d=500$                 |                             | $d=1000$                |                             |
|-----|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
|     | $F_\beta$<br>(ISO 1328) | $F_\beta$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\beta$<br>(ISO 1328) | $F_\beta$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_\beta$<br>(ISO 1328) | $F_\beta$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3   | 6                       | 6                           | <b>6,5</b>              | 6                           | <b>7</b>                | 6                           |
| 4   | <b>8,5</b>              | 8                           | <b>9,0</b>              | 8                           | <b>9,5</b>              | 8                           |
| 5   | <b>12</b>               | 10                          | <b>13</b>               | 10                          | <b>14</b>               | 10                          |
| 6   | <b>17</b>               | 12                          | <b>18</b>               | 12                          | <b>19</b>               | 12                          |
| 7   | <b>24</b>               | 16                          | <b>26</b>               | 16                          | <b>27</b>               | 16                          |
| 8   | <b>33</b>               | 25                          | <b>36</b>               | 25                          | <b>39</b>               | 25                          |
| 9   | <b>47</b>               | 40                          | <b>52</b>               | 40                          | <b>55</b>               | 40                          |
| 10  | <b>67</b>               | 63                          | <b>73</b>               | 63                          | <b>77</b>               | 63                          |
| 11  | 94                      | 100                         | <b>103</b>              | 100                         | <b>109</b>              | 100                         |
| 12  | 133                     | 160                         | 146                     | 160                         | 154                     | 160                         |

Ещё раз изменим исходные данные, увеличив все три ранее названных параметра: ширина зубчатого венца  $b=300$  мм, диапазон изменения делительного диаметра  $d$  (100...6000) мм, модуль  $m = 10$  мм.

Таблица 6.18

| Q  | d=100                     |                               | d=500                     |                               | d=6000                    |                               |
|----|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
|    | $F_{\beta}$<br>(ISO 1328) | $F_{\beta}$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_{\beta}$<br>(ISO 1328) | $F_{\beta}$<br>(ГОСТ 1643-81) | $F_{\beta}$<br>(ISO 1328) | $F_{\beta}$<br>(ГОСТ 1643-81) |
| 3  | 8                         | 11                            | 8,5                       | 11                            | <b>11</b>                 | 11                            |
| 4  | 12                        | 14                            | 12                        | 14                            | <b>16</b>                 | 14                            |
| 5  | 16                        | 18                            | 17                        | 18                            | <b>22</b>                 | 18                            |
| 6  | 23                        | 25                            | 25                        | 25                            | <b>32</b>                 | 25                            |
| 7  | <b>33</b>                 | 28                            | <b>35</b>                 | 28                            | <b>45</b>                 | 28                            |
| 8  | <b>46</b>                 | 45                            | <b>49</b>                 | 45                            | <b>63</b>                 | 45                            |
| 9  | 65                        | 71                            | 70                        | 71                            | <b>90</b>                 | 71                            |
| 10 | 92                        | 112                           | 98                        | 112                           | <b>127</b>                | 112                           |
| 11 | 130                       | 180                           | 139                       | 180                           | 179                       | 180                           |
| 12 | 184                       | 280                           | 197                       | 280                           | 253                       | 280                           |

Выводы по таблицам 6.16–6.18: при постоянных значениях модуля зубьев ( $m=1,5$  мм и  $m=5$  мм) и ширины зубчатого венца ( $b=15$  и  $b=100$  мм) для больших значений делительного диаметра (500-1000 мм), а также для случаев с параметрами  $d=6000$  мм,  $b=300$  мм,  $m=10$  мм и  $d=100$  мм,  $b=100$  мм,  $m=5$  мм величины допуска на погрешность направления зуба в ISO 1328 больше, чем в ГОСТ 1643–81 практически во всех степенях точности (3–12), за некоторыми исключениями в точных (3–я степень) и грубых (11–12) степенях точности. В остальных случаях допуски в ГОСТ 1643–81 больше, чем в ISO 1328, кроме средних степеней точности 5–9 при  $m=1,5$  мм,  $b=15$  мм,  $d=100$  мм и 7–8 степени точности при  $m=10$  мм,  $b=300$  мм,  $d=100$  и 500 мм. Стоит отметить, что в высоких степенях точности (3–4) разность допусков в ГОСТ 1643–81 и ISO 1328 во всех случаях не превышает 3 мкм.

### Выводы по таблицам 6.01–6.18

Мы можем принять нормы стандарта ISO 1328 для высоких степеней точности (3–4 степень) практически во всех диапазонах делительных диаметров и модулей при незначительной разнице (2–3 мкм) между величинами допусков в ISO 1328 и ГОСТ 1643–81. Исключение составляет накопленная погрешность шага зубчатого колеса  $F_{Pr}$ , для которой при больших значениях модуля зубьев и делительного диаметра, разница допусков в ISO 1328 и ГОСТ 1643–81 в 4–й степени точности составляет 10 мкм.

В грубых степенях точности (9–12 степень) при увеличении делительного диаметра и модуля зубьев ГОСТ 1643–81 дает гораздо меньшие значения допусков по сравнению с ISO 1328. Поэтому, можно констатировать, что наша отечественная промышленность уже сегодня является конкурентоспособной на мировом рынке при производстве зубчатых колёс значительных диаметров в грубых степенях точности. Мало того, мы уже сегодня работаем в условиях более жестких допусков на зубчатые колеса указанных параметров. Исключение составляют погрешность направления зуба  $F_{\beta r}$  и отклонения шага  $f_{Ptr}$ . У этих погрешностей допуски в низких степенях точности (9–12) в

стандарте ГОСТ 1643–81 превышают аналогичные допуски в стандарте ISO 1328.

В средних степенях точности (5–8) в ГОСТ 1643–81 по следующим нормам:

– погрешность шага зубчатого колеса  $F_{Pr}$ ;

– радиальное биение  $F_{rr}$ ;

– колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе  $f_{ir}''$

(для малых значений модуля зубьев  $m$ );

– колебание измерительного расстояния за оборот зубчатого колеса  $F_{ir}''$

(для малых значений модуля зубьев  $m$ );

– отклонения шага  $f_{Pr}$

величины допусков на погрешности больше, а нередко и значительно больше, чем в ISO 1328.

По нормам:

– погрешность направления зуба  $F_{\beta r}$ ;

– колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе  $f_{ir}''$

(для средних и больших значений модуля зубьев  $m$ );

– колебание измерительного расстояния за оборот зубчатого колеса  $F_{ir}''$

(для средних и больших значений модуля зубьев  $m$  при малых значениях делительного диаметра  $d$ );

– погрешность профиля зуба  $f_{fr}$  (для средних и больших значений модуля зубьев  $m$ ),

наоборот, допуски на эти погрешности в средних степенях точности (5–8) в ISO 1328 больше, чем в ГОСТ 1643–81, за исключением некоторых случаев, где разница между величинами допусков находится в пределах 3-х мкм.

Принять полностью нормы ISO 1328 мы не можем, потому что отдельные показатели в средних степенях точности (5–8) не будут обеспечены отечественными станками зубообрабатывающего производства, к тому же возникнут сложности и при измерении этих погрешностей. Смена оборудования сложное дело, а изменение отношения к технологии зубообработки - ещё сложнее [65].

Кроме того, у нас принято положение, согласно которому установленная степень точности по какому-либо комплексу показателей точности не может быть оспорена при измерении показателей другого комплекса. Хотя в научной литературе доказано, что многие из комплексов показателей точности не равнозначны. Особенно четко это показано в отношении норм контакта.

Необходимо создавать новый документ, учитывающий требования стандарта ISO 1328, в виду того, что базовый стандарт ГОСТ 1643–81 устарел и создавался до выхода рекомендаций ISO 1328 (ISO 1328–1:1995, ISO 1328–2:1997). Новый стандарт, тем не менее, не должен принимать требования ISO 1328 буквально, поскольку принятие рекомендации международного стандарта по всем параметрам фактически вынудит производителей зубчатых колес и передач, использующих отечественное зубообрабатывающее и

зубоизмерительное оборудование, прекратить выпуск продукции. Поэтому создание новых, производительных и эффективных средств контроля – задача важная и актуальная, но при всех изменениях принципов построения стандартов параметров точности, нельзя игнорировать сегодняшний уровень производства и контроля [50].

#### **6.4 Сравнительный анализ требований к параметрам точности зубчатых колёс и передач в стандартах ISO 1328, ISO/TR 10064–2:1996 и ГОСТ 1643-81 по нормам бокового зазора**

Вспользуемся величинами минимального бокового зазора, приведенными в Техническом Отчете «ISO/TR 10064–2:1996 Передачи зубчатые цилиндрические. Практическое руководство по приемке. Часть 2: Контроль суммарных радиальных отклонений, биения, толщины зуба и зазора» (далее – ISO/TR 10064-2:1996) [41] и сравним данные ISO и ГОСТ 1643-81 при варьировании модуля от 1,5 до 18 мм, межосевого расстояния от 50 до 1600 мм при различных видах сопряжения.

Сравнительный анализ позволит установить те диапазоны изменения основных параметров передач и те степени точности, в которых отечественная продукция уже соответствует нормам ISO.

##### **Минимальный гарантированный боковой зазор**

Величины минимального бокового зазора  $j_{bn\min}$ , приведенные в таблице стандарта в ISO/TR 10064-2:1996 можно рассчитать, пользуясь выражением:

$$j_{bn\min} = \left(\frac{2}{3}\right) [0,06 + 0,0005a_i + 0,03m_n], \quad (6.1)$$

где  $a_i$  – межосевое расстояние,  $m_n$  – модуль зубьев нормальный.

В ГОСТ 1643–81 гарантированный боковой зазор  $j_{n\min}$  определяется по формуле:

$$E_{Hs} = -\left(\frac{j_{n\min} + k_j}{4 \sin \alpha}\right) \Rightarrow j_{n\min} = -(4E_{Hs} \sin \alpha + k_j), \quad (6.2)$$

где  $E_{Hs}$  – наименьшее дополнительное смещение исходного контура;  $\alpha$  – угол зацепления;  $k_j$  – компенсация уменьшения бокового зазора, возникающего из-за погрешности изготовления зубчатых колёс и монтажа передачи.

Величина компенсации определяется по формуле:

$$k_j = \sqrt{(f_a 2 \sin \alpha)^2 + 2f_{pb}^2 + 2F_\beta^2 + (f_x \sin \alpha)^2 + (f_y \cos \alpha)^2}, \quad (6.3)$$

где  $f_a$  – предельное отклонение межосевого расстояния,  $f_{pb}$  – предельное отклонение шага зацепления,  $F_\beta$  – допуск на погрешность направления зуба,  $f_x$  – допуск на параллельность осей,  $f_y$  – допуск на перекося осей.

Произведём сравнение величин минимального бокового зазора в ISO/TR 10064–2:1996 и ГОСТ 1643–81, приняв во внимание, что в ISO/TR 10064–2:1996 величина зазора зависит от модуля зубьев  $m_n$  и минимального межосевого расстояния  $a_i$ , в то время как в нашем стандарте – от вида сопряжения и межосевого расстояния  $a_w$ . Сначала возьмём вид сопряжения С. В ячейке таблицы жирным выделены значения зазора, взятые из ГОСТ 1643–81.

Таблица 6.19

Вид сопряжения С

| $m_n$ ,<br>мм | Минимальное межосевое расстояние $a_i$ , мм |                  |                   |                   |                   |                   |
|---------------|---|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|               | 50  | 100              | 200               | 400               | 800               | 1600              |
|               | МКМ   |                  |                   |                   |                   |                   |
| 1,5           | 90<br><b>74</b>                             | 110<br><b>87</b> | –                 | –                 | –                 | –                 |
| 2             | 100<br><b>74</b>                            | 120<br><b>87</b> | 150<br><b>115</b> | –                 | –                 | –                 |
| 3             | 120<br><b>74</b>                            | 140<br><b>87</b> | 170<br><b>115</b> | 240<br><b>140</b> | –                 | –                 |
| 5             | –   | 180<br><b>87</b> | 210<br><b>115</b> | 280<br><b>140</b> | –                 | –                 |
| 8             | –   | 240<br><b>87</b> | 270<br><b>115</b> | 340<br><b>140</b> | 470<br><b>200</b> | –                 |
| 12            | –   | –                | 350<br><b>115</b> | 420<br><b>140</b> | 550<br><b>200</b> | –                 |
| 18            | –   | –                | –                 | 540<br><b>140</b> | 670<br><b>200</b> | 940<br><b>310</b> |

Как видно из табл. 6.19 во всех диапазонах модуля зубьев и межосевого расстояния значения гарантированного бокового зазора в ГОСТ 1643–81 меньше соответствующих величин в ISO/TR 10064–2:1996. Причём, с увеличением  $m_n$  и  $a_i$  разница значительно возрастает.

Теперь возьмем вид сопряжения В.

Таблица 6.20

## Вид сопряжения В

| $m_n$ ,<br>мм | Минимальное межосевое расстояние $a_i$ , мм |                   |                   |                   |                   |                   |
|---------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|               | 50  | 100               | 200               | 400               | 800               | 1600              |
|               | мкм   |                   |                   |                   |                   |                   |
| 1,5           | 90<br><b>120</b>                            | 110<br><b>140</b> | –                 | –                 | –                 | –                 |
| 2             | 100<br><b>120</b>                           | 120<br><b>140</b> | 150<br><b>185</b> | –                 | –                 | –                 |
| 3             | 120<br><b>120</b>                           | 140<br><b>140</b> | 170<br><b>185</b> | 240<br><b>230</b> | –                 | –                 |
| 5             | –   | 180<br><b>140</b> | 210<br><b>185</b> | 280<br><b>230</b> | –                 | –                 |
| 8             | –   | 240<br><b>140</b> | 270<br><b>185</b> | 340<br><b>230</b> | 470<br><b>320</b> | –                 |
| 12            | –   | –                 | 350<br><b>185</b> | 420<br><b>230</b> | 550<br><b>320</b> | –                 |
| 18            | –   | –                 | –                 | 540<br><b>230</b> | 670<br><b>320</b> | 940<br><b>500</b> |

Как видно из табл. 6.20 при модуле зубьев  $m_n=3$  мм величины минимального бокового зазора в ISO/TR 10064–2:1996 и гарантированного бокового зазора в ГОСТ 1643–81 практически совпадают. Разница между величинами бокового зазора в обоих стандартах составляет 10–15 мкм. При  $m_n < 3$  мм минимальный боковой зазор по ISO/TR 10064-2:1996 меньше, чем в ГОСТ 1643–81, при  $m_n > 3$  мм – больше.

И, наконец, вид сопряжения А.

Таблица 6.21

## Вид сопряжения А

| $m_n$ ,<br>мм | Минимальное межосевое расстояние $a_i$ , мм |                   |                   |                   |                   |                   |
|---------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|               | 50  | 100               | 200               | 400               | 800               | 1600              |
|               | мкм   |                   |                   |                   |                   |                   |
| 1,5           | 90<br><b>190</b>                            | 110<br><b>220</b> | –                 | –                 | –                 | –                 |
| 2             | 100<br><b>190</b>                           | 120<br><b>220</b> | 150<br><b>290</b> | –                 | –                 | –                 |
| 3             | 120<br><b>190</b>                           | 140<br><b>220</b> | 170<br><b>290</b> | 240<br><b>360</b> | –                 | –                 |
| 5             | –   | 180<br><b>220</b> | 210<br><b>290</b> | 280<br><b>360</b> | –                 | –                 |
| 8             | –   | 240<br><b>220</b> | 270<br><b>290</b> | 340<br><b>360</b> | 470<br><b>500</b> | –                 |
| 12            | –   | –                 | 350<br><b>290</b> | 420<br><b>360</b> | 550<br><b>500</b> | –                 |
| 18            | –   | –                 | –                 | 540<br><b>360</b> | 670<br><b>500</b> | 940<br><b>780</b> |

Как видно из табл. 6.21 при модуле зубьев  $m_n=8$  мм разница между величинами зазора в ISO и ГОСТ составляет 20–30 мкм. При  $m_n<8$  мм минимальный боковой зазор по ISO/TR 10064–2:1996 меньше, чем в ГОСТ 1643–81, при  $m_n>8$  мм – больше.

### Предельное отклонение межосевого расстояния

Предельное отклонение межосевого расстояния  $f_a$  в ГОСТ 1643–81 [1, с. 61] определяется по формуле:

$$f_a = \pm 0,5 j_{n\min}, \quad (6.4)$$

Воспользуемся данной формулой и определим значения  $f_a$ , взяв в качестве  $j_{n\min}$  числовые значения минимального бокового зазора из стандарта ISO/TR 100064–2:1996. Сведем результаты в таблицу. По ячейке: верхнее число – значение  $f_a$ , рассчитанное по данным ISO/TR 100064–2:1996, нижнее, выделенное жирным, – значение  $f_a$  по ГОСТ 1643–81.

Сначала возьмём вид сопряжения С.

Таблица 6.22

Вид сопряжения С

| $m_n$ ,<br>мм | Минимальное межосевое расстояние $a_i$ , мм |           |           |           |            |            |
|---------------|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
|               | 50  | 100       | 200       | 400       | 800        | 1600       |
|               | мкм   |           |           |           |            |            |
| 1,5           | 45  | 55        | –         | –         | –          | –          |
|               | <b>35</b>                                   | <b>45</b> | –         | –         | –          | –          |
| 2             | 50  | 60        | 75        | –         | –          | –          |
|               | <b>35</b>                                   | <b>45</b> | <b>55</b> | –         | –          | –          |
| 3             | 60  | 70        | 85        | 120       | –          | –          |
|               | <b>35</b>                                   | <b>45</b> | <b>55</b> | <b>70</b> | –          | –          |
| 5             | –   | 90        | 105       | 140       | –          | –          |
|               | –   | <b>45</b> | <b>55</b> | <b>70</b> | –          | –          |
| 8             | –   | 120       | 135       | 170       | 235        | –          |
|               | –   | <b>45</b> | <b>55</b> | <b>70</b> | <b>100</b> | –          |
| 12            | –   | –         | 175       | 210       | 275        | –          |
|               | –   | –         | <b>55</b> | <b>70</b> | <b>100</b> | –          |
| 18            | –   | –         | –         | 270       | 335        | 470        |
|               | –   | –         | –         | <b>70</b> | <b>100</b> | <b>160</b> |

Как видно из табл. 4 при всех значениях модуля зубьев  $m_n$  и минимального межосевого расстояния  $a_i$  величины предельного отклонения межосевого расстояния в ГОСТ 1643–81 меньше соответствующих величин в ISO/TR 10064–2:1996. При модуле зубьев  $m_n=1,5$  мм разница между величинами

предельного отклонения межосевого расстояния в ISO/TR 10064–2:1996 и ГОСТ 1643–81 составляет 10 мкм. При  $m_n > 1,5$  мм, с увеличением  $m_n$  и  $a_i$ , разница значений  $f_a$  в обоих стандартах возрастает.

Теперь возьмем вид сопряжения В.

Таблица 6.23

Вид сопряжения В

| $m_n$ ,<br>мм | Минимальное межосевое расстояние $a_i$ , мм |                  |                  |                   |                   |                   |
|---------------|---|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|               | 50  | 100              | 200              | 400               | 800               | 1600              |
|               | мкм   |                  |                  |                   |                   |                   |
| 1,5           | 45<br><b>60</b>                             | 55<br><b>70</b>  | –                | –                 | –                 | –                 |
| 2             | 50<br><b>60</b>                             | 60<br><b>70</b>  | 75<br><b>90</b>  | –                 | –                 | –                 |
| 3             | 60<br><b>60</b>                             | 70<br><b>70</b>  | 85<br><b>90</b>  | 120<br><b>110</b> | –                 | –                 |
| 5             | –   | 90<br><b>70</b>  | 105<br><b>90</b> | 140<br><b>110</b> | –                 | –                 |
| 8             | –   | 120<br><b>70</b> | 135<br><b>90</b> | 170<br><b>110</b> | 235<br><b>160</b> | –                 |
| 12            | –   | –                | 175<br><b>90</b> | 210<br><b>110</b> | 275<br><b>160</b> | –                 |
| 18            | –   | –                | –                | 270<br><b>110</b> | 335<br><b>160</b> | 470<br><b>250</b> |

Как видно из табл. 6.23 при модуле зубьев от  $m_n=1,5$  мм до  $m_n=3$  мм разница между величинами предельного отклонения межосевого расстояния в ISO/TR 10064–2:1996 и ГОСТ 1643–81 составляет не более 15 мкм. При  $m_n > 3$  мм значения величины предельного отклонения межосевого расстояния в ГОСТ 1643–81 меньше соответствующих величин в ISO/TR 10064–2:1996. Причём, с увеличением  $m_n$  и  $a_i$  разница значительно возрастает.

И вид сопряжения А.

## Вид сопряжения А

| $m_n$ ,<br>мм | Минимальное межосевое расстояние $a_i$ , мм |                   |                   |                   |                   |                   |
|---------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|               | 50  | 100               | 200               | 400               | 800               | 1600              |
|               | МКМ   |                   |                   |                   |                   |                   |
| 1,5           | 45<br><b>100</b>                            | 55<br><b>110</b>  | –                 | –                 | –                 | –                 |
| 2             | 50<br><b>100</b>                            | 60<br><b>110</b>  | 75<br><b>140</b>  | –                 | –                 | –                 |
| 3             | 60<br><b>100</b>                            | 70<br><b>110</b>  | 85<br><b>140</b>  | 120<br><b>180</b> | –                 | –                 |
| 5             | –   | 90<br><b>110</b>  | 105<br><b>140</b> | 140<br><b>180</b> | –                 | –                 |
| 8             | –   | 120<br><b>110</b> | 135<br><b>140</b> | 170<br><b>180</b> | 235<br><b>250</b> | –                 |
| 12            | –   | –                 | 175<br><b>140</b> | 210<br><b>180</b> | 275<br><b>250</b> | –                 |
| 18            | –   | –                 | –                 | 270<br><b>180</b> | 335<br><b>250</b> | 470<br><b>400</b> |

Как видно из табл. 6 при модуле зубьев  $m_n=8$  мм разница между величинами предельного отклонения межосевого расстояния в ISO/TR 10064-2:1996 и ГОСТ 1643-81 составляет не более 15 мкм. При  $m_n < 8$  мм значения величины предельного отклонения межосевого расстояния в ГОСТ 1643-81 больше соответствующих величин в ISO/TR 10064-2:1996, при  $m_n > 8$  мм – меньше.

### Верхнее предельное отклонение измерительного межосевого расстояния

Верхнее предельное отклонение измерительного межосевого расстояния (для колёс с внешними зубьями)  $E_{a''s}$  в соответствии с ГОСТ 1643–81 определяется по формуле [1, с. 44]:

$$E_{a''s} = + f_i'' , \quad (6.5)$$

где  $f_i''$  – допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе.

В стандарте ISO 1328–2:1997  $f_i''$  определяется по формуле [6, с. 4]:

$$f_i'' = 2,96m_n + 0,01\sqrt{d} + 0,8 , \quad (6.6)$$

где  $d$  – делительный диаметр.

Сравним величины  $f_i''$  в ISO 1328–2:1997 и ГОСТ 1643–81. Результаты сведем в таблицу. По ячейке: верхнее число – значение  $f_i''$  по данным ISO 1328–2:1997, нижнее, выделенное жирным, – значение  $f_i''$  по ГОСТ 1643–81.

Таблица 6.25

Колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе

| $m_n$ ,<br>мм    | Делительный<br>диаметр,<br>$d$ , мм | Степень точности |           |           |           |           |           |            |            |
|------------------|-------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
|                  |                                     | 5                | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        | 11         | 12         |
|                  |                                     | МКМ              |           |           |           |           |           |            |            |
| от 1,5<br>до 2,5 | от 50<br>до 125                     | 6,5              | 9,5       | 13        | 19        | 26        | 37        | 53         | 75         |
|                  |                                     | <b>10</b>        | <b>14</b> | <b>20</b> | <b>28</b> | <b>36</b> | <b>45</b> | <b>56</b>  | <b>71</b>  |
|                  |                                     | 15               | 22        | 31        | 44        | 62        | 87        | 123        | 174        |
| св. 4<br>до 6    | от 50<br>до 125                     | <b>13</b>        | <b>18</b> | <b>25</b> | <b>36</b> | <b>45</b> | <b>56</b> | <b>71</b>  | <b>90</b>  |
| св. 6<br>до 10   |                                     | 24               | 34        | 48        | 67        | 95        | 135       | 191        | 269        |
| от 1,5<br>до 2,5 | св. 125<br>до 280                   | <b>14</b>        | <b>20</b> | <b>28</b> | <b>40</b> | <b>50</b> | <b>63</b> | <b>80</b>  | <b>100</b> |
| от 1,5<br>до 2,5 |                                     | 6,5              | 9,5       | 13        | 19        | 27        | 38        | 53         | 75         |
| св. 4<br>до 6    |                                     | <b>11</b>        | <b>16</b> | <b>22</b> | <b>32</b> | <b>40</b> | <b>50</b> | <b>63</b>  | <b>80</b>  |
| св. 4<br>до 6    | св. 125<br>до 280                   | 15               | 22        | 31        | 44        | 62        | 87        | 124        | 175        |
| св. 6<br>до 10   |                                     | <b>14</b>        | <b>20</b> | <b>28</b> | <b>40</b> | <b>50</b> | <b>63</b> | <b>80</b>  | <b>100</b> |
| св. 6<br>до 10   | св. 280<br>до 560                   | 24               | 34        | 48        | 67        | 95        | 135       | 191        | 270        |
| от 1,5<br>до 2,5 |                                     | <b>16</b>        | <b>22</b> | <b>32</b> | <b>45</b> | <b>56</b> | <b>71</b> | <b>90</b>  | <b>112</b> |
| св. 4<br>до 6    |                                     | 6,5              | 9,5       | 13        | 19        | 27        | 38        | 54         | 76         |
| св. 4<br>до 6    | св. 280<br>до 560                   | <b>13</b>        | <b>18</b> | <b>25</b> | <b>36</b> | <b>45</b> | <b>56</b> | <b>71</b>  | <b>90</b>  |
| св. 6<br>до 10   |                                     | 15               | 22        | 31        | 44        | 62        | 88        | 124        | 175        |
| св. 6<br>до 10   | св. 560<br>до 1000                  | <b>14</b>        | <b>20</b> | <b>28</b> | <b>40</b> | <b>50</b> | <b>63</b> | <b>80</b>  | <b>100</b> |
| от 1,5<br>до 2,5 |                                     | 7                | 9,5       | 14        | 19        | 27        | 38        | 54         | 77         |
| св. 4<br>до 6    |                                     | <b>14</b>        | <b>20</b> | <b>28</b> | <b>40</b> | <b>50</b> | <b>63</b> | <b>80</b>  | <b>100</b> |
| св. 4<br>до 6    | св. 560<br>до 1000                  | 16               | 22        | 31        | 44        | 62        | 88        | 125        | 176        |
| св. 6<br>до 10   |                                     | <b>16</b>        | <b>22</b> | <b>32</b> | <b>45</b> | <b>56</b> | <b>71</b> | <b>90</b>  | <b>112</b> |
| св. 6<br>до 10   | св. 560<br>до 1000                  | 24               | 34        | 48        | 68        | 96        | 136       | 192        | 272        |
| св. 6<br>до 10   |                                     | <b>18</b>        | <b>25</b> | <b>36</b> | <b>50</b> | <b>63</b> | <b>80</b> | <b>100</b> | <b>125</b> |

Из табл. 6.25 видно, что в каждом диапазоне делительных диаметров в малых модулях зубьев  $m_n$  (от 1,5 до 2,5 мм) величины  $f_i''$  в обоих стандартах отличаются не более чем на 25–26 мкм во всех рассматриваемых степенях точности (5–12). При модуле зубьев  $m_n$  свыше 4 и до 6 мм эта тенденция сохраняется для степеней точности с 5 по 9 (10). При  $m_n$  свыше 6 и до 10 мм величины  $f_i''$  в обоих стандартах отличаются не более чем на 27 мкм в степенях точности с 5 по 8. С увеличением модуля зубьев  $m_n$  в более грубых степенях точности (9–12) значение величины  $f_i''$  в ISO 1328–2:1997 становится больше аналогичной величины в ГОСТ 1643–81.

## Выводы по таблицам 6.19–6.25

Величины гарантированного бокового зазора  $j_{n\min}$  в ГОСТ 1643–81 частично совпадают с аналогичными величинами в стандарте ISO/TR 10064–2:1996 при модуле  $m_n=3$  мм для вида сопряжения В и при модуле  $m_n=8$  мм для вида сопряжения А. Для вида сопряжения С во всех диапазонах модуля зубьев и межосевого расстояния, для вида сопряжения В (при  $m_n$  от 5 до 18 мм) и для вида сопряжения А (при  $m_n$  от 12 до 18 мм) значения гарантированного бокового зазора в ГОСТ 1643–81 меньше соответствующих величин в ISO/TR 10064–2:1996. Таким образом, в данном случае при некоторых условиях наш стандарт ГОСТ 1643–81 задает более жёсткие условия нормирования бокового зазора, чем ISO/TR 10064–2:1996.

Величины предельного отклонения межосевого расстояния  $f_a$  различаются с небольшой с разницей в обоих стандартах в видах сопряжения С (при  $m_n=1,5$  мм), В (при  $m_n$  от 1,5 до 3 мм) и А (при  $m_n=8$  мм). Для видов сопряжения С и В во всех остальных случаях и для вида сопряжения А (при  $m_n$  от 12 до 18 мм) величины предельного отклонения межосевого расстояния в ГОСТ 1643–81 меньше соответствующих величин в ISO/TR 10064–2:1996. Таким образом, в данном случае мы уже сегодня работаем в условиях более жёстких требований, чем минимальные требования ISO/TR 10064–2:1996.

При сравнении величин верхнего предельного отклонения измерительного межосевого расстояния  $E_{a''s}$  (сравнивался параметр  $f_i''$  – допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе), выяснилось, что их значения при малых модулях (от 1,5 до 2,5 мм) различаются в обоих стандартах не более чем на 25–26 мкм. В большей части остальных случаев значения величин  $f_i''$  в ГОСТ 1643–81 меньше соответствующих величин в ISO 1328–2:1997, что снова говорит о преимуществе ГОСТ 1643–81 в данном вопросе.

За счет наличия видов сопряжения наш стандарт ГОСТ 1643–81 создаёт значительную вариативность в нормировании бокового зазора, что позволяет детализировать рекомендации ISO, но, в принципе, им не противоречит. В формуле (6.1) член  $0,03m_n$  расширяет боковой зазор в передаче в зависимости от модуля, что должно быть учтено при разработке стандарта нового поколения.

Стандарт ISO/TR 10064–2:1996 более полно учитывает условия эксплуатации зубчатых передач [41, с. 34]. Использование видов сопряжения в ГОСТ 1643–81 расширяет возможности конструктора в части назначения гарантированного бокового зазора  $j_{n\min}$  и допуска на боковой зазор  $T_{jn}$ . Однако особенно в области малых значений величины  $T_{jn}$  следует всё время проверять возможность обеспечения этого параметра используемой технологией изготовления зубьев.

## 7. КОМБИНИРОВАНИЕ НОРМ ТОЧНОСТИ

ГОСТ 1643-81 в пункте 1.2 для каждой степени точности зубчатых колес и передач устанавливает нормы:

- кинематической точности,
- плавности работы,
- контакта зубьев зубчатых колес в передачах [1, с. 1].

Пункт 1.3 допускает комбинирование норм кинематической точности, норм плавности работы и норм контакта зубьев зубчатых колес и передач разных степеней точности. Далее устанавливаются виды сопряжения зубчатых колес в передачах и виды допуска на боковой зазор. [1, с. 1]

Соответствие между видом сопряжения зубчатых колес в передаче и видом допуска на боковой зазор допускается изменять.

Установленные шесть классов отклонения межосевого расстояния обозначаем в порядке убывания точности римскими цифрами от I до VI. Казалось бы, конструктор должен поставить все упомянутые нормы на чертеже колес входящих в передачу или на чертеже передачи. На деле, в ста процентах практических случаев нормы стандартно проставляются на чертеже колеса, а что получается в передаче, мы могли бы рассчитать, если бы стандарт где-то упоминал о схеме передачи и задавал нормы точности на ее незубчатые элементы: корпуса, платы, подшипники, валы и т.д.

Согласно имеющемуся в ГОСТе примечанию 3 к таблице 6 «допуск на кинематическую погрешность зубчатой передачи  $F'_{i0}$  равен сумме допусков на кинематическую погрешность её зубчатых колёс» [1, с. 13]. Таким образом, совершенно игнорируются погрешности незубчатых элементов передачи. Мало того, не учитывается передаточное отношение передачи, тоже соотношение чисел зубьев, возможная вставка эксцентриситетов при сборке и т.д. Однако каждому практику, особенно работающему в области приборостроения, известно, что только за счет смены класса точности подшипников в передаче ее кинематическая погрешность может быть изменена на порядок.

Далее в пунктах 5 и 6 примечаний обсуждается комбинирование норм кинематической точности и плавности работы из разных степеней точности. В действительности в весьма редких случаях, при значительных передаточных отношениях, возможно изготовление шестерни и колеса по одной степени точности по всем четырем упомянутым нормам: кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев передачи и бокового зазора. В этом случае с самого начала возникает затруднение в обозначении колес и передач.

Рассмотрим теперь позицию ГОСТ 21098-82. Этот стандарт, без какого бы то ни было лукавства признает общепринятую практику: нормы точности, представленные в ГОСТ 1643-81, переносятся в таблицы чертежей зубчатых колес без каких бы то ни было изменений, т.е. параметры предусмотренные стандартом для колес на рабочих осях, проставляются на чертеже относительно базовых (технологических) осей. Такая позиция абсолютно оправдана, поскольку одно из основных положений ЕСКД гласит: нормы точности

ставятся относительно оси имеющейся на чертеже. На чертеже же колеса никакой рабочей оси нет и быть не может.

Далее ГОСТ 21098-82 предлагает принципиально верный, но недоработанный метод определения параметров передачи с учетом погрешностей монтажа.

Таким образом, мы видим две принципиально разные позиции стандартов относительно параметров точности зубчатых передач на рабочих осях. Причем ГОСТ 21098-82 просто считается с практическим применением нормативной документации.

Теперь посмотрим, как соблюдаются параметры точности на практике. Не снимая колеса со станка, мы измеряем либо среднюю длину общей нормали либо размер по роликам, устанавливая, таким образом, конечное, на момент измерения, положение исходного контура. Таким образом, из перечисленных выше четырех норм мы руководствуемся только одной, а именно нормой бокового зазора. При этом, не говоря уже о нормах точности, мы изменяем некоторые геометрические параметры. В наибольшей степени изменяются коэффициенты смещения при нарезании шестерни и колеса передачи.

В качестве примера рассмотрим нарезание передач при  $z_1=12$ ,  $z_2=12$ , 50, и 100 последовательно, при  $m=1$ , 5 и 10 мм. Отдельно рассмотрим эти передачи, выполненные по степени точности 7–С, 7–А, а затем по степени точности 12–А. Причем в передачах  $z_1=z_2=12$ ,  $x_1=x_2=0,3$ , а во всех других случаях:  $x_1=-x_2=0,3$ .

Рассмотрим формулу для определения длины общей нормали  $W$ , приведенную в ГОСТ 16532–70, табл. 3, п. 5 [19, с.81]. Из этой формулы, выразим коэффициент смещения:

$$x = \frac{\frac{W}{m \cdot \cos \alpha} - \pi \cdot (z_w - 0,5) - z \cdot \operatorname{inv} \alpha_t}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (7.1)$$

где  $z_w$  – округленное до ближайшего целого числа значение расчетного числа зубьев в длине общей нормали;  $\alpha_t$  – угол профиля торцовый;  $\alpha$  – угол профиля.

Подставив в эту формулу вычисленные максимальное и минимальное допускаемые значения средней длины общей нормали  $W_{min}$  и  $W_{max}$ , получим максимальное и минимальное значения коэффициента смещения исходного контура соответственно, которые фактически могут получиться при зубообработке.

Результаты вычислений для степени точности 7–С помещены в таблицу 7.1, степени 7–А – в таблицу 7.2 и степени 12–А – в таблицу 7.3, соответственно.

Таблица 7.1

| 7-С (ГОСТ 1643– 81) |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|
| <i>m</i> , MM       | $z_1=12$   | $z_2=12$   | $z_2=50$   | $z_2=100$  |
| 1                   | $x_{1\max}=0,206$<br>$x_{1\min}=0,133$<br>$x_{1\max}\cdot m=0,206$<br>$x_{1\min}\cdot m=0,133$ | $x_{2\max}=0,206$<br>$x_{2\min}=0,133$<br>$x_{2\max}\cdot m=0,206$<br>$x_{2\min}\cdot m=0,133$ | $x_{2\max}=-0,394$<br>$x_{2\min}=-0,467$<br>$x_{2\max}\cdot m=-0,394$<br>$x_{2\min}\cdot m=-0,467$ | $x_{2\max}=-0,394$<br>$x_{2\min}=-0,467$<br>$x_{2\max}\cdot m=-0,394$<br>$x_{2\min}\cdot m=-0,467$ |
| 5                   | $x_{1\max}=0,281$<br>$x_{1\min}=0,267$<br>$x_{1\max}\cdot m=1,406$<br>$x_{1\min}\cdot m=1,333$ | $x_{1\max}=0,281$<br>$x_{1\min}=0,267$<br>$x_{1\max}\cdot m=1,406$<br>$x_{1\min}\cdot m=1,333$ | $x_{2\max}=-0,327$<br>$x_{2\min}=-0,348$<br>$x_{2\max}\cdot m=-1,637$<br>$x_{2\min}\cdot m=-1,740$ | $x_{2\max}=-0,340$<br>$x_{2\min}=-0,437$<br>$x_{2\max}\cdot m=-1,702$<br>$x_{2\min}\cdot m=-1,833$ |
| 10                  | $x_{1\max}=0,288$<br>$x_{1\min}=0,288$<br>$x_{1\max}\cdot m=2,882$<br>$x_{1\min}\cdot m=2,794$ | $x_{1\max}=0,288$<br>$x_{1\min}=0,288$<br>$x_{1\max}\cdot m=2,882$<br>$x_{1\min}\cdot m=2,794$ | $x_{2\max}=-0,320$<br>$x_{2\min}=-0,333$<br>$x_{2\max}\cdot m=-3,202$<br>$x_{2\min}\cdot m=-3,333$ | $x_{2\max}=-0,327$<br>$x_{2\min}=-0,343$<br>$x_{2\max}\cdot m=-3,266$<br>$x_{2\min}\cdot m=-3,427$ |

Таблица 7.2

| 7-А (ГОСТ 1643– 81) |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|
| <i>m</i> , MM       | $z_1=12$   | $z_2=12$   | $z_2=50$   | $z_2=100$  |
| 1                   | $x_{1\max}=0,082$<br>$x_{1\min}=-0,049$<br>$x_{1\max}\cdot m=0,082$<br>$x_{1\min}\cdot m=-0,049$ | $x_{1\max}=0,082$<br>$x_{1\min}=-0,049$<br>$x_{1\max}\cdot m=0,082$<br>$x_{1\min}\cdot m=-0,049$ | $x_{2\max}=-0,518$<br>$x_{2\min}=-0,639$<br>$x_{2\max}\cdot m=-0,518$<br>$x_{2\min}\cdot m=-0,639$ | $x_{2\max}=-0,576$<br>$x_{2\min}=-0,708$<br>$x_{2\max}\cdot m=-0,576$<br>$x_{2\min}\cdot m=-0,708$ |
| 5                   | $x_{1\max}=0,256$<br>$x_{1\min}=0,230$<br>$x_{1\max}\cdot m=1,282$<br>$x_{1\min}\cdot m=1,151$   | $x_{1\max}=0,256$<br>$x_{1\min}=0,230$<br>$x_{1\max}\cdot m=1,282$<br>$x_{1\min}\cdot m=1,151$   | $x_{2\max}=-0,363$<br>$x_{2\min}=-0,395$<br>$x_{2\max}\cdot m=-1,813$<br>$x_{2\min}\cdot m=-1,974$ | $x_{2\max}=-0,363$<br>$x_{2\min}=-0,395$<br>$x_{2\max}\cdot m=-1,813$<br>$x_{2\min}\cdot m=-1,974$ |
| 10                  | $x_{1\max}=0,272$<br>$x_{1\min}=0,257$<br>$x_{1\max}\cdot m=2,721$<br>$x_{1\min}\cdot m=2,575$   | $x_{1\max}=0,272$<br>$x_{1\min}=0,257$<br>$x_{1\max}\cdot m=2,721$<br>$x_{1\min}\cdot m=2,575$   | $x_{2\max}=-0,347$<br>$x_{2\min}=-0,367$<br>$x_{2\max}\cdot m=-3,465$<br>$x_{2\min}\cdot m=-3,670$ | $x_{2\max}=-0,362$<br>$x_{2\min}=-0,384$<br>$x_{2\max}\cdot m=-3,617$<br>$x_{2\min}\cdot m=-3,837$ |

Таблица 7.3

| 12–А (ГОСТ 1643– 81) |  |  |  |  |
|----------------------|--|--|--|--|
| $m, \text{MM}$       | $z_1=12$   | $z_2=12$   | $z_2=50$   | $z_2=100$  |
| 1                    | $x_{1\max} = -0,044$<br>$x_{1\min} = -0,394$<br>$x_{1\max} \cdot m = -0,044$<br>$x_{1\min} \cdot m = -0,394$ | $x_{1\max} = -0,044$<br>$x_{1\min} = -0,394$<br>$x_{1\max} \cdot m = -0,044$<br>$x_{1\min} \cdot m = -0,394$ | $x_{2\max} = -0,644$<br>$x_{2\min} = -0,994$<br>$x_{2\max} \cdot m = -0,644$<br>$x_{2\min} \cdot m = -0,994$ | $x_{2\max} = -0,717$<br>$x_{2\min} = -1,067$<br>$x_{2\max} \cdot m = -0,717$<br>$x_{2\min} \cdot m = -1,067$ |
| 5                    | $x_{1\max} = 0,288$<br>$x_{1\min} = 0,147$<br>$x_{1\max} \cdot m = 1,412$<br>$x_{1\min} \cdot m = 0,733$     | $x_{1\max} = 0,288$<br>$x_{1\min} = 0,147$<br>$x_{1\max} \cdot m = 1,412$<br>$x_{1\min} \cdot m = 0,733$     | $x_{2\max} = -0,418$<br>$x_{2\min} = -0,521$<br>$x_{2\max} \cdot m = -2,092$<br>$x_{2\min} \cdot m = -2,604$ | $x_{2\max} = -0,462$<br>$x_{2\min} = -0,565$<br>$x_{2\max} \cdot m = -2,311$<br>$x_{2\min} \cdot m = -2,823$ |
| 10                   | $x_{1\max} = 0,255$<br>$x_{1\min} = 0,204$<br>$x_{1\max} \cdot m = 2,554$<br>$x_{1\min} \cdot m = 2,042$     | $x_{1\max} = 0,255$<br>$x_{1\min} = 0,204$<br>$x_{1\max} \cdot m = 2,554$<br>$x_{1\min} \cdot m = 2,042$     | $x_{2\max} = -0,359$<br>$x_{2\min} = -0,410$<br>$x_{2\max} \cdot m = -3,592$<br>$x_{2\min} \cdot m = -4,104$ | $x_{2\max} = -0,398$<br>$x_{2\min} = -0,464$<br>$x_{2\max} \cdot m = -3,979$<br>$x_{2\min} \cdot m = -4,637$ |

Обзор результатов расчета говорит нам о том, что  $x_i$  серьезно меняется и на графиках блокирующих контуров ГОСТ 19274-73 [66] свойства передачи определены сочетанием  $x_1$  и  $x_2$  в некотором прямоугольнике с координатами вершин  $x_{j\max}$  и  $x_{i\min}$  ( $i = 1, 2$ ). В упомянутом прямоугольнике  $x$  меняется значительно, особенно при грубых степенях точности и виде сопряжения А.

Анализ данных таблиц 7.1, 7.2 и 7.3 дает основание для следующих выводов. Коэффициент перекрытия  $\varepsilon_\gamma$  наиболее существенно изменяется в паре  $z_1=z_2=12$ . Естественно, эти изменения максимальны ( $>10\%$ ) при степени точности 12–А, таблица 7.3. Изменения же, например, коэффициента формы зубьев  $Y_{FS}$  при указанном варьировании  $x_1$  и  $x_2$  весьма незначительны, и не превышают 2% для всех пар и степеней точности в указанных таблицах.

Однако таким же образом вычислить изменения параметров, характеризующих кинематическую погрешность, плавность и нормы контакта не удастся.

Итак, из всех заявленных свойств фактически удовлетворено только одно, а именно гарантировано положение исходного контура относительно оси заготовки с некоторым весьма большим допуском. При этом изменение фактической точки, сочетающей  $x_{1d}$  и  $x_{2d}$ , означает получение вполне определенных свойств передачи, а их размещение в вышеупомянутом прямоугольнике наоборот говорит о широком варьировании свойств передачи при изменении основных параметров, а именно  $x_1$  и  $x_2$ . Можно ли здесь говорить о том, что перечисленные признаки: кинематическая точность, плавность работы, норма контакта и норма бокового зазора являются независимыми? Ни в коем случае! Все они получаются в ходе единого процесса зубообработки при заданной технологической системе станка. Можно было бы говорить о независимых признаках только в том случае, если частично развязать их получение в процессе зубообработки.

Приведем только два примера из практики. Желая обеспечить различный съем материала в ходе шлифования на станках типа Niles используют при предварительном зубофрезеровании так называемые «фрезы под шлифование», отличающиеся увеличенной высотой головки зуба. Далее, желая снизить шероховатость поверхности зуба, желательно применять, например, диагональную подачу инструмента [67, 68].

Часто повышение точности по тем или иным нормам связано с расчетом режимов резания на стадии черновой обработки. Так при использовании зубошевингования в качестве окончательной обработки было затруднительно обеспечить нормы плавности. Был применен метод предварительной прорезки впадин зубьев без обкатки профилем, рассчитанный таким образом, что при окончательном фрезеровании съем материала по левым и правым профилям был приблизительно одинаков. Далее уже работал принцип технологического наследования признаков.

Не только геометро-кинематические способы повышения точности работают, но и методы, связанные с повышением жесткости отдельных узлов или станка в целом, снижение припусков и скоростей (а следовательно, усилия резания) при обработке могут дать несомненный эффект в обеспечении отдельных норм точности.

Мы видим, что обеспечение различных норм точности может быть достигнуто различными технологическими приемами. Каждому технологическому процессу с определенной технологической системой станка, заданными подачами и скоростями, соответствует некий набор норм точности, а уж совпадают они в нормы одной степени точности или в разные – это дело случая. В большинстве случаев, безусловно, не совпадают. Тогда встает вопрос: надо ли указывать степень точности по каждой из норм или только одну – самую грубую степень точности? ISO 1328 не содержит рекомендаций по комбинированию норм разных степеней точности.

ГОСТ 1643-81 все же основан на методе производства зубчатых колес обкаткой. Именно эти методы имелись ввиду при установлении возможностей комбинирования норм точности. Если же рассматривать современные методы изготовления зубчатых колес, то получится, что естественное комбинирование норм значительно превышает указанные в стандарте пределы.

Посмотрим на нарезание передачи  $m=1$ ,  $z_1=33$ ,  $z_2=60$ . Нарезание производилось на фрезерном станке с ЧПУ DECKEL MAHO DMU 60T концевыми фрезами Sandvik. Фрагмент операционной карты представлен на рис. 7.1.

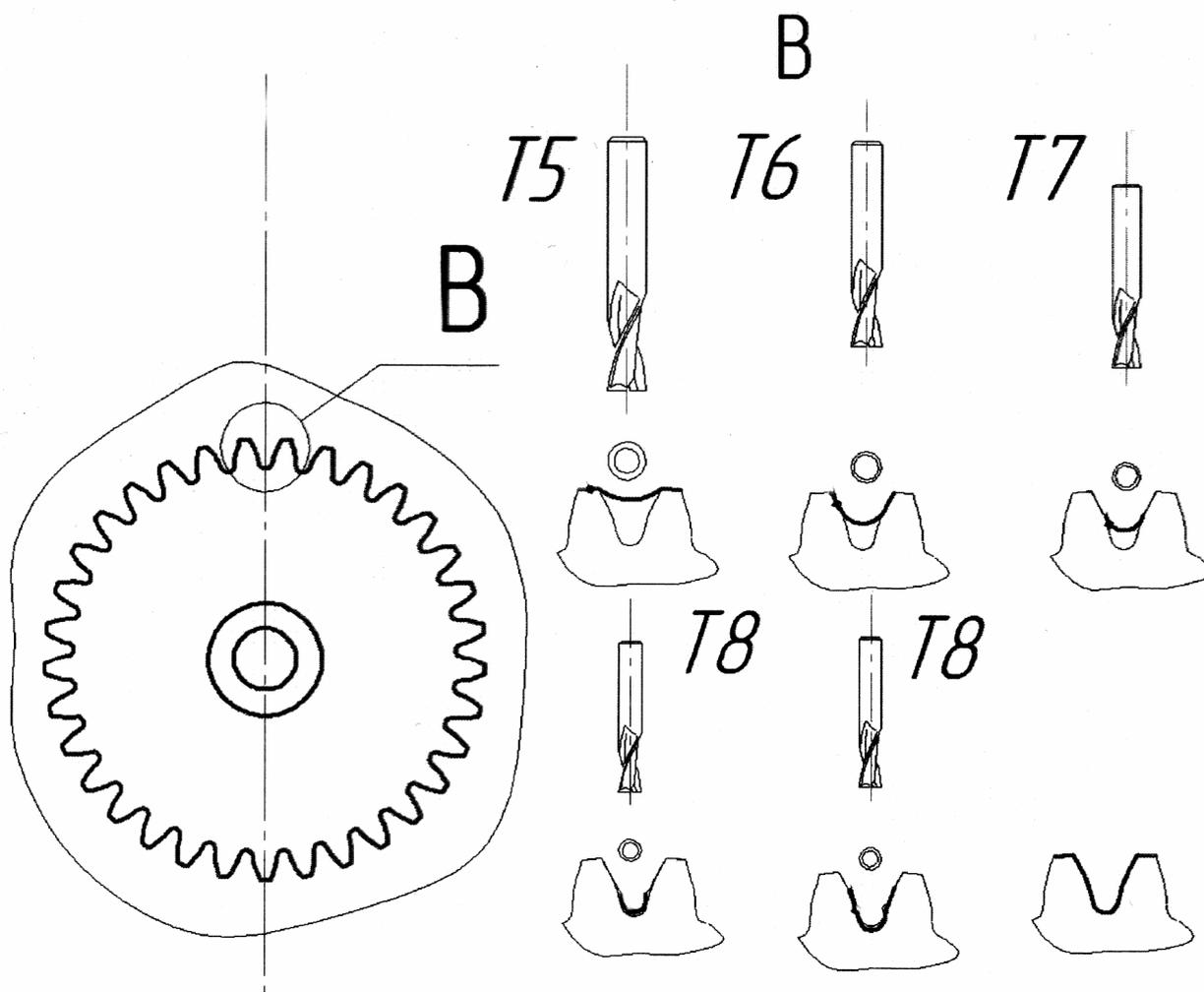


Рис. 7.1 Фрагмент операционной карты.

При измерении параметров точности оказалось:

- радиальное биение отсутствует:  $F_r=0$ ;
- степень точности по нормам плавности: 8-я.

Последнее обстоятельство можно было предугадать, поскольку оно связано с дискретностью перемещения оси инструмента, а также с отжатием концевых фрез, особенно малого диаметра. Именно это позволяет нам утверждать, что предусматривать комбинирование норм в стандарте не следует. Но тогда необоснованно и само наличие норм в стандарте. В ISO 1328, как уже говорилось, нет понятия нормы кинематической точности, нормы плавности, нормы контакта и нормы бокового зазора. Однако имеются почти все те же самые показатели, которые характеризуют эти нормы в нашем стандарте.

Кинематическая точность характеризует амплитуды циклических погрешностей оборотной частоты. Плавность характеризуется амплитудой циклической погрешности частоты входа зубьев в зацепление. Для других норм также имеется характер их показателя как в ISO 1328 так и в ГОСТ 1643-81.

Высокочастотные составляющие погрешности в норме плавности частично представлены погрешностью профиля зуба  $f_{fr}$ . Однако главные меры

по борьбе с высокочастотной составляющей – фланкирование (удаление части профиля зуба), также представлено в обоих упомянутых нормативных документах непротиворечиво.

Обратимся теперь к установленным в стандарте 6-ти классам точности отклонения межосевого расстояния. Обозначим их по порядку убывания точности римскими цифрами от I – VI. Использование упомянутых классов – чрезвычайно редко. Так же как и комбинирование норм точности шесть классов отклонения межосевого расстояния приводят к переопределению и параметров процесса. Ещё раз повторим: установленные нормы точности не являются независимыми, так же как и классы межосевого расстояния, то есть выбранная технология в совокупности с технологической системой станка однозначно определяет в едином процессе все нормы точности.

Следует в этой части унифицировать будущий стандарт ISO, убрав из него как установки отдельных норм точности, так и классов отклонения межосевого расстояния

Кроме унификации стандарта с нормами ISO мы достигнем существеннейшего упрощения стандартов точности на колеса и передачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1643–81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1989. – 68 с.
2. Взаимозаменяемость и технические измерения в машиностроении. Вып. 6. Под редакцией К.И. Абаджи и Б.П. Тимофеева. – Л.: изд-во «Машиностроение», 1972. 329 с.
3. ГОСТ 21098–82. Цепи кинематические. Методы расчета точности. – М., Издательство стандартов, 1986. – 15 с.
4. American Society Of Mechanical Engineers - ASME.ORG [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.asme.org/>
5. ISO 1328–1:1995, Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth.
6. ISO 1328–2:1997, Cylindrical gears - ISO system of accuracy - Part 2: Definitions and allowable values of deviations relevant to radial composite deviations and runout information.
7. ФГУП «Стандартинформ». Федеральное государственное унитарное предприятие // ISO 1328–1:1995 [Электронный ресурс]. – Электрон, дан. – М.: «Российский научно–технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия», 2006. – Режим доступа: <http://www.standards.ru/document/3617528.aspx>
8. ФГУП «Стандартинформ». Федеральное государственное унитарное предприятие // ISO 1328–2:1997 [Электронный ресурс]. – Электрон, дан. – М.: «Российский научно–технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия», 2006. – Режим доступа: <http://www.standards.ru/document/3625585.aspx>
9. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Нормы точности зубчатых колёс и передач: нужен новый стандарт // Стандарты и качество. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2010. - № 5. - с. 60-63.
10. Тимофеев Б.П. Стандартизация параметров точности зубчатых колес и передач. // Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники: труды Международной научно-технической конференции, 27-28 апреля 2010 г. / Балт. Гос. Техн. Ун-т. – СПб., 2010. – с. 10-14.
11. Тищенко О.Ф., Валединский А.С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. – М., «Машиностроение», 1977. – 357 с., ил.
12. Тимофеев Б.П. Передаточное отношение пары зубчатых колёс // Известия вузов. Машиностроение, №6, 1980. с. 19–23.
13. Тимофеев Б.П. Передаточное отношение пары зубчатых колёс // Механика машин вып. 61, 1983. с. 30–36.
14. Характеристики распределения погрешности передаточного отношения пары зубчатых колёс (и простого ряда) // Известия вузов. Машиностроение, №3, 1985. с. 20–26.
15. Колебание передаточного отношение в червячных передачах // Вестник машиностроения, №4. 1986.

16. Колебание передаточного отношение в планетарных передачах // Известия вузов. Машиностроение, №10, 1986.
17. ГОСТ 16530–83. Передачи зубчатые. Общие термины, определения и обозначения. – М., Издательство стандартов, 2004. – 52 с.
18. ГОСТ 16531–83. Передачи зубчатые цилиндрические. Термины, определения и обозначения. – М., Издательство стандартов, 2004. – 31 с.
19. ГОСТ 16532–70. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчёт геометрии. – М., Издательство стандартов, 1971. – 44 с.
20. Куцоконь В.А. Точность кинематических цепей приборов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 221 с., ил.
21. ГОСТ 9178–81. Передачи зубчатые цилиндрические мелкомодульные. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1981. – 40 с.
22. ГОСТ 1758–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые конические и гипоидные. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1982. – 43 с.
23. ГОСТ 9368–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые конические мелкомодульные. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1982. – 27 с.
24. ГОСТ 3675–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи червячные цилиндрические. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1982. – 64 с.
25. ГОСТ 9774–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи червячные цилиндрические мелкомодульные. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1989. – 41 с.
26. ГОСТ 10242–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые реечные. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1989. – 31 с.
27. ГОСТ 13506–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые реечные мелкомодульные. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1989. – 24 с.
28. ГОСТ 25329–82. Станки металлорежущие. Передачи винт-гайка качения. Основные размеры. – М., Издательство стандартов, 1982. – 4 с.
29. ГОСТ 9562–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба трапецеидальная однозаходная. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1987. – 41 с.
30. ГОСТ 11708–82. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба. Термины и определения. – М., Издательство стандартов, 1986. – 33 с.
31. ГОСТ 2.109–73. Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам. – М., Издательство стандартов, 1974. – 29 с.
32. Тимофеев Б.П., Пустошкин И.В. Расчёт параметров точности многозвенных передаточных механизмов. Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Точность механизмов» – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009, – 42 с.
33. Вульфсон И.И., Ерихов М.Л., Козловский М.З. и др. Механика машин / Под ред. Смирнова Г.А. – М.: Высш. шк., 1996. – 511 с.

34. Кудрявцев В.Н., Кузьмин И.С., Филипенков А.Л. Расчет и проектирование зубчатых редукторов: Справочник. – СПб.: Политехника, 1993. – 448 с.
35. ISO 53:1998. Cylindrical gears for general and heavy engineering. Standard basic rack tooth profile.
36. ISO 54:1996. Cylindrical gears for general engineering and for heavy engineering. Modules.
37. ISO 701:1998. International gear notation. Symbols for geometrical data.
38. ISO 1122–1:1998. Glossary of gear terms. Part 1: Geometrical definitions.
39. ISO/TR 10064–1:1992. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Part 1: Inspection of corresponding flanks of gear teeth.
40. ISO/TR 10064–1:1992/Cor.1:2006. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Part 1: Inspection of corresponding flanks of gear teeth. Technical Corrigendum 1.
41. ISO/TR 10064–2:1996. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Part 2. Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash.
42. ISO/TR 10064–2:1996/Cor.1:2001. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Part 2. Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash. Technical Corrigendum 1.
43. ISO/TR 10064–3:1996. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Part 3: Recommendations relative to gear blanks, shaft centre distance and parallelism of axes.
44. ISO/TR 10064–4:1998. Cylindrical gears. Code of inspection practice Part 4: Recommendations relative to surface roughness and tooth contact pattern checking.
45. ISO/TR 10064–4:1998/Cor.1:2006. Cylindrical gears. Code of inspection practice Part 4: Recommendations relative to surface roughness and tooth contact pattern checking. Technical Corrigendum 1.
46. ISO/TR 10064–5:2005. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Part 5: Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments.
47. ISO/TR 10064–5:2005/Cor.1:2006. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Part 5: Recommendations relative to evaluation of gear measuring instruments. Technical Corrigendum 1.
48. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колёс. М., «Машиностроение», 1972.
49. Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В. Состояние и перспективы нормирования точности зубчатых колёс и передач. – Вестник Машиностроения. № 12, 1990. – с. 34-36.
50. Тимофеев Б.П. Назревшие перемены в нормировании точности зубчатых колёс и передач. – Труды шестой сессии международной научной школы. Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем. Часть 2. СПб, 2003. – с. 60.
51. Попов П.К., Штриплинг Л.О. Предпосылки пересмотра нормативной документации по расчёту точности зубчатых передач. Вестник машиностроения, – 1998. №6. – с. 20-24.

52. Попов П.К., Штриплинг Л.О. Концепция создания нормативной документации по точности зубчатых передач. // Конверсия в машиностроении. – 1998. №4.– с. 20-23.
53. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Анализ недостатков ГОСТ 1643-81. Вестник конференции молодых учёных СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов. Том 2. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – с. 39-42.
54. ГОСТ 1643–72. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М., Издательство стандартов, 1979. – 86 с.
55. Тимофеев Б.П. Прогнозирование точности зубчатых колес и передач приборов. Вибродиагностика качества механизмов приборов: Межвузовский сб. науч. тр. ЛИАП. 1987. Вып. 188. – с. 18–21.
56. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Рекомендации ISO 1328 в части установления параметров точности зубчатых колес и передач. II межвузовская конференция молодых ученых. Сборник научных трудов. Том 2. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. с. 127–131.
57. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Рекомендации по организации контроля бокового зазора в зубчатых передачах. Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 28. I сессия научной школы «Задачи механики и проблемы точности в приборостроении» / Главный редактор д.т.н., профессор В.Н. Васильев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. с. 206–210.
58. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Анализ конкурентоспособности отечественного редукторостроения в части установления точности зубчатых колёс и передач. Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 31. Исследования и разработки в области физики и приборостроения / Главный редактор д.т.н., профессор В.Н. Васильев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. с. 259-266.
59. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Сравнение табличных значений параметров точности зубчатых колес и передач в стандартах: ISO 1328 и ГОСТ 1643–81. Теория механизмов и машин. №1(9). Том 5. – СПб: СПбГПУ, 2007. с. 60–70.
60. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Проблемы соответствия отечественных норм точности зубчатых колес и передач рекомендациям ISO. Восьмая сессия международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». Программа и сборник докладов – СПб: ИПМАШ РАН, 2007. с. 262–264.
61. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Формирование отечественных стандартов качества зубчатых колес и передач, не противоречащих рекомендациям ISO. Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 48. МЕХАТРОНИКА, ТЕХНОЛОГИИ, СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ. / Главный редактор д.т.н., проф. В.О. Никифоров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. с. 172–178.
62. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Расчёт параметров зубчатых передаточных механизмов с учётом требований ISO. Теория механизмов и машин. №2 (14). Том 7. – СПб: СПбГПУ, 2009. с. 5–9.
63. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Тенденции расчёта параметров точности зубчатых колёс и передач. Девятая сессия международной научной школы

- «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». Сборник трудов. – СПб: ИПМАШ РАН, 2009. с. 425-426.
64. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. О противоречии в нормировании бокового зазора в отечественном стандарте ГОСТ 1643-81. // Проблемы точности в механике и приборостроении. Сборник тезисов VIII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. Выпуск 2. / Главный редактор д.т.н., проф. В.О. Никифоров. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. с. 256-258.
65. Тимофеев Б.П. Редукторостороение в России: опыт прошлого – на службу перспективам. Журнал «Редукторы и приводы. Новости редукторостороения из Санкт–Петербурга», №№4, 5. – СПб.: ЗАО «НТЦ Редуктор», 2005. с. 34–36.
66. ГОСТ 19274-73. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внутреннего зацепления. Расчет геометрии. – М., Издательство стандартов, 1974. – 65 с.
67. Лангофер А.Р., Бабичев Д.Т., Райхман Г.Н., Шунаев Б.К. Исследование загрузки режущих кромок обкатных инструментов. // Пути повышения эффективности использования инструментальных материалов: тезисы докладов научно–технической конференции. – Минск, 1983. с. 81–84. – АТ13113.
68. Райхман Г.Н., Бабичев Д.Т. Исследование формы поверхности зубьев, образованных двухпараметрическим движением линии // Машиноведение, АН СССР, 1980, №4, с. 51–59.
69. Старжинский В.Е., Антонюк В.Е., Кане М.М., Шалобаев Е.В., Шилько С.В. Словарь-справочник по зубчатым передачам: русско-английский, немецко-французский. / Издание второе, исправленное и дополненное / Под общ. ред. В.Е. Старжинского. – СПб.: ЦЦП ОАО «Светоч», 2004. – 90 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Материалы стандарта ISO 1328-1:1995

### Таблица 1. Погрешность шага $\pm f_{pt}$

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Модуль<br>$m$ , мм  | Степень точности   |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|---------------------------------|---------------------|--------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                                 |                     | 0                  | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                                 |                     | $\pm f_{pt}$ , МКМ |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| $5 < d \leq 20$                 | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,8                | 1,2 | 1,7  | 2,3  | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0  | 26,0  | 37,0  | 53,0  |
|                                 | $2 < m \leq 3,5$    | 0,9                | 1,3 | 1,8  | 2,6  | 3,7  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0  | 29,0  | 41,0  | 59,0  |
| $20 < d \leq 50$                | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,9                | 1,2 | 1,8  | 2,5  | 3,5  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0  | 28,0  | 40,0  | 56,0  |
|                                 | $2 < m \leq 3,5$    | 1,0                | 1,4 | 1,9  | 2,7  | 3,9  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0  | 31,0  | 44,0  | 62,0  |
|                                 | $3,5 < m \leq 6$    | 1,1                | 1,5 | 2,1  | 3,0  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0  | 34,0  | 48,0  | 68,0  |
|                                 | $6 < m \leq 10$     | 1,2                | 1,7 | 2,5  | 3,5  | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0  | 40,0  | 56,0  | 79,0  |
| $50 < d \leq 125$               | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,9                | 1,3 | 1,9  | 2,7  | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0  | 30,0  | 43,0  | 61,0  |
|                                 | $2 < m \leq 3,5$    | 1,0                | 1,5 | 2,1  | 2,9  | 4,1  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0  | 33,0  | 47,0  | 66,0  |
|                                 | $3,5 < m \leq 6$    | 1,1                | 1,6 | 2,3  | 3,2  | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0  | 36,0  | 52,0  | 73,0  |
|                                 | $6 < m \leq 10$     | 1,3                | 1,8 | 2,6  | 3,7  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0  | 42,0  | 59,0  | 84,0  |
|                                 | $10 < m \leq 16$    | 1,6                | 2,2 | 3,1  | 4,4  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0  | 50,0  | 71,0  | 100,0 |
|                                 | $16 < m \leq 25$    | 2,0                | 2,8 | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 63,0  | 89,0  | 125,0 |
| $125 < d \leq 280$              | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,1                | 1,5 | 2,1  | 3,0  | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0  | 34,0  | 48,0  | 67,0  |
|                                 | $2 < m \leq 3,5$    | 1,1                | 1,6 | 2,3  | 3,2  | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0  | 36,0  | 51,0  | 73,0  |
|                                 | $3,5 < m \leq 6$    | 1,2                | 1,8 | 2,5  | 3,5  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0  | 40,0  | 56,0  | 79,0  |
|                                 | $6 < m \leq 10$     | 1,4                | 2,0 | 2,8  | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0  | 45,0  | 64,0  | 90,0  |
|                                 | $10 < m \leq 16$    | 1,7                | 2,4 | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 53,0  | 75,0  | 107,0 |
|                                 | $16 < m \leq 25$    | 2,1                | 2,9 | 4,1  | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0  | 66,0  | 93,0  | 132,0 |
|                                 | $25 < m \leq 40$    | 2,7                | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 61,0  | 86,0  | 121,0 | 171,0 |
| $280 < d \leq 560$              | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,2                | 1,7 | 2,4  | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0  | 38,0  | 54,0  | 76,0  |
|                                 | $2 < m \leq 3,5$    | 1,3                | 1,8 | 2,5  | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0  | 41,0  | 57,0  | 81,0  |
|                                 | $3,5 < m \leq 6$    | 1,4                | 1,9 | 2,7  | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0  | 44,0  | 62,0  | 88,0  |
|                                 | $6 < m \leq 10$     | 1,5                | 2,2 | 3,1  | 4,4  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0  | 49,0  | 70,0  | 99,0  |
|                                 | $10 < m \leq 16$    | 1,8                | 2,5 | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 81,0  | 115,0 |
|                                 | $16 < m \leq 25$    | 2,2                | 3,1 | 4,4  | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 70,0  | 99,0  | 140,0 |
|                                 | $25 < m \leq 40$    | 2,8                | 4,0 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 63,0  | 90,0  | 127,0 | 180,0 |
|                                 | $40 < m \leq 70$    | 3,9                | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 45,0 | 63,0 | 89,0  | 126,0 | 178,0 | 252,0 |
| $560 < d \leq 1000$             | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,3                | 1,9 | 2,7  | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0  | 43,0  | 61,0  | 86,0  |
|                                 | $2 < m \leq 3,5$    | 1,4                | 2,0 | 2,9  | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0  | 46,0  | 65,0  | 91,0  |
|                                 | $3,5 < m \leq 6$    | 1,5                | 2,2 | 3,1  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 35,0  | 49,0  | 69,0  | 98,0  |
|                                 | $6 < m \leq 10$     | 1,7                | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 54,0  | 77,0  | 109,0 |
|                                 | $10 < m \leq 16$    | 2,0                | 2,8 | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 63,0  | 89,0  | 125,0 |
|                                 | $16 < m \leq 25$    | 2,3                | 3,3 | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0  | 75,0  | 106,0 | 150,0 |
|                                 | $25 < m \leq 40$    | 3,0                | 4,2 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 47,0 | 67,0  | 95,0  | 134,0 | 190,0 |
|                                 | $40 < m \leq 70$    | 4,1                | 6,0 | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0 | 65,0 | 93,0  | 131,0 | 185,0 | 262,0 |
| $1000 < d \leq 1600$            | $2 \leq m \leq 3,5$ | 1,6                | 2,3 | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0  | 51,0  | 72,0  | 103,0 |
|                                 | $3,5 < m \leq 6$    | 1,7                | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0  | 55,0  | 77,0  | 109,0 |
|                                 | $6 < m \leq 10$     | 1,9                | 2,6 | 3,7  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0  | 60,0  | 85,0  | 120,0 |
|                                 | $10 < m \leq 16$    | 2,1                | 3,0 | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0  | 68,0  | 97,0  | 136,0 |
|                                 | $16 < m \leq 25$    | 2,5                | 3,6 | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 40,0 | 57,0  | 81,0  | 114,0 | 161,0 |
|                                 | $25 < m \leq 40$    | 3,1                | 4,4 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 50,0 | 71,0  | 100,0 | 142,0 | 201,0 |
| $40 < m \leq 70$                | 4,3                 | 6,0                | 8,5 | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0 | 97,0 | 137,0 | 193,0 | 273,0 |       |

**Таблица 1. Погрешность шага  $\pm f_{pt}$  (продолжение)**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Модуль<br>$m$ , мм | Степень точности   |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                                 |                    | 0                  | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                                 |                    | $\pm f_{pt}$ , МКМ |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| 1600< $d$ ≤2500                 | 3,5≤ $m$ ≤6        | 1,9                | 2,7 | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0  | 61,0  | 86,0  | 122,0 |
|                                 | 6< $m$ ≤10         | 2,1                | 2,9 | 4,1  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0  | 66,0  | 94,0  | 132,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 2,3                | 3,3 | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 53,0  | 74,0  | 105,0 | 149,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 2,7                | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0  | 87,0  | 123,0 | 174,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 3,3                | 4,7 | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 75,0  | 107,0 | 151,0 | 213,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 4,5                | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 50,0 | 71,0 | 101,0 | 143,0 | 202,0 | 286,0 |
| 2500< $d$ ≤4000                 | 6≤ $m$ ≤10         | 2,3                | 3,3 | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0  | 74,0  | 105,0 | 148,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 2,6                | 3,6 | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0  | 82,0  | 116,0 | 165,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 3,0                | 4,2 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0 | 67,0  | 95,0  | 134,0 | 189,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 3,6                | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 40,0 | 57,0 | 81,0  | 114,0 | 162,0 | 229,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 4,7                | 6,5 | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 75,0 | 106,0 | 151,0 | 213,0 | 301,0 |
| 4000< $d$ ≤6000                 | 6≤ $m$ ≤10         | 2,6                | 3,7 | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 42,0 | 59,0  | 83,0  | 118,0 | 167,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 2,9                | 4,0 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0  | 92,0  | 130,0 | 183,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 3,3                | 4,6 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0 | 74,0  | 104,0 | 147,0 | 208,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 3,9                | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0 | 88,0  | 124,0 | 175,0 | 248,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 5,0                | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 57,0 | 80,0 | 113,0 | 160,0 | 226,0 | 320,0 |
| 6000< $d$ ≤8000                 | 10≤ $m$ ≤16        | 3,1                | 4,4 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 50,0 | 71,0  | 101,0 | 142,0 | 201,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 3,5                | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 57,0 | 80,0  | 113,0 | 160,0 | 226,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 4,1                | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0 | 94,0  | 133,0 | 188,0 | 266,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 5,5                | 7,5 | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 60,0 | 84,0 | 119,0 | 169,0 | 239,0 | 338,0 |
| 8000< $d$ ≤10000                | 10≤ $m$ ≤16        | 3,4                | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 77,0  | 108,0 | 153,0 | 217,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 3,8                | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0 | 85,0  | 121,0 | 171,0 | 242,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 4,4                | 6,0 | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 70,0 | 99,0  | 140,0 | 199,0 | 281,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 5,5                | 8,0 | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0 | 88,0 | 125,0 | 177,0 | 250,0 | 353,0 |

**Таблица 2. Полная накопленная погрешность шага  $F_p$**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Модуль $m$ , мм     | Степень точности |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|---------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                              |                     | 0                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                              |                     | $F_p$ , МКМ      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |
| $5 \leq d \leq 20$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 2,0              | 2,8  | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0  | 32,0  | 45,0  | 64,0  | 90,0  | 127,0 |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 2,1              | 2,9  | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0  | 33,0  | 47,0  | 66,0  | 94,0  | 133,0 |
| $20 < d \leq 50$             | $0,5 \leq m \leq 2$ | 2,5              | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0  | 41,0  | 57,0  | 81,0  | 115,0 | 162,0 |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 2,6              | 3,7  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0  | 42,0  | 59,0  | 84,0  | 119,0 | 168,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 2,7              | 3,9  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0  | 44,0  | 62,0  | 87,0  | 123,0 | 174,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 2,9              | 4,1  | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0  | 46,0  | 65,0  | 93,0  | 131,0 | 185,0 |
| $50 < d \leq 125$            | $0,5 \leq m \leq 2$ | 3,3              | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0  | 52,0  | 74,0  | 104,0 | 147,0 | 208,0 |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 3,3              | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 53,0  | 76,0  | 107,0 | 151,0 | 214,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 3,4              | 4,9  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 28,0 | 39,0  | 55,0  | 78,0  | 110,0 | 156,0 | 220,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 3,6              | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 82,0  | 116,0 | 164,0 | 231,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 3,9              | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 62,0  | 88,0  | 124,0 | 175,0 | 248,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 4,3              | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0  | 68,0  | 96,0  | 136,0 | 193,0 | 273,0 |
| $125 < d \leq 280$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 4,3              | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 35,0 | 49,0  | 69,0  | 98,0  | 138,0 | 195,0 | 276,0 |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 4,4              | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 70,0  | 100,0 | 141,0 | 199,0 | 282,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 4,5              | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0  | 72,0  | 102,0 | 144,0 | 204,0 | 288,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 4,7              | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 53,0  | 75,0  | 106,0 | 149,0 | 211,0 | 299,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 4,9              | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0  | 79,0  | 112,0 | 158,0 | 223,0 | 316,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 5,5              | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0  | 85,0  | 120,0 | 170,0 | 241,0 | 341,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 6,0              | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 47,0 | 67,0  | 95,0  | 134,0 | 190,0 | 269,0 | 380,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 7,5              | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0 | 80,0  | 112,0 | 158,0 | 223,0 | 316,0 | 450,0 |
| $280 < d \leq 560$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 5,5              | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 64,0  | 91,0  | 129,0 | 182,0 | 257,0 | 364,0 |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 6,0              | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0 | 65,0  | 92,0  | 131,0 | 185,0 | 261,0 | 370,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 6,0              | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0  | 94,0  | 133,0 | 188,0 | 266,0 | 376,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 6,0              | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 97,0  | 137,0 | 193,0 | 274,0 | 387,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 6,5              | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 50,0 | 71,0  | 101,0 | 143,0 | 202,0 | 285,0 | 404,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 6,5              | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 76,0  | 107,0 | 151,0 | 214,0 | 303,0 | 428,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 7,5              | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 83,0  | 117,0 | 165,0 | 234,0 | 331,0 | 468,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 8,5              | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0 | 95,0  | 135,0 | 191,0 | 270,0 | 382,0 | 540,0 |
| $560 < d \leq 1000$          | $0,5 \leq m \leq 2$ | 7,5              | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 59,0 | 83,0  | 117,0 | 166,0 | 235,0 | 332,0 | 469,0 |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 7,5              | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 59,0 | 84,0  | 119,0 | 168,0 | 238,0 | 336,0 | 475,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 7,5              | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0 | 85,0  | 120,0 | 170,0 | 241,0 | 341,0 | 482,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 7,5              | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0 | 87,0  | 123,0 | 174,0 | 246,0 | 348,0 | 492,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 8,0              | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 64,0 | 90,0  | 127,0 | 180,0 | 254,0 | 360,0 | 509,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 8,5              | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0 | 67,0 | 94,0  | 133,0 | 189,0 | 267,0 | 378,0 | 534,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 9,0              | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0 | 101,0 | 143,0 | 203,0 | 287,0 | 405,0 | 573,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 10,0             | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 40,0 | 57,0 | 81,0 | 114,0 | 161,0 | 228,0 | 323,0 | 457,0 | 646,0 |
| $1000 < d \leq 1600$         | $2 \leq m \leq 3,5$ | 9,0              | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0 | 74,0 | 105,0 | 148,0 | 209,0 | 296,0 | 418,0 | 591,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 9,5              | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 53,0 | 75,0 | 106,0 | 149,0 | 211,0 | 299,0 | 423,0 | 598,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 9,5              | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 76,0 | 108,0 | 152,0 | 215,0 | 304,0 | 430,0 | 608,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 10,0             | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 55,0 | 78,0 | 111,0 | 156,0 | 221,0 | 313,0 | 442,0 | 625,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 10,0             | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 57,0 | 81,0 | 115,0 | 163,0 | 230,0 | 325,0 | 460,0 | 650,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 11,0             | 15,0 | 22,0 | 30,0 | 43,0 | 61,0 | 86,0 | 122,0 | 172,0 | 244,0 | 345,0 | 488,0 | 690,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 12,0             | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 67,0 | 95,0 | 135,0 | 190,0 | 269,0 | 381,0 | 539,0 | 762,0 |

**Таблица 2. Полная накопленная погрешность шага  $F_p$  (продолжение)**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Модуль<br>$m$ , мм | Степень точности |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
|---------------------------------|--------------------|------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
|                                 |                    | 0                | 1    | 2    | 3    | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11     | 12     |
|                                 |                    | $F_p$ , МКМ      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |        |        |
| 1600< $d$ ≤2500                 | 3,5≤ $m$ ≤6        | 11,0             | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 45,0  | 64,0  | 91,0  | 129,0 | 182,0 | 257,0 | 364,0 | 514,0  | 727,0  |
|                                 | 6< $m$ ≤10         | 12,0             | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0  | 65,0  | 92,0  | 130,0 | 184,0 | 261,0 | 369,0 | 522,0  | 738,0  |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 12,0             | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0  | 67,0  | 94,0  | 133,0 | 189,0 | 267,0 | 377,0 | 534,0  | 755,0  |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 12,0             | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 49,0  | 69,0  | 97,0  | 138,0 | 195,0 | 276,0 | 390,0 | 551,0  | 780,0  |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 13,0             | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 51,0  | 72,0  | 102,0 | 145,0 | 205,0 | 290,0 | 409,0 | 579,0  | 819,0  |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 14,0             | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0  | 79,0  | 111,0 | 158,0 | 223,0 | 315,0 | 446,0 | 603,0  | 891,0  |
| 2500< $d$ ≤4000                 | 6≤ $m$ ≤10         | 14,0             | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0  | 80,0  | 113,0 | 159,0 | 225,0 | 318,0 | 450,0 | 637,0  | 901,0  |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 14,0             | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 57,0  | 81,0  | 115,0 | 162,0 | 229,0 | 324,0 | 459,0 | 649,0  | 917,0  |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 15,0             | 21,0 | 29,0 | 42,0 | 59,0  | 83,0  | 118,0 | 167,0 | 236,0 | 333,0 | 471,0 | 666,0  | 942,0  |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 15,0             | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0  | 87,0  | 123,0 | 174,0 | 245,0 | 347,0 | 491,0 | 694,0  | 982,0  |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 16,0             | 23,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0  | 93,0  | 132,0 | 186,0 | 264,0 | 373,0 | 525,0 | 745,0  | 1054,0 |
| 4000< $d$ ≤6000                 | 6≤ $m$ ≤10         | 17,0             | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 97,0  | 137,0 | 194,0 | 274,0 | 387,0 | 548,0 | 775,0  | 1095,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 17,0             | 25,0 | 35,0 | 49,0 | 69,0  | 98,0  | 139,0 | 197,0 | 278,0 | 393,0 | 556,0 | 786,0  | 1112,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 18,0             | 25,0 | 36,0 | 50,0 | 71,0  | 100,0 | 142,0 | 201,0 | 284,0 | 402,0 | 568,0 | 804,0  | 1137,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 18,0             | 26,0 | 37,0 | 52,0 | 74,0  | 104,0 | 147,0 | 208,0 | 294,0 | 416,0 | 588,0 | 832,0  | 1176,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 20,0             | 28,0 | 39,0 | 55,0 | 78,0  | 110,0 | 156,0 | 221,0 | 312,0 | 441,0 | 624,0 | 883,0  | 1249,0 |
| 6000< $d$ ≤8000                 | 10≤ $m$ ≤16        | 20,0             | 29,0 | 41,0 | 57,0 | 81,0  | 115,0 | 162,0 | 230,0 | 325,0 | 459,0 | 650,0 | 919,0  | 1299,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 21,0             | 29,0 | 41,0 | 59,0 | 83,0  | 117,0 | 166,0 | 234,0 | 331,0 | 468,0 | 662,0 | 936,0  | 1324,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 21,0             | 30,0 | 43,0 | 60,0 | 85,0  | 121,0 | 170,0 | 241,0 | 341,0 | 482,0 | 682,0 | 964,0  | 1364,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 22,0             | 32,0 | 45,0 | 63,0 | 90,0  | 127,0 | 179,0 | 254,0 | 359,0 | 508,0 | 718,0 | 1015,0 | 1436,0 |
| 8000< $d$ ≤10000                | 10≤ $m$ ≤16        | 23,0             | 32,0 | 46,0 | 65,0 | 91,0  | 129,0 | 182,0 | 258,0 | 365,0 | 516,0 | 730,0 | 1032,0 | 1460,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 23,0             | 33,0 | 46,0 | 66,0 | 93,0  | 131,0 | 186,0 | 262,0 | 371,0 | 525,0 | 742,0 | 1050,0 | 1485,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 24,0             | 34,0 | 48,0 | 67,0 | 95,0  | 135,0 | 191,0 | 269,0 | 381,0 | 539,0 | 762,0 | 1078,0 | 1524,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 25,0             | 35,0 | 50,0 | 71,0 | 100,0 | 141,0 | 200,0 | 282,0 | 399,0 | 564,0 | 798,0 | 1129,0 | 1596,0 |

**Таблица 3. Погрешность профиля зуба общая  $F_\alpha$**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Модуль $m$ , мм     | Степень точности |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|------------------------------|---------------------|------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                              |                     | 0                | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                              |                     | $F_\alpha$ , МКМ |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| $5 \leq d \leq 20$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,8              | 1,1 | 1,6  | 2,3  | 3,2  | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0  | 26,0  | 37,0  | 52,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,2              | 1,7 | 2,3  | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0  | 37,0  | 53,0  | 75,0  |
| $20 < d \leq 50$             | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,9              | 1,3 | 1,8  | 2,6  | 3,6  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0  | 29,0  | 41,0  | 58,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,3              | 1,8 | 2,5  | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0  | 40,0  | 57,0  | 81,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,6              | 2,2 | 3,1  | 4,4  | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0  | 50,0  | 70,0  | 99,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,9              | 2,7 | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0  | 61,0  | 87,0  | 123,0 |
| $50 < d \leq 125$            | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,0              | 1,5 | 2,1  | 2,9  | 4,1  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0  | 33,0  | 47,0  | 66,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,4              | 2,0 | 2,8  | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0  | 44,0  | 63,0  | 89,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,7              | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 54,0  | 76,0  | 108,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 2,0              | 2,9 | 4,1  | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0  | 65,0  | 92,0  | 131,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,5              | 3,5 | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0  | 79,0  | 112,0 | 159,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 3,0              | 4,2 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 96,0  | 136,0 | 192,0 |
| $125 < d \leq 280$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,2              | 1,7 | 2,4  | 3,5  | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0  | 39,0  | 55,0  | 78,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,6              | 2,2 | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0  | 50,0  | 71,0  | 101,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,9              | 2,6 | 3,7  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0  | 60,0  | 84,0  | 119,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 2,2              | 3,2 | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 50,0  | 71,0  | 101,0 | 143,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,7              | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0  | 85,0  | 121,0 | 171,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 3,2              | 4,5 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0  | 102,0 | 144,0 | 204,0 |
|                              | $25 \leq m \leq 40$ | 3,8              | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0 | 87,0  | 123,0 | 174,0 | 246,0 |
| $280 < d \leq 560$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,5              | 2,1 | 2,9  | 4,1  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0  | 47,0  | 66,0  | 94,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,8              | 2,6 | 3,6  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 82,0  | 116,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 2,1              | 3,0 | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0  | 67,0  | 95,0  | 135,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 2,5              | 3,5 | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0  | 79,0  | 112,0 | 158,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,9              | 4,1 | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0  | 93,0  | 132,0 | 186,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 3,4              | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0 | 78,0  | 110,0 | 155,0 | 219,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 4,1              | 6,0 | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0 | 65,0 | 92,0  | 131,0 | 185,0 | 261,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 5,0              | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 57,0 | 80,0 | 113,0 | 160,0 | 227,0 | 321,0 |
| $560 < d \leq 1000$          | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,8              | 2,5 | 3,5  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0  | 56,0  | 79,0  | 112,0 |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 2,1              | 3,0 | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0  | 67,0  | 95,0  | 135,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 2,4              | 3,4 | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 77,0  | 109,0 | 154,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 2,8              | 3,9 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 88,0  | 125,0 | 177,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 3,2              | 4,5 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0  | 102,0 | 145,0 | 205,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 3,7              | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 59,0 | 84,0  | 119,0 | 168,0 | 238,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 4,4              | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0 | 70,0 | 99,0  | 140,0 | 198,0 | 280,0 |
| $1000 < d \leq 1600$         | $40 < m \leq 70$    | 5,5              | 7,5 | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 60,0 | 85,0 | 120,0 | 170,0 | 240,0 | 339,0 |
|                              | $2 \leq m \leq 3,5$ | 2,4              | 3,4 | 4,9  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0  | 78,0  | 110,0 | 155,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 2,7              | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0  | 87,0  | 123,0 | 174,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 3,1              | 4,4 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0 | 70,0  | 99,0  | 139,0 | 197,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 3,5              | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0 | 80,0  | 113,0 | 159,0 | 225,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 4,0              | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0 | 91,0  | 129,0 | 183,0 | 258,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 4,7              | 6,5 | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 75,0 | 106,0 | 150,0 | 212,0 | 300,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 5,5              | 8,0 | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 64,0 | 90,0 | 127,0 | 180,0 | 254,0 | 360,0 |

**Таблица 3. Погрешность профиля зуба общая  $F_\alpha$  (продолжение)**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Модуль<br>$m$ , мм | Степень точности |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 |                    | 0                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                                 |                    | $F_\alpha$ , мкм |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
| 1600< $d$ ≤2500                 | 3,5≤ $m$ ≤6        | 3,1              | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0  | 70,0  | 98,0  | 139,0 | 197,0 |
|                                 | 6< $m$ ≤10         | 3,4              | 4,9  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0  | 78,0  | 110,0 | 156,0 | 220,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 3,9              | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 88,0  | 124,0 | 175,0 | 248,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 4,4              | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 70,0  | 99,0  | 141,0 | 199,0 | 281,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 5,0              | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 40,0 | 57,0 | 81,0  | 114,0 | 161,0 | 228,0 | 323,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 6,0              | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0 | 96,0  | 135,0 | 191,0 | 271,0 | 383,0 |
| 2500< $d$ ≤4000                 | 6< $m$ ≤10         | 3,9              | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 88,0  | 124,0 | 176,0 | 249,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 4,3              | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 35,0 | 49,0 | 69,0  | 98,0  | 138,0 | 196,0 | 277,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 4,8              | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0 | 77,0  | 110,0 | 155,0 | 219,0 | 310,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 5,5              | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0 | 88,0  | 124,0 | 176,0 | 249,0 | 351,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 6,5              | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 51,0 | 73,0 | 103,0 | 145,0 | 206,0 | 291,0 | 411,0 |
| 4000< $d$ ≤6000                 | 6< $m$ ≤10         | 4,4              | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 71,0  | 100,0 | 141,0 | 200,0 | 283,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 4,9              | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0 | 78,0  | 110,0 | 155,0 | 220,0 | 311,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 5,5              | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 30,0 | 43,0 | 61,0 | 86,0  | 122,0 | 172,0 | 243,0 | 344,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 6,0              | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0 | 96,0  | 136,0 | 193,0 | 273,0 | 336,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 7,0              | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0 | 79,0 | 111,0 | 158,0 | 223,0 | 315,0 | 445,0 |
| 6000< $d$ ≤8000                 | 10< $m$ ≤16        | 5,5              | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 61,0 | 86,0  | 122,0 | 172,0 | 243,0 | 344,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 6,0              | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0 | 67,0 | 94,0  | 113,0 | 189,0 | 267,0 | 377,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 6,5              | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0 | 74,0 | 105,0 | 148,0 | 209,0 | 296,0 | 419,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 7,5              | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 60,0 | 85,0 | 120,0 | 169,0 | 239,0 | 338,0 | 478,0 |
| 8000< $d$ ≤10000                | 10< $m$ ≤16        | 6,0              | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0 | 93,0  | 132,0 | 186,0 | 263,0 | 372,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 6,5              | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0 | 101,0 | 143,0 | 203,0 | 287,0 | 405,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 7,0              | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0 | 79,0 | 112,0 | 158,0 | 223,0 | 316,0 | 447,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 8,0              | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 63,0 | 90,0 | 127,0 | 179,0 | 253,0 | 358,0 | 507,0 |

**Таблица 4. Погрешность винтовой линии зуба общая (погрешность направления зуба общая)  $F_\beta$**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Ширина венца $b$ , мм | Степень точности |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|------------------------------|-----------------------|------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                              |                       | 0                | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                              |                       | $F_\beta$ , мкм  |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| $5 \leq d \leq 20$           | $4 \leq b \leq 10$    | 1,1              | 1,5 | 2,2  | 3,1  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0  | 35,0  | 49,0  | 69,0  |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,2              | 1,7 | 2,4  | 3,4  | 4,9  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 28,0  | 39,0  | 55,0  | 78,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,4              | 2,0 | 2,8  | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0  | 45,0  | 63,0  | 89,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,6              | 2,3 | 3,3  | 4,6  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0  | 52,0  | 74,0  | 105,0 |
| $20 < d \leq 50$             | $4 \leq b \leq 10$    | 1,1              | 1,6 | 2,2  | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0  | 36,0  | 51,0  | 72,0  |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,3              | 1,8 | 2,5  | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0  | 40,0  | 57,0  | 81,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,4              | 2,0 | 2,9  | 4,1  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0  | 46,0  | 65,0  | 92,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,7              | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 54,0  | 76,0  | 107,0 |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 2,0              | 2,9 | 4,1  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0  | 65,0  | 92,0  | 130,0 |
| $50 < d \leq 125$            | $4 \leq b \leq 10$    | 1,2              | 1,7 | 2,4  | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0  | 38,0  | 53,0  | 76,0  |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,3              | 1,9 | 2,6  | 3,7  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0  | 42,0  | 60,0  | 84,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,5              | 2,1 | 3,0  | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0  | 48,0  | 68,0  | 95,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,7              | 2,5 | 3,5  | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0  | 56,0  | 79,0  | 111,0 |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 2,1              | 2,9 | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0  | 67,0  | 94,0  | 133,0 |
|                              | $160 < b \leq 250$    | 2,5              | 3,5 | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0  | 79,0  | 112,0 | 158,0 |
|                              | $250 < b \leq 400$    | 2,9              | 4,1 | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0 | 65,0  | 92,0  | 130,0 | 184,0 |
| $125 < d \leq 280$           | $4 \leq b \leq 10$    | 1,3              | 1,8 | 2,5  | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0  | 40,0  | 57,0  | 81,0  |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,4              | 2,0 | 2,8  | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0  | 45,0  | 63,0  | 90,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,6              | 2,2 | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0  | 50,0  | 71,0  | 101,0 |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,8              | 2,6 | 3,6  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 82,0  | 117,0 |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 2,2              | 3,1 | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0  | 69,0  | 98,0  | 139,0 |
|                              | $160 < b \leq 250$    | 2,6              | 3,6 | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0  | 82,0  | 116,0 | 164,0 |
|                              | $250 < b \leq 400$    | 3,0              | 4,2 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 47,0 | 67,0  | 95,0  | 134,0 | 190,0 |
| $280 < d \leq 560$           | $400 < b \leq 650$    | 3,5              | 4,9 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0 | 79,0  | 112,0 | 158,0 | 224,0 |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,5              | 2,1 | 3,0  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0  | 48,0  | 68,0  | 97,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,7              | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 54,0  | 76,0  | 108,0 |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,9              | 2,7 | 3,9  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 62,0  | 87,0  | 124,0 |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 2,3              | 3,2 | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 52,0  | 73,0  | 103,0 | 146,0 |
|                              | $160 < b \leq 250$    | 2,7              | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0  | 85,0  | 121,0 | 171,0 |
|                              | $250 < b \leq 400$    | 3,1              | 4,3 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0 | 70,0  | 98,0  | 139,0 | 197,0 |
|                              | $400 < b \leq 650$    | 3,6              | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 82,0  | 115,0 | 163,0 | 231,0 |
| $560 < d \leq 1000$          | $650 < b \leq 1000$   | 4,3              | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0 | 96,0  | 136,0 | 193,0 | 272,0 |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,6              | 2,3 | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0  | 53,0  | 74,0  | 105,0 |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,8              | 2,6 | 3,6  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 82,0  | 116,0 |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 2,1              | 2,9 | 4,1  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0  | 66,0  | 93,0  | 132,0 |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 2,4              | 3,4 | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0  | 77,0  | 109,0 | 154,0 |
|                              | $160 < b \leq 250$    | 2,8              | 4,0 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 63,0  | 90,0  | 127,0 | 179,0 |
|                              | $250 < b \leq 400$    | 3,2              | 4,5 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 51,0 | 73,0  | 103,0 | 145,0 | 205,0 |
|                              | $400 < b \leq 650$    | 3,7              | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 60,0 | 85,0  | 120,0 | 169,0 | 239,0 |
| $650 < b \leq 1000$          | 4,4                   | 6,0              | 9,0 | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 70,0 | 99,0 | 140,0 | 199,0 | 281,0 |       |

**Таблица 4. Погрешность винтовой линии зуба общая (погрешность направления зуба общая)  $F_\beta$  (продолжение)**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Ширина венца<br>$b$ , мм | Степень точности |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 |                          | 0                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                                 |                          | $F_\beta$ , мкм  |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |
| 1000< $d$ ≤1600                 | 20< $b$ ≤40              | 2,0              | 2,8  | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0  | 44,0  | 63,0  | 89,0  | 126,0 |
|                                 | 40< $b$ ≤80              | 2,2              | 3,1  | 4,4  | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0  | 50,0  | 71,0  | 100,0 | 141,0 |
|                                 | 80< $b$ ≤160             | 2,6              | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 82,0  | 116,0 | 164,0 |
|                                 | 160< $b$ ≤250            | 2,9              | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0  | 67,0  | 94,0  | 133,0 | 189,0 |
|                                 | 250< $b$ ≤400            | 3,4              | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 76,0  | 107,0 | 152,0 | 215,0 |
|                                 | 400< $b$ ≤650            | 3,9              | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 88,0  | 124,0 | 176,0 | 249,0 |
| 1600< $d$ ≤2500                 | 20< $b$ ≤40              | 2,1              | 3,0  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0  | 48,0  | 68,0  | 96,0  | 136,0 |
|                                 | 40< $b$ ≤80              | 2,4              | 3,4  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 54,0  | 76,0  | 107,0 | 152,0 |
|                                 | 80< $b$ ≤160             | 2,7              | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0  | 61,0  | 87,0  | 123,0 | 174,0 |
|                                 | 160< $b$ ≤250            | 3,1              | 4,4  | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 70,0  | 99,0  | 141,0 | 199,0 |
|                                 | 250< $b$ ≤400            | 3,5              | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0  | 80,0  | 112,0 | 159,0 | 225,0 |
|                                 | 400< $b$ ≤650            | 4,0              | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0  | 92,0  | 130,0 | 183,0 | 259,0 |
| 2500< $d$ ≤4000                 | 650< $b$ ≤1000           | 4,7              | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 75,0  | 106,0 | 150,0 | 212,0 | 300,0 |
|                                 | 40< $b$ ≤80              | 2,6              | 3,6  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 82,0  | 116,0 | 165,0 |
|                                 | 80< $b$ ≤160             | 2,9              | 4,1  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0  | 66,0  | 93,0  | 132,0 | 187,0 |
|                                 | 160< $b$ ≤250            | 3,3              | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 53,0  | 75,0  | 106,0 | 150,0 | 212,0 |
|                                 | 250< $b$ ≤400            | 3,7              | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 59,0  | 84,0  | 119,0 | 168,0 | 238,0 |
|                                 | 400< $b$ ≤650            | 4,3              | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 96,0  | 136,0 | 192,0 | 272,0 |
| 4000< $d$ ≤6000                 | 650< $b$ ≤1000           | 4,9              | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 55,0 | 78,0  | 111,0 | 157,0 | 222,0 | 314,0 |
|                                 | 80< $b$ ≤160             | 3,2              | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0  | 72,0  | 101,0 | 143,0 | 203,0 |
|                                 | 160< $b$ ≤250            | 3,6              | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 57,0  | 80,0  | 114,0 | 161,0 | 228,0 |
|                                 | 250< $b$ ≤400            | 4,0              | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 63,0  | 90,0  | 127,0 | 179,0 | 253,0 |
|                                 | 400< $b$ ≤650            | 4,5              | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0  | 102,0 | 144,0 | 203,0 | 288,0 |
| 6000< $d$ ≤8000                 | 650< $b$ ≤1000           | 5,0              | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 82,0  | 116,0 | 165,0 | 233,0 | 329,0 |
|                                 | 80< $b$ ≤160             | 3,4              | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 77,0  | 109,0 | 154,0 | 218,0 |
|                                 | 160< $b$ ≤250            | 3,8              | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 61,0  | 86,0  | 121,0 | 171,0 | 242,0 |
|                                 | 250< $b$ ≤400            | 4,2              | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 47,0 | 67,0  | 95,0  | 134,0 | 190,0 | 268,0 |
|                                 | 400< $b$ ≤650            | 4,7              | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 76,0  | 107,0 | 151,0 | 214,0 | 303,0 |
| 8000< $d$ ≤10000                | 650< $b$ ≤1000           | 5,5              | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 30,0 | 43,0 | 61,0 | 86,0  | 122,0 | 172,0 | 243,0 | 344,0 |
|                                 | 80< $b$ ≤160             | 3,6              | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0  | 81,0  | 115,0 | 163,0 | 230,0 |
|                                 | 160< $b$ ≤250            | 4,0              | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 45,0 | 64,0  | 90,0  | 128,0 | 181,0 | 255,0 |
|                                 | 250< $b$ ≤400            | 4,4              | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 70,0  | 99,0  | 141,0 | 199,0 | 281,0 |
|                                 | 400< $b$ ≤650            | 4,9              | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0 | 79,0  | 112,0 | 158,0 | 223,0 | 315,0 |
| 650< $b$ ≤1000                  | 5,5                      | 8,0              | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 63,0 | 89,0 | 126,0 | 178,0 | 252,0 | 357,0 |       |

**Таблица 5. Значения коэффициента  $f'_i/K$**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Модуль $m$ , мм     | Степень точности |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |  |
|------------------------------|---------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|                              |                     | 0                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |  |
|                              |                     | $f'_i/K$ , МКМ   |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |  |
| $5 \leq d \leq 20$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 2,4              | 3,4  | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0  | 38,0  | 54,0  | 77,0  | 109,0 | 154,0 |  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 2,8              | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0  | 45,0  | 64,0  | 91,0  | 129,0 | 182,0 |  |
| $20 < d \leq 50$             | $0,5 \leq m \leq 2$ | 2,5              | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0  | 41,0  | 58,0  | 82,0  | 115,0 | 163,0 |  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 3,0              | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0  | 48,0  | 68,0  | 96,0  | 135,0 | 191,0 |  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 3,4              | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 54,0  | 77,0  | 108,0 | 153,0 | 217,0 |  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 3,9              | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 63,0  | 89,0  | 125,0 | 177,0 | 251,0 |  |
| $50 < d \leq 125$            | $0,5 \leq m \leq 2$ | 2,7              | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0  | 44,0  | 62,0  | 88,0  | 124,0 | 176,0 |  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 3,2              | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0  | 51,0  | 72,0  | 102,0 | 144,0 | 204,0 |  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 3,6              | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 40,0  | 57,0  | 81,0  | 115,0 | 162,0 | 229,0 |  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 4,1              | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0  | 66,0  | 93,0  | 132,0 | 186,0 | 263,0 |  |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 4,8              | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 77,0  | 109,0 | 154,0 | 218,0 | 308,0 |  |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 5,5              | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0  | 91,0  | 129,0 | 183,0 | 259,0 | 366,0 |  |
| $125 < d \leq 280$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 3,0              | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0  | 49,0  | 69,0  | 97,0  | 137,0 | 194,0 |  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 3,5              | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0  | 56,0  | 79,0  | 111,0 | 157,0 | 222,0 |  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 3,9              | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 62,0  | 88,0  | 124,0 | 175,0 | 247,0 |  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 4,4              | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 70,0  | 100,0 | 141,0 | 199,0 | 281,0 |  |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 5,0              | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0  | 82,0  | 115,0 | 163,0 | 231,0 | 326,0 |  |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 6,0              | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 96,0  | 136,0 | 192,0 | 272,0 | 384,0 |  |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 7,5              | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 82,0  | 116,0 | 165,0 | 233,0 | 329,0 | 465,0 |  |
| $280 < d \leq 560$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 3,4              | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0  | 54,0  | 77,0  | 109,0 | 154,0 | 218,0 |  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 3,8              | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 62,0  | 87,0  | 123,0 | 174,0 | 246,0 |  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 4,2              | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0  | 68,0  | 96,0  | 136,0 | 192,0 | 271,0 |  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 4,8              | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 76,0  | 108,0 | 153,0 | 216,0 | 305,0 |  |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 5,5              | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 88,0  | 124,0 | 175,0 | 248,0 | 350,0 |  |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 6,5              | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0  | 102,0 | 144,0 | 204,0 | 289,0 | 408,0 |  |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 7,5              | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0 | 86,0  | 122,0 | 173,0 | 245,0 | 346,0 | 489,0 |  |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 9,5              | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0 | 78,0 | 110,0 | 155,0 | 220,0 | 311,0 | 439,0 | 621,0 |  |
| $560 < d \leq 1000$          | $0,5 \leq m \leq 2$ | 3,9              | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 62,0  | 87,0  | 123,0 | 174,0 | 247,0 |  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 4,3              | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 49,0  | 69,0  | 97,0  | 137,0 | 194,0 | 275,0 |  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 4,7              | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0  | 75,0  | 106,0 | 150,0 | 212,0 | 300,0 |  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 5,0              | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 59,0  | 84,0  | 118,0 | 167,0 | 236,0 | 334,0 |  |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 6,0              | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0 | 67,0  | 95,0  | 134,0 | 189,0 | 268,0 | 379,0 |  |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 7,0              | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0 | 77,0  | 109,0 | 154,0 | 218,0 | 309,0 | 437,0 |  |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 8,0              | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0 | 92,0  | 129,0 | 183,0 | 259,0 | 366,0 | 518,0 |  |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 10,0             | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 57,0 | 81,0 | 115,0 | 163,0 | 230,0 | 325,0 | 460,0 | 650,0 |  |
| $1000 < d \leq 1600$         | $2 \leq m \leq 3,5$ | 4,8              | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 77,0  | 108,0 | 153,0 | 217,0 | 307,0 |  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 5,0              | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 59,0  | 83,0  | 117,0 | 166,0 | 235,0 | 332,0 |  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 5,5              | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0  | 91,0  | 129,0 | 183,0 | 259,0 | 366,0 |  |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 6,5              | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 51,0 | 73,0  | 103,0 | 145,0 | 205,0 | 290,0 | 410,0 |  |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 7,5              | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 59,0 | 83,0  | 117,0 | 166,0 | 234,0 | 331,0 | 468,0 |  |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 8,5              | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 49,0 | 69,0 | 97,0  | 137,0 | 194,0 | 275,0 | 389,0 | 550,0 |  |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 11,0             | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0 | 85,0 | 120,0 | 170,0 | 241,0 | 341,0 | 482,0 | 682,0 |  |

**Таблица 5. Значения коэффициента  $f_i'/K$  (продолжение)**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Модуль<br>$m$ , мм | Степень точности |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------------------|------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 |                    | 0                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                                 |                    | $f_i'/K$ , мкм   |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
| 1600< $d$ ≤2500                 | 3,5≤ $m$ ≤6        | 5,5              | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0  | 65,0  | 92,0  | 130,0 | 183,0 | 259,0 | 367,0 |
|                                 | 6< $m$ ≤10         | 6,5              | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 71,0  | 100,0 | 142,0 | 200,0 | 283,0 | 401,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 7,0              | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0  | 79,0  | 111,0 | 158,0 | 223,0 | 315,0 | 446,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 8,0              | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 45,0 | 63,0  | 89,0  | 126,0 | 178,0 | 252,0 | 356,0 | 504,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 9,0              | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0 | 73,0  | 103,0 | 146,0 | 207,0 | 292,0 | 413,0 | 585,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 11,0             | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 63,0 | 90,0  | 127,0 | 179,0 | 253,0 | 358,0 | 507,0 | 717,0 |
| 2500< $d$ ≤4000                 | 6≤ $m$ ≤10         | 7,0              | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0  | 79,0  | 111,0 | 157,0 | 223,0 | 315,0 | 445,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 7,5              | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0  | 87,0  | 122,0 | 173,0 | 245,0 | 346,0 | 490,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 8,5              | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 97,0  | 137,0 | 194,0 | 274,0 | 387,0 | 548,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 10,0             | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0 | 79,0  | 111,0 | 157,0 | 222,0 | 315,0 | 445,0 | 629,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 12,0             | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 67,0 | 95,0  | 135,0 | 190,0 | 269,0 | 381,0 | 538,0 | 761,0 |
| 4000< $d$ ≤6000                 | 6≤ $m$ ≤10         | 8,0              | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 88,0  | 125,0 | 176,0 | 249,0 | 352,0 | 498,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 8,5              | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 96,0  | 136,0 | 192,0 | 271,0 | 384,0 | 543,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 9,5              | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 75,0  | 106,0 | 150,0 | 212,0 | 300,0 | 425,0 | 601,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 11,0             | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0 | 85,0  | 121,0 | 170,0 | 241,0 | 341,0 | 482,0 | 682,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 13,0             | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0 | 102,0 | 144,0 | 204,0 | 288,0 | 407,0 | 576,0 | 814,0 |
| 6000< $d$ ≤8000                 | 10≤ $m$ ≤16        | 9,5              | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0 | 74,0  | 105,0 | 148,0 | 210,0 | 297,0 | 420,0 | 594,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 10,0             | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 81,0  | 115,0 | 163,0 | 230,0 | 326,0 | 461,0 | 652,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 11,0             | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0 | 92,0  | 130,0 | 183,0 | 259,0 | 366,0 | 518,0 | 733,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 14,0             | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 76,0 | 108,0 | 153,0 | 216,0 | 306,0 | 432,0 | 612,0 | 865,0 |
| 8000< $d$ ≤10000                | 10≤ $m$ ≤16        | 10,0             | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0 | 80,0  | 113,0 | 159,0 | 225,0 | 319,0 | 451,0 | 637,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 11,0             | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0 | 87,0  | 123,0 | 174,0 | 246,0 | 348,0 | 492,0 | 695,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 12,0             | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 49,0 | 69,0 | 97,0  | 137,0 | 194,0 | 275,0 | 388,0 | 549,0 | 777,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 14,0             | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 57,0 | 80,0 | 114,0 | 161,0 | 227,0 | 321,0 | 454,0 | 642,0 | 909,0 |

Замечание. Значения допусков для  $f_i'$  получаются при умножении табличных величин на  $K$ .

$$K = 0,2 \left( \frac{\varepsilon_\gamma + 4}{\varepsilon_\gamma} \right) - \text{при } \varepsilon_\gamma < 4,$$

$$K = 0,4 - \text{при } \varepsilon_\gamma \geq 4,$$

где  $\varepsilon_\gamma$  – коэффициент перекрытия [69].

**Таблица 6. Погрешность формы профиля зуба  $f_{f\alpha}$**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Модуль $m$ , мм     | Степень точности    |     |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|------------------------------|---------------------|---------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|                              |                     | 0                   | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10    | 11    | 12    |
|                              |                     | $f_{f\alpha}$ , МКМ |     |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
| $5 \leq d \leq 20$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,6                 | 0,9 | 1,3 | 1,8  | 2,5  | 3,5  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0  | 28,0  | 40,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 0,9                 | 1,3 | 1,8 | 2,6  | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0  | 41,0  | 58,0  |
| $20 < d \leq 50$             | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,7                 | 1,0 | 1,4 | 2,0  | 2,8  | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0  | 32,0  | 45,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,0                 | 1,4 | 2,0 | 2,8  | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0  | 44,0  | 62,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,2                 | 1,7 | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0  | 54,0  | 77,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,5                 | 2,1 | 3,0 | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0  | 67,0  | 95,0  |
| $50 < d \leq 125$            | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,8                 | 1,1 | 1,6 | 2,3  | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0  | 36,0  | 51,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,1                 | 1,5 | 2,1 | 3,0  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0  | 49,0  | 69,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,3                 | 1,8 | 2,6 | 3,7  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 42,0  | 59,0  | 83,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,6                 | 2,2 | 3,2 | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0  | 72,0  | 101,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 1,9                 | 2,7 | 3,9 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 87,0  | 123,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 2,3                 | 3,3 | 4,7 | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 53,0 | 75,0  | 106,0 | 149,0 |
| $125 < d \leq 280$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,9                 | 1,3 | 1,9 | 2,7  | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0  | 43,0  | 60,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,2                 | 1,7 | 2,4 | 3,4  | 4,9  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 28,0 | 39,0  | 55,0  | 78,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,4                 | 2,0 | 2,9 | 4,1  | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0  | 65,0  | 93,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,7                 | 2,4 | 3,5 | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 55,0  | 78,0  | 111,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,1                 | 2,9 | 4,0 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0  | 94,0  | 133,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 2,5                 | 3,5 | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0 | 79,0  | 112,0 | 158,0 |
|                              | $25 \leq m \leq 40$ | 3,0                 | 4,2 | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0 | 96,0  | 135,0 | 191,0 |
| $280 < d \leq 560$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,1                 | 1,6 | 2,3 | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0  | 51,0  | 72,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,4                 | 2,0 | 2,8 | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0  | 64,0  | 90,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,6                 | 2,3 | 3,3 | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0  | 74,0  | 104,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,9                 | 2,7 | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0  | 87,0  | 123,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,3                 | 3,2 | 4,5 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0  | 102,0 | 145,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 2,7                 | 3,8 | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0 | 85,0  | 121,0 | 170,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 3,2                 | 4,5 | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0 | 101,0 | 144,0 | 203,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 3,9                 | 5,5 | 8,0 | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0 | 88,0 | 125,0 | 177,0 | 250,0 |
| $560 < d \leq 1000$          | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,4                 | 1,9 | 2,7 | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0  | 61,0  | 87,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,6                 | 2,3 | 3,3 | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0  | 74,0  | 104,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,9                 | 2,6 | 3,7 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 59,0  | 84,0  | 119,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 2,1                 | 3,0 | 4,3 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 97,0  | 137,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,5                 | 3,5 | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0 | 79,0  | 112,0 | 159,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 2,9                 | 4,1 | 6,0 | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0 | 65,0 | 92,0  | 131,0 | 185,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 3,4                 | 4,8 | 7,0 | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 77,0 | 109,0 | 154,0 | 217,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 4,1                 | 6,0 | 8,5 | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0 | 93,0 | 132,0 | 187,0 | 264,0 |
| $1000 < d \leq 1600$         | $2 \leq m \leq 3,5$ | 1,9                 | 2,7 | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,5 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 60,0  | 85,0  | 120,0 |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 2,1                 | 3,0 | 4,2 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 67,0  | 95,0  | 135,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 2,4                 | 3,4 | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 76,0  | 108,0 | 153,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,7                 | 3,9 | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0 | 87,0  | 124,0 | 175,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 3,1                 | 4,4 | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 71,0 | 100,0 | 142,0 | 201,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 3,6                 | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 82,0 | 117,0 | 165,0 | 233,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 4,4                 | 6,0 | 8,5 | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0 | 70,0 | 99,0 | 140,0 | 198,0 | 280,0 |

**Таблица 6. Погрешность формы профиля зуба  $f_{f\alpha}$  (продолжение)**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Модуль<br>$m$ , мм | Степень точности    |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                                 |                    | 0                   | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                                 |                    | $f_{f\alpha}$ , МКМ |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| 1600< $d$ ≤2500                 | 3,5≤ $m$ ≤6        | 2,4                 | 3,4 | 4,8  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 76,0  | 108,0 | 152,0 |
|                                 | 6< $m$ ≤10         | 2,7                 | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0  | 85,0  | 120,0 | 170,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 3,0                 | 4,2 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 96,0  | 136,0 | 192,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 3,4                 | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0 | 77,0  | 109,0 | 154,0 | 218,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 3,9                 | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 63,0 | 89,0  | 125,0 | 177,0 | 251,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 4,6                 | 6,5 | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 53,0 | 74,0 | 105,0 | 149,0 | 210,0 | 297,0 |
| 2500< $d$ ≤4000                 | 6≤ $m$ ≤10         | 3,0                 | 4,3 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0  | 96,0  | 136,0 | 193,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 3,4                 | 4,7 | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 76,0  | 107,0 | 152,0 | 214,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 3,8                 | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 60,0 | 85,0  | 120,0 | 170,0 | 240,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 4,3                 | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0 | 96,0  | 136,0 | 193,0 | 273,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 5,0                 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0 | 80,0 | 113,0 | 160,0 | 226,0 | 320,0 |
| 4000< $d$ ≤6000                 | 6≤ $m$ ≤10         | 3,4                 | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0 | 77,0  | 109,0 | 155,0 | 219,0 |
|                                 | 10< $m$ ≤16        | 3,8                 | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0 | 85,0  | 120,0 | 170,0 | 241,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 4,2                 | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0 | 67,0 | 94,0  | 133,0 | 189,0 | 267,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 4,7                 | 6,5 | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0 | 37,0 | 53,0 | 75,0 | 106,0 | 150,0 | 212,0 | 299,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 5,5                 | 7,5 | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0 | 87,0 | 122,0 | 173,0 | 245,0 | 346,0 |
| 6000< $d$ ≤8000                 | 10≤ $m$ ≤16        | 4,2                 | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0 | 67,0 | 94,0  | 133,0 | 188,0 | 266,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 4,6                 | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0 | 73,0 | 103,0 | 146,0 | 207,0 | 292,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 5,0                 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 57,0 | 81,0 | 115,0 | 162,0 | 230,0 | 325,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 6,0                 | 8,0 | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0 | 66,0 | 93,0 | 131,0 | 186,0 | 263,0 | 371,0 |
| 8000< $d$ ≤10000                | 10≤ $m$ ≤16        | 4,5                 | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0 | 102,0 | 144,0 | 204,0 | 288,0 |
|                                 | 16< $m$ ≤25        | 4,9                 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0 | 79,0 | 111,0 | 157,0 | 222,0 | 314,0 |
|                                 | 25< $m$ ≤40        | 5,5                 | 7,5 | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0 | 87,0 | 123,0 | 173,0 | 245,0 | 347,0 |
|                                 | 40< $m$ ≤70        | 6,0                 | 8,5 | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0 | 70,0 | 98,0 | 139,0 | 197,0 | 278,0 | 393,0 |

**Таблица 7. Погрешность наклона профиля зуба  $\pm f_{H\alpha}$**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Модуль $m$ , мм     | Степень точности        |     |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|------------------------------|---------------------|-------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|                              |                     | 0                       | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10    | 11    | 12    |
|                              |                     | $\pm f_{H\alpha}$ , МКМ |     |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
| $5 < d \leq 20$              | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,5                     | 0,7 | 1,0 | 1,5  | 2,1  | 2,9  | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0  | 24,0  | 33,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 0,7                     | 1,0 | 1,5 | 2,1  | 3,0  | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0  | 34,0  | 47,0  |
| $20 < d \leq 50$             | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,6                     | 0,8 | 1,2 | 1,6  | 2,3  | 3,3  | 4,6  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0  | 26,0  | 37,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 0,8                     | 1,1 | 1,6 | 2,3  | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0  | 36,0  | 51,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,0                     | 1,4 | 2,0 | 2,8  | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0  | 45,0  | 63,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,2                     | 1,7 | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0  | 55,0  | 78,0  |
| $50 < d \leq 125$            | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,7                     | 0,9 | 1,3 | 1,9  | 2,6  | 3,7  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0  | 30,0  | 42,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 0,9                     | 1,2 | 1,8 | 2,5  | 3,5  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0  | 40,0  | 57,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,1                     | 1,5 | 2,1 | 3,0  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0  | 48,0  | 68,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,3                     | 1,8 | 2,6 | 3,7  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 83,0  |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 1,6                     | 2,2 | 3,1 | 4,4  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 71,0  | 100,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 1,9                     | 2,7 | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0  | 86,0  | 121,0 |
| $125 < d \leq 280$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,8                     | 1,1 | 1,6 | 2,2  | 3,1  | 4,4  | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0  | 35,0  | 50,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,0                     | 1,4 | 2,0 | 2,8  | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0  | 45,0  | 64,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,2                     | 1,7 | 2,4 | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0  | 54,0  | 76,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,4                     | 2,0 | 2,8 | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 45,0  | 64,0  | 90,0  |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 1,7                     | 2,4 | 3,4 | 4,8  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 76,0  | 108,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 2,0                     | 2,8 | 4,0 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 45,0 | 64,0  | 91,0  | 129,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 2,4                     | 3,4 | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 55,0 | 77,0  | 109,0 | 155,0 |
| $280 < d \leq 560$           | $0,5 \leq m \leq 2$ | 0,9                     | 1,3 | 1,9 | 2,6  | 3,7  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0  | 42,0  | 60,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,2                     | 1,6 | 2,3 | 3,3  | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0  | 52,0  | 74,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,3                     | 1,9 | 2,7 | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0  | 61,0  | 86,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,6                     | 2,2 | 3,1 | 4,4  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 71,0  | 100,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 1,8                     | 2,6 | 3,7 | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 42,0 | 59,0  | 83,0  | 118,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 2,2                     | 3,1 | 4,3 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 35,0 | 49,0 | 69,0  | 98,0  | 138,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 2,6                     | 3,6 | 5,0 | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 82,0  | 116,0 | 164,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 3,2                     | 4,5 | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 50,0 | 71,0 | 101,0 | 143,0 | 202,0 |
| $560 < d \leq 1000$          | $0,5 \leq m \leq 2$ | 1,1                     | 1,6 | 2,2 | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0  | 51,0  | 72,0  |
|                              | $2 < m \leq 3,5$    | 1,3                     | 1,9 | 2,7 | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0  | 61,0  | 86,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,5                     | 2,2 | 3,0 | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 49,0  | 69,0  | 97,0  |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 1,7                     | 2,5 | 3,5 | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0  | 79,0  | 112,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,0                     | 2,9 | 4,0 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0  | 92,0  | 129,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 2,3                     | 3,3 | 4,7 | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 75,0  | 106,0 | 150,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 2,8                     | 3,9 | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0 | 88,0  | 125,0 | 176,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 3,3                     | 4,7 | 6,5 | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 76,0 | 107,0 | 151,0 | 214,0 |
| $1000 < d \leq 1600$         | $2 \leq m \leq 3,5$ | 1,5                     | 2,2 | 3,1 | 4,4  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0  | 70,0  | 99,0  |
|                              | $3,5 < m \leq 6$    | 1,7                     | 2,4 | 3,5 | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 55,0  | 78,0  | 110,0 |
|                              | $6 < m \leq 10$     | 2,0                     | 2,8 | 3,9 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 88,0  | 125,0 |
|                              | $10 < m \leq 16$    | 2,2                     | 3,1 | 4,5 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 50,0 | 71,0  | 101,0 | 142,0 |
|                              | $16 < m \leq 25$    | 2,5                     | 3,6 | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 82,0  | 115,0 | 163,0 |
|                              | $25 < m \leq 40$    | 3,0                     | 4,2 | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 33,0 | 47,0 | 67,0 | 95,0  | 134,0 | 189,0 |
|                              | $40 < m \leq 70$    | 3,5                     | 5,0 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 57,0 | 80,0 | 113,0 | 160,0 | 227,0 |

**Таблица 7. Погрешность наклона профиля зуба  $\pm f_{H\alpha}$  (продолжение)**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Модуль $m$ , мм | Степень точности        |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|------------------------------|-----------------|-------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                              |                 | 0                       | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                              |                 | $\pm f_{H\alpha}$ , МКМ |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| 1600 < $d$ ≤ 2500            | 3,5 < $m$ ≤ 6   | 2,0                     | 2,8 | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0  | 62,0  | 88,0  | 125,0 |
|                              | 6 < $m$ ≤ 10    | 2,2                     | 3,1 | 4,4  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0  | 70,0  | 99,0  | 139,0 |
|                              | 10 < $m$ ≤ 16   | 2,5                     | 3,5 | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 55,0  | 78,0  | 111,0 | 157,0 |
|                              | 16 < $m$ ≤ 25   | 2,8                     | 3,9 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 63,0  | 89,0  | 126,0 | 178,0 |
|                              | 25 < $m$ ≤ 40   | 3,2                     | 4,5 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0  | 102,0 | 144,0 | 204,0 |
|                              | 40 < $m$ ≤ 70   | 3,8                     | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0 | 85,0  | 121,0 | 170,0 | 241,0 |
| 2500 < $d$ ≤ 4000            | 6 < $m$ ≤ 10    | 2,5                     | 3,5 | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0  | 79,0  | 112,0 | 158,0 |
|                              | 10 < $m$ ≤ 16   | 2,7                     | 3,9 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 88,0  | 124,0 | 175,0 |
|                              | 16 < $m$ ≤ 25   | 3,1                     | 4,3 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 35,0 | 49,0 | 69,0  | 98,0  | 139,0 | 196,0 |
|                              | 25 < $m$ ≤ 40   | 3,5                     | 4,9 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 55,0 | 78,0  | 111,0 | 157,0 | 222,0 |
|                              | 40 < $m$ ≤ 70   | 4,1                     | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 46,0 | 65,0 | 92,0  | 130,0 | 183,0 | 259,0 |
| 4000 < $d$ ≤ 6000            | 6 < $m$ ≤ 10    | 2,8                     | 4,0 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 63,0  | 90,0  | 127,0 | 179,0 |
|                              | 10 < $m$ ≤ 16   | 3,1                     | 4,4 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0 | 49,0 | 70,0  | 98,0  | 139,0 | 197,0 |
|                              | 16 < $m$ ≤ 25   | 3,4                     | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 77,0  | 109,0 | 154,0 | 218,0 |
|                              | 25 < $m$ ≤ 40   | 3,8                     | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 30,0 | 43,0 | 61,0 | 86,0  | 122,0 | 172,0 | 244,0 |
|                              | 40 < $m$ ≤ 70   | 4,4                     | 6,0 | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 70,0 | 99,0  | 141,0 | 199,0 | 281,0 |
| 6000 < $d$ ≤ 8000            | 10 < $m$ ≤ 16   | 3,4                     | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 54,0 | 77,0  | 109,0 | 154,0 | 218,0 |
|                              | 16 < $m$ ≤ 25   | 3,7                     | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 60,0 | 84,0  | 119,0 | 169,0 | 239,0 |
|                              | 25 < $m$ ≤ 40   | 4,1                     | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0 | 94,0  | 132,0 | 187,0 | 265,0 |
|                              | 40 < $m$ ≤ 70   | 4,7                     | 6,5 | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 76,0 | 107,0 | 151,0 | 214,0 | 302,0 |
| 8000 < $d$ ≤ 10000           | 10 < $m$ ≤ 16   | 3,7                     | 5,0 | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 42,0 | 59,0 | 83,0  | 118,0 | 167,0 | 236,0 |
|                              | 16 < $m$ ≤ 25   | 4,0                     | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 45,0 | 64,0 | 91,0  | 128,0 | 181,0 | 257,0 |
|                              | 25 < $m$ ≤ 40   | 4,4                     | 6,0 | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 71,0 | 100,0 | 141,0 | 200,0 | 283,0 |
|                              | 40 < $m$ ≤ 70   | 5,0                     | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 57,0 | 80,0 | 113,0 | 160,0 | 226,0 | 320,0 |

**Таблица 8. Погрешность формы контактной линии зуба  $f_{\beta}$  и погрешность наклона винтовой линии зуба  $f_{H\beta}$**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Ширина венца $b$ , мм | Степень точности                 |     |     |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|                              |                       | 0                                | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10    | 11    | 12    |
|                              |                       | $f_{\beta}$ и $f_{H\beta}$ , мкм |     |     |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| $5 \leq d \leq 20$           | $4 \leq b \leq 10$    | 0,8                              | 1,1 | 1,5 | 2,2  | 3,1  | 4,4  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0  | 25,0  | 35,0  | 49,0  |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 0,9                              | 1,2 | 1,7 | 2,5  | 3,5  | 4,9  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0  | 28,0  | 39,0  | 56,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,0                              | 1,4 | 2,0 | 2,8  | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0  | 32,0  | 45,0  | 64,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,2                              | 1,7 | 2,3 | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0  | 37,0  | 53,0  | 75,0  |
| $20 < d \leq 50$             | $4 \leq b \leq 10$    | 0,8                              | 1,1 | 1,6 | 2,3  | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0  | 26,0  | 36,0  | 51,0  |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 0,9                              | 1,3 | 1,8 | 2,5  | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0  | 29,0  | 41,0  | 58,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,0                              | 1,4 | 2,0 | 2,9  | 4,1  | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0  | 33,0  | 46,0  | 65,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,2                              | 1,7 | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0  | 38,0  | 54,0  | 77,0  |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 1,4                              | 2,0 | 2,9 | 4,1  | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0  | 46,0  | 65,0  | 93,0  |
| $50 < d \leq 125$            | $4 \leq b \leq 10$    | 0,8                              | 1,2 | 1,7 | 2,4  | 3,4  | 4,8  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0  | 27,0  | 38,0  | 54,0  |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 0,9                              | 1,3 | 1,9 | 2,7  | 3,8  | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0  | 30,0  | 43,0  | 60,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,1                              | 1,5 | 2,1 | 3,0  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0  | 34,0  | 48,0  | 68,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,2                              | 1,8 | 2,5 | 3,5  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0  | 40,0  | 56,0  | 79,0  |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 1,5                              | 2,1 | 3,0 | 4,2  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0  | 48,0  | 67,0  | 95,0  |
|                              | $160 < b \leq 250$    | 1,8                              | 2,5 | 3,5 | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0  | 56,0  | 80,0  | 113,0 |
|                              | $250 < b \leq 400$    | 2,1                              | 2,9 | 4,1 | 6,0  | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0  | 66,0  | 93,0  | 132,0 |
| $125 < d \leq 280$           | $4 \leq b \leq 10$    | 0,9                              | 1,3 | 1,8 | 2,5  | 3,6  | 5,0  | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0  | 29,0  | 41,0  | 58,0  |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,0                              | 1,4 | 2,0 | 2,8  | 4,0  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0  | 32,0  | 45,0  | 64,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,1                              | 1,6 | 2,2 | 3,2  | 4,5  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0  | 36,0  | 51,0  | 72,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,3                              | 1,8 | 2,6 | 3,7  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0  | 42,0  | 59,0  | 83,0  |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 1,5                              | 2,2 | 3,1 | 4,4  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 25,0 | 35,0  | 49,0  | 70,0  | 99,0  |
|                              | $160 < b \leq 250$    | 1,8                              | 2,6 | 3,6 | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0  | 58,0  | 83,0  | 117,0 |
|                              | $250 < b \leq 400$    | 2,1                              | 3,0 | 4,2 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0  | 68,0  | 96,0  | 135,0 |
| $280 < d \leq 560$           | $400 < b \leq 650$    | 2,5                              | 3,5 | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0  | 80,0  | 113,0 | 160,0 |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,1                              | 1,5 | 2,2 | 3,0  | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0  | 34,0  | 49,0  | 69,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,2                              | 1,7 | 2,4 | 3,4  | 4,8  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0  | 38,0  | 54,0  | 77,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,4                              | 1,9 | 2,7 | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0  | 44,0  | 62,0  | 88,0  |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 1,6                              | 2,3 | 3,2 | 4,6  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0  | 52,0  | 73,0  | 104,0 |
|                              | $160 < b \leq 250$    | 1,9                              | 2,7 | 3,8 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 30,0 | 43,0  | 61,0  | 86,0  | 122,0 |
|                              | $250 < b \leq 400$    | 2,2                              | 3,1 | 4,4 | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 70,0  | 99,0  | 140,0 |
|                              | $400 < b \leq 650$    | 2,6                              | 3,6 | 5,0 | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0  | 82,0  | 116,0 | 165,0 |
| $560 < d \leq 1000$          | $650 < b \leq 1000$   | 3,0                              | 4,3 | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 49,0 | 69,0  | 97,0  | 137,0 | 194,0 |
|                              | $10 < b \leq 20$      | 1,2                              | 1,7 | 2,3 | 3,3  | 4,7  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 26,0  | 37,0  | 53,0  | 75,0  |
|                              | $20 < b \leq 40$      | 1,3                              | 1,8 | 2,6 | 3,7  | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0  | 41,0  | 58,0  | 83,0  |
|                              | $40 < b \leq 80$      | 1,5                              | 2,1 | 2,9 | 4,1  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0  | 47,0  | 66,0  | 94,0  |
|                              | $80 < b \leq 160$     | 1,7                              | 2,4 | 3,4 | 4,9  | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0  | 55,0  | 78,0  | 110,0 |
|                              | $160 < b \leq 250$    | 2,0                              | 2,8 | 4,0 | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 45,0  | 64,0  | 90,0  | 128,0 |
|                              | $250 < b \leq 400$    | 2,3                              | 3,2 | 4,6 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0  | 73,0  | 103,0 | 146,0 |
|                              | $400 < b \leq 650$    | 2,7                              | 3,8 | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 60,0  | 85,0  | 121,0 | 171,0 |
| $650 < b \leq 1000$          | 3,1                   | 4,4                              | 6,5 | 9,0 | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 71,0 | 100,0 | 142,0 | 200,0 |       |

**Таблица 8. Погрешность формы контактной линии зуба  $f_{f\beta}$  и погрешность наклона винтовой линии зуба  $f_{H\beta}$  (продолжение)**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Ширина венца $b$ , мм | Степень точности                  |     |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|                              |                       | 0                                 | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10    | 11    | 12    |
|                              |                       | $f_{f\beta}$ и $f_{H\beta}$ , мкм |     |     |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
| 1000< $d$ ≤1600              | 20< $b$ ≤40           | 1,4                               | 2,0 | 2,8 | 3,9  | 5,5  | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0  | 63,0  | 89,0  |
|                              | 40< $b$ ≤80           | 1,6                               | 2,2 | 3,1 | 4,4  | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0  | 71,0  | 100,0 |
|                              | 80< $b$ ≤160          | 1,8                               | 2,6 | 3,6 | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0  | 82,0  | 116,0 |
|                              | 160< $b$ ≤250         | 2,1                               | 3,0 | 4,2 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 47,0 | 67,0  | 95,0  | 134,0 |
|                              | 250< $b$ ≤400         | 2,4                               | 3,4 | 4,8 | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 76,0  | 108,0 | 153,0 |
|                              | 400< $b$ ≤650         | 2,8                               | 3,9 | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 63,0 | 89,0  | 125,0 | 177,0 |
|                              | 650< $b$ ≤1000        | 3,2                               | 4,6 | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 37,0 | 52,0 | 73,0 | 103,0 | 146,0 | 207,0 |
| 1600< $d$ ≤2500              | 20< $b$ ≤40           | 1,5                               | 2,1 | 3,0 | 4,3  | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0  | 68,0  | 96,0  |
|                              | 40< $b$ ≤80           | 1,7                               | 2,4 | 3,4 | 4,8  | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0  | 76,0  | 108,0 |
|                              | 80< $b$ ≤160          | 1,9                               | 2,7 | 3,9 | 5,5  | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 44,0 | 62,0  | 87,0  | 124,0 |
|                              | 160< $b$ ≤250         | 2,2                               | 3,1 | 4,4 | 6,0  | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 71,0  | 100,0 | 141,0 |
|                              | 250< $b$ ≤400         | 2,5                               | 3,5 | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 57,0 | 80,0  | 113,0 | 160,0 |
|                              | 400< $b$ ≤650         | 2,9                               | 4,1 | 6,0 | 8,0  | 12,0 | 16,0 | 23,0 | 33,0 | 46,0 | 65,0 | 92,0  | 130,0 | 184,0 |
|                              | 650< $b$ ≤1000        | 3,3                               | 4,7 | 6,5 | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 76,0 | 107,0 | 151,0 | 214,0 |
| 2500< $d$ ≤4000              | 40< $b$ ≤80           | 1,8                               | 2,6 | 3,6 | 5,0  | 7,5  | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0  | 83,0  | 117,0 |
|                              | 80< $b$ ≤160          | 2,1                               | 2,9 | 4,1 | 6,0  | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 23,0 | 33,0 | 47,0 | 66,0  | 94,0  | 133,0 |
|                              | 160< $b$ ≤250         | 2,4                               | 3,3 | 4,7 | 6,5  | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 53,0 | 75,0  | 106,0 | 150,0 |
|                              | 250< $b$ ≤400         | 2,6                               | 3,7 | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 42,0 | 60,0 | 85,0  | 120,0 | 169,0 |
|                              | 400< $b$ ≤650         | 3,0                               | 4,3 | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 68,0 | 97,0  | 137,0 | 193,0 |
|                              | 650< $b$ ≤1000        | 3,5                               | 4,9 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 39,0 | 56,0 | 79,0 | 112,0 | 158,0 | 223,0 |
| 4000< $d$ ≤6000              | 80< $b$ ≤160          | 2,2                               | 3,2 | 4,5 | 6,5  | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 25,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0  | 101,0 | 144,0 |
|                              | 160< $b$ ≤250         | 2,5                               | 3,6 | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 40,0 | 57,0 | 81,0  | 114,0 | 161,0 |
|                              | 250< $b$ ≤400         | 2,8                               | 4,0 | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 64,0 | 90,0  | 127,0 | 180,0 |
|                              | 400< $b$ ≤650         | 3,2                               | 4,5 | 6,5 | 9,0  | 13,0 | 18,0 | 26,0 | 36,0 | 51,0 | 72,0 | 102,0 | 144,0 | 204,0 |
|                              | 650< $b$ ≤1000        | 3,7                               | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 15,0 | 21,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 83,0 | 117,0 | 165,0 | 234,0 |
| 6000< $d$ ≤8000              | 80< $b$ ≤160          | 2,4                               | 3,4 | 4,8 | 7,0  | 9,5  | 14,0 | 19,0 | 27,0 | 39,0 | 54,0 | 77,0  | 109,0 | 154,0 |
|                              | 160< $b$ ≤250         | 2,7                               | 3,8 | 5,5 | 7,5  | 11,0 | 15,0 | 21,0 | 30,0 | 43,0 | 61,0 | 86,0  | 122,0 | 172,0 |
|                              | 250< $b$ ≤400         | 3,0                               | 4,2 | 6,0 | 8,5  | 12,0 | 17,0 | 24,0 | 34,0 | 48,0 | 67,0 | 95,0  | 135,0 | 190,0 |
|                              | 400< $b$ ≤650         | 3,4                               | 4,7 | 6,5 | 9,5  | 13,0 | 19,0 | 27,0 | 38,0 | 54,0 | 76,0 | 107,0 | 152,0 | 215,0 |
|                              | 650< $b$ ≤1000        | 3,8                               | 5,5 | 7,5 | 11,0 | 15,0 | 22,0 | 31,0 | 43,0 | 61,0 | 86,0 | 122,0 | 173,0 | 244,0 |
| 8000< $d$ ≤10000             | 80< $b$ ≤160          | 2,5                               | 3,6 | 5,0 | 7,0  | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 29,0 | 41,0 | 58,0 | 81,0  | 115,0 | 163,0 |
|                              | 160< $b$ ≤250         | 2,8                               | 4,0 | 5,5 | 8,0  | 11,0 | 16,0 | 23,0 | 32,0 | 45,0 | 64,0 | 90,0  | 128,0 | 181,0 |
|                              | 250< $b$ ≤400         | 3,1                               | 4,4 | 6,0 | 9,0  | 12,0 | 18,0 | 25,0 | 35,0 | 50,0 | 70,0 | 100,0 | 141,0 | 199,0 |
|                              | 400< $b$ ≤650         | 3,5                               | 4,9 | 7,0 | 10,0 | 14,0 | 20,0 | 28,0 | 40,0 | 56,0 | 79,0 | 112,0 | 158,0 | 224,0 |
|                              | 650< $b$ ≤1000        | 4,0                               | 5,5 | 8,0 | 11,0 | 16,0 | 22,0 | 32,0 | 45,0 | 63,0 | 90,0 | 127,0 | 179,0 | 253,0 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Материалы стандарта ISO 1328-2:1997

**Таблица 1. Допуск на полное радиальное составное отклонение (на полное колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса)  $F_i''$**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Нормальный модуль<br>$m_n$ , мм | Степень точности |    |    |    |     |     |     |     |     |
|---------------------------------|---------------------------------|------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                 |                                 | 4                | 5  | 6  | 7  | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|                                 |                                 | $F_i''$ , мкм    |    |    |    |     |     |     |     |     |
| $5 \leq d \leq 20$              | $0,2 \leq m_n \leq 0,5$         | 7,5              | 11 | 15 | 21 | 30  | 42  | 60  | 85  | 120 |
|                                 | $0,5 < m_n \leq 0,8$            | 8,0              | 12 | 16 | 23 | 33  | 46  | 66  | 93  | 131 |
|                                 | $0,8 < m_n \leq 1,0$            | 9,0              | 12 | 18 | 25 | 35  | 50  | 70  | 100 | 141 |
|                                 | $1,0 < m_n \leq 1,5$            | 10               | 14 | 19 | 27 | 38  | 54  | 76  | 108 | 153 |
|                                 | $1,5 < m_n \leq 2,5$            | 11               | 16 | 22 | 32 | 45  | 63  | 89  | 126 | 179 |
|                                 | $2,5 < m_n \leq 4,0$            | 14               | 20 | 28 | 39 | 56  | 79  | 112 | 158 | 223 |
| $20 < d \leq 50$                | $0,2 \leq m_n \leq 0,5$         | 9,0              | 13 | 19 | 26 | 37  | 52  | 74  | 105 | 148 |
|                                 | $0,5 < m_n \leq 0,8$            | 10               | 14 | 20 | 28 | 40  | 56  | 80  | 113 | 160 |
|                                 | $0,8 < m_n \leq 1,0$            | 11               | 15 | 21 | 30 | 42  | 60  | 85  | 120 | 169 |
|                                 | $1,0 < m_n \leq 1,5$            | 11               | 16 | 23 | 32 | 45  | 64  | 91  | 128 | 181 |
|                                 | $1,5 < m_n \leq 2,5$            | 13               | 18 | 26 | 37 | 52  | 73  | 103 | 146 | 207 |
|                                 | $2,5 < m_n \leq 4,0$            | 16               | 22 | 31 | 44 | 63  | 89  | 126 | 178 | 251 |
|                                 | $4,0 < m_n \leq 6,0$            | 20               | 28 | 39 | 56 | 79  | 111 | 157 | 222 | 314 |
|                                 | $6,0 < m_n \leq 10$             | 26               | 37 | 52 | 74 | 104 | 147 | 209 | 295 | 417 |
| $50 < d \leq 125$               | $0,2 \leq m_n \leq 0,5$         | 12               | 16 | 23 | 33 | 46  | 66  | 93  | 131 | 185 |
|                                 | $0,5 < m_n \leq 0,8$            | 12               | 17 | 25 | 35 | 49  | 70  | 98  | 139 | 197 |
|                                 | $0,8 < m_n \leq 1,0$            | 13               | 18 | 26 | 36 | 52  | 73  | 103 | 146 | 206 |
|                                 | $1,0 < m_n \leq 1,5$            | 14               | 19 | 27 | 39 | 55  | 77  | 109 | 154 | 218 |
|                                 | $1,5 < m_n \leq 2,5$            | 15               | 22 | 31 | 43 | 61  | 86  | 122 | 173 | 244 |
|                                 | $2,5 < m_n \leq 4,0$            | 18               | 25 | 36 | 51 | 72  | 102 | 144 | 204 | 288 |
|                                 | $4,0 < m_n \leq 6,0$            | 22               | 31 | 44 | 62 | 88  | 124 | 176 | 248 | 351 |
|                                 | $6,0 < m_n \leq 10$             | 28               | 40 | 57 | 80 | 114 | 161 | 227 | 321 | 454 |
| $125 < d \leq 280$              | $0,2 \leq m_n \leq 0,5$         | 15               | 21 | 30 | 42 | 60  | 85  | 120 | 170 | 240 |
|                                 | $0,5 < m_n \leq 0,8$            | 16               | 22 | 31 | 44 | 63  | 89  | 126 | 178 | 252 |
|                                 | $0,8 < m_n \leq 1,0$            | 16               | 23 | 33 | 46 | 65  | 92  | 131 | 185 | 261 |
|                                 | $1,0 < m_n \leq 1,5$            | 17               | 24 | 34 | 48 | 68  | 97  | 137 | 193 | 273 |
|                                 | $1,5 < m_n \leq 2,5$            | 19               | 26 | 37 | 53 | 75  | 106 | 149 | 211 | 299 |
|                                 | $2,5 < m_n \leq 4,0$            | 21               | 30 | 43 | 61 | 86  | 121 | 172 | 243 | 343 |
|                                 | $4,0 < m_n \leq 6,0$            | 25               | 36 | 51 | 72 | 102 | 144 | 203 | 287 | 406 |
|                                 | $6,0 < m_n \leq 10$             | 32               | 45 | 64 | 90 | 127 | 180 | 255 | 360 | 509 |

**Таблица 1. Допуск на полное радиальное составное отклонение (на полное колебание измерительного межосевого расстояния за оборот зубчатого колеса)  $F_i''$  (продолжение)**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Нормальный модуль<br>$m_n$ , мм | Степень точности |    |    |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------|---------------------------------|------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                 |                                 | 4                | 5  | 6  | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|                                 |                                 | $F_i''$ , мкм    |    |    |     |     |     |     |     |     |
| 280 < $d$ ≤ 560                 | 0,2 < $m_n$ ≤ 0,5               | 19               | 28 | 39 | 55  | 78  | 110 | 156 | 220 | 311 |
|                                 | 0,5 < $m_n$ ≤ 0,8               | 20               | 29 | 40 | 57  | 81  | 114 | 161 | 228 | 323 |
|                                 | 0,8 < $m_n$ ≤ 1,0               | 21               | 29 | 42 | 59  | 83  | 117 | 166 | 235 | 332 |
|                                 | 1,0 < $m_n$ ≤ 1,5               | 22               | 30 | 43 | 61  | 86  | 122 | 172 | 243 | 344 |
|                                 | 1,5 < $m_n$ ≤ 2,5               | 23               | 33 | 46 | 65  | 92  | 131 | 185 | 262 | 370 |
|                                 | 2,5 < $m_n$ ≤ 4,0               | 26               | 37 | 52 | 73  | 104 | 146 | 207 | 293 | 414 |
|                                 | 4,0 < $m_n$ ≤ 6,0               | 30               | 42 | 60 | 84  | 119 | 169 | 239 | 337 | 477 |
|                                 | 6,0 < $m_n$ ≤ 10                | 36               | 51 | 73 | 103 | 145 | 205 | 290 | 410 | 580 |
| 560 < $d$ ≤ 1000                | 0,2 < $m_n$ ≤ 0,5               | 25               | 35 | 50 | 70  | 99  | 140 | 198 | 280 | 396 |
|                                 | 0,5 < $m_n$ ≤ 0,8               | 25               | 36 | 51 | 72  | 102 | 144 | 204 | 288 | 408 |
|                                 | 0,8 < $m_n$ ≤ 1,0               | 26               | 37 | 52 | 74  | 104 | 148 | 209 | 295 | 417 |
|                                 | 1,0 < $m_n$ ≤ 1,5               | 27               | 38 | 54 | 76  | 107 | 152 | 215 | 304 | 429 |
|                                 | 1,5 < $m_n$ ≤ 2,5               | 28               | 40 | 57 | 80  | 114 | 161 | 228 | 322 | 455 |
|                                 | 2,5 < $m_n$ ≤ 4,0               | 31               | 44 | 62 | 88  | 125 | 177 | 250 | 353 | 499 |
|                                 | 4,0 < $m_n$ ≤ 6,0               | 35               | 50 | 70 | 99  | 141 | 199 | 281 | 398 | 562 |
|                                 | 6,0 < $m_n$ ≤ 10                | 42               | 59 | 83 | 118 | 166 | 235 | 333 | 471 | 665 |

**Таблица 2. Допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе,  $f_i''$**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Нормальный модуль<br>$m_n$ , мм | Степень точности |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------|---------------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                 |                                 | 4                | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|                                 |                                 | $f_i''$ , МКМ    |     |     |     |     |     |     |     |     |
| $5 \leq d \leq 20$              | $0,2 \leq m_n \leq 0,5$         | 1,0              | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  |
|                                 | $0,5 < m_n \leq 0,8$            | 2,0              | 2,5 | 4,0 | 5,5 | 7,5 | 11  | 15  | 22  | 31  |
|                                 | $0,8 < m_n \leq 1,0$            | 2,5              | 3,5 | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  | 28  | 39  |
|                                 | $1,0 < m_n \leq 1,5$            | 3,0              | 4,5 | 6,5 | 9,0 | 13  | 18  | 25  | 36  | 50  |
|                                 | $1,5 < m_n \leq 2,5$            | 4,5              | 6,5 | 9,5 | 13  | 19  | 26  | 37  | 53  | 74  |
|                                 | $2,5 < m_n \leq 4,0$            | 7,0              | 10  | 14  | 20  | 29  | 41  | 58  | 82  | 115 |
| $20 < d \leq 50$                | $0,2 \leq m_n \leq 0,5$         | 1,5              | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  |
|                                 | $0,5 < m_n \leq 0,8$            | 2,0              | 2,5 | 4,0 | 5,5 | 7,5 | 11  | 15  | 22  | 31  |
|                                 | $0,8 < m_n \leq 1,0$            | 2,5              | 3,5 | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  | 28  | 40  |
|                                 | $1,0 < m_n \leq 1,5$            | 3,0              | 4,5 | 6,5 | 9,0 | 13  | 18  | 25  | 36  | 51  |
|                                 | $1,5 < m_n \leq 2,5$            | 4,5              | 6,5 | 9,5 | 13  | 19  | 26  | 37  | 53  | 75  |
|                                 | $2,5 < m_n \leq 4,0$            | 7,0              | 10  | 14  | 20  | 29  | 41  | 58  | 82  | 116 |
|                                 | $4,0 < m_n \leq 6,0$            | 11               | 15  | 22  | 31  | 43  | 61  | 87  | 123 | 174 |
|                                 | $6,0 < m_n \leq 10$             | 17               | 24  | 34  | 48  | 67  | 95  | 135 | 190 | 269 |
| $50 < d \leq 125$               | $0,2 \leq m_n \leq 0,5$         | 1,5              | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 5,0 | 7,5 | 10  | 15  | 21  |
|                                 | $0,5 < m_n \leq 0,8$            | 2,0              | 3,0 | 4,0 | 5,5 | 8,0 | 11  | 16  | 22  | 31  |
|                                 | $0,8 < m_n \leq 1,0$            | 2,5              | 3,5 | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  | 28  | 40  |
|                                 | $1,0 < m_n \leq 1,5$            | 3,0              | 4,5 | 6,5 | 9,0 | 13  | 18  | 26  | 36  | 51  |
|                                 | $1,5 < m_n \leq 2,5$            | 4,5              | 6,5 | 9,5 | 13  | 19  | 26  | 37  | 53  | 75  |
|                                 | $2,5 < m_n \leq 4,0$            | 7,0              | 10  | 14  | 20  | 29  | 41  | 58  | 82  | 116 |
|                                 | $4,0 < m_n \leq 6,0$            | 11               | 15  | 22  | 31  | 44  | 62  | 87  | 123 | 174 |
|                                 | $6,0 < m_n \leq 10$             | 17               | 24  | 34  | 48  | 67  | 95  | 135 | 191 | 269 |
| $125 < d \leq 280$              | $0,2 \leq m_n \leq 0,5$         | 1,5              | 2,0 | 2,5 | 3,5 | 5,5 | 7,5 | 11  | 15  | 21  |
|                                 | $0,5 < m_n \leq 0,8$            | 2,0              | 3,0 | 4,0 | 5,5 | 8,0 | 11  | 16  | 22  | 32  |
|                                 | $0,8 < m_n \leq 1,0$            | 2,5              | 3,5 | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  | 29  | 41  |
|                                 | $1,0 < m_n \leq 1,5$            | 3,0              | 4,5 | 6,5 | 9,0 | 13  | 18  | 26  | 36  | 52  |
|                                 | $1,5 < m_n \leq 2,5$            | 4,5              | 6,5 | 9,5 | 13  | 19  | 27  | 38  | 53  | 75  |
|                                 | $2,5 < m_n \leq 4,0$            | 7,5              | 10  | 15  | 21  | 29  | 41  | 58  | 82  | 116 |
|                                 | $4,0 < m_n \leq 6,0$            | 11               | 15  | 22  | 31  | 44  | 62  | 87  | 124 | 175 |
|                                 | $6,0 < m_n \leq 10$             | 17               | 24  | 34  | 48  | 67  | 95  | 135 | 191 | 270 |

**Таблица 2. Допуск на колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе  $f_i''$  (продолжение)**

| Делительный диаметр<br>$d$ , мм | Нормальный модуль<br>$m_n$ , мм | Степень точности |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------|---------------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                 |                                 | 4                | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|                                 |                                 | $f_i''$ , МКМ    |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 280 < $d$ ≤ 560                 | 0,2 ≤ $m_n$ ≤ 0,5               | 1,5              | 2,0 | 2,5 | 4,0 | 5,5 | 7,5 | 11  | 15  | 22  |
|                                 | 0,5 < $m_n$ ≤ 0,8               | 2,0              | 3,0 | 4,0 | 5,5 | 8,0 | 11  | 16  | 23  | 32  |
|                                 | 0,8 < $m_n$ ≤ 1,0               | 2,5              | 3,5 | 5,0 | 7,5 | 10  | 15  | 21  | 29  | 41  |
|                                 | 1,0 < $m_n$ ≤ 1,5               | 3,5              | 4,5 | 6,5 | 9,0 | 13  | 18  | 26  | 37  | 52  |
|                                 | 1,5 < $m_n$ ≤ 2,5               | 5,0              | 6,5 | 9,5 | 13  | 19  | 27  | 38  | 54  | 76  |
|                                 | 2,5 < $m_n$ ≤ 4,0               | 7,5              | 10  | 15  | 21  | 29  | 41  | 59  | 83  | 117 |
|                                 | 4,0 < $m_n$ ≤ 6,0               | 11               | 15  | 22  | 31  | 44  | 62  | 88  | 124 | 175 |
|                                 | 6,0 < $m_n$ ≤ 10                | 17               | 24  | 34  | 48  | 68  | 96  | 135 | 191 | 271 |
| 560 < $d$ ≤ 1000                | 0,2 ≤ $m_n$ ≤ 0,5               | 1,5              | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,5 | 8,0 | 11  | 16  | 23  |
|                                 | 0,5 < $m_n$ ≤ 0,8               | 2,0              | 3,0 | 4,0 | 6,0 | 8,5 | 12  | 17  | 24  | 33  |
|                                 | 0,8 < $m_n$ ≤ 1,0               | 2,5              | 3,5 | 5,5 | 7,5 | 11  | 15  | 21  | 30  | 42  |
|                                 | 1,0 < $m_n$ ≤ 1,5               | 3,5              | 4,5 | 6,5 | 9,5 | 13  | 19  | 27  | 38  | 53  |
|                                 | 1,5 < $m_n$ ≤ 2,5               | 5,0              | 7,0 | 9,5 | 14  | 19  | 27  | 38  | 54  | 77  |
|                                 | 2,5 < $m_n$ ≤ 4,0               | 7,5              | 10  | 15  | 21  | 30  | 42  | 59  | 83  | 118 |
|                                 | 4,0 < $m_n$ ≤ 6,0               | 11               | 16  | 22  | 31  | 44  | 62  | 88  | 125 | 176 |
|                                 | 6,0 < $m_n$ ≤ 10                | 17               | 24  | 34  | 48  | 68  | 96  | 136 | 192 | 272 |

**Таблица 3. Допуск на радиальное биение  $F_r$**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Нормальный модуль $m_n$ , мм | Степень точности |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|------------------------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                              |                              | 0                | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|                              |                              | $F_r$ , мкм      |     |     |     |     |     |    |     |     |     |     |     |     |
| $5 < d \leq 20$              | $0,5 \leq m_n \leq 2,0$      | 1,5              | 2,5 | 3,0 | 4,5 | 6,5 | 9,0 | 13 | 18  | 25  | 36  | 51  | 72  | 102 |
|                              | $2,0 < m_n \leq 3,5$         | 1,5              | 2,5 | 3,5 | 4,5 | 6,5 | 9,5 | 13 | 19  | 27  | 38  | 53  | 75  | 106 |
| $20 < d \leq 50$             | $0,5 \leq m_n \leq 2,0$      | 2,0              | 3,0 | 4,0 | 5,5 | 8,0 | 11  | 16 | 23  | 32  | 46  | 65  | 92  | 130 |
|                              | $2,0 < m_n \leq 3,5$         | 2,0              | 3,0 | 4,0 | 6,0 | 8,5 | 12  | 17 | 24  | 34  | 47  | 67  | 95  | 134 |
|                              | $3,5 < m_n \leq 6,0$         | 2,0              | 3,0 | 4,5 | 6,0 | 8,5 | 12  | 17 | 25  | 35  | 49  | 70  | 99  | 139 |
|                              | $6,0 < m_n \leq 10$          | 2,5              | 3,5 | 4,5 | 6,5 | 9,5 | 13  | 19 | 26  | 37  | 52  | 74  | 105 | 148 |
| $50 < d \leq 125$            | $0,5 \leq m_n \leq 2,0$      | 2,5              | 3,5 | 5,0 | 7,5 | 10  | 15  | 21 | 29  | 42  | 59  | 83  | 118 | 167 |
|                              | $2,0 < m_n \leq 3,5$         | 2,5              | 4,0 | 5,5 | 7,5 | 11  | 15  | 21 | 30  | 43  | 61  | 86  | 121 | 171 |
|                              | $3,5 < m_n \leq 6,0$         | 3,0              | 4,0 | 5,5 | 8,0 | 11  | 16  | 22 | 31  | 44  | 62  | 88  | 125 | 176 |
|                              | $6,0 < m_n \leq 10$          | 3,0              | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 12  | 16  | 23 | 33  | 46  | 65  | 92  | 131 | 185 |
|                              | $10 < m_n \leq 16$           | 3,0              | 4,5 | 6,0 | 9,0 | 12  | 18  | 25 | 35  | 50  | 70  | 99  | 140 | 198 |
|                              | $16 < m_n \leq 25$           | 3,5              | 5,0 | 7,0 | 9,5 | 14  | 19  | 27 | 39  | 55  | 77  | 109 | 154 | 218 |
| $125 < d \leq 280$           | $0,5 \leq m_n \leq 2,0$      | 3,5              | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  | 28 | 39  | 55  | 78  | 110 | 156 | 221 |
|                              | $2,0 < m_n \leq 3,5$         | 3,5              | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  | 28 | 40  | 56  | 80  | 113 | 159 | 225 |
|                              | $3,5 < m_n \leq 6,0$         | 3,5              | 5,0 | 7,0 | 10  | 14  | 20  | 29 | 41  | 58  | 82  | 115 | 163 | 231 |
|                              | $6,0 < m_n \leq 10$          | 3,5              | 5,5 | 7,5 | 11  | 15  | 21  | 30 | 42  | 60  | 85  | 120 | 169 | 239 |
|                              | $10 < m_n \leq 16$           | 4,0              | 5,5 | 8,0 | 11  | 16  | 22  | 32 | 45  | 63  | 89  | 126 | 179 | 252 |
|                              | $16 < m_n \leq 25$           | 4,5              | 6,0 | 8,5 | 12  | 17  | 24  | 34 | 48  | 68  | 96  | 136 | 193 | 272 |
|                              | $25 < m_n \leq 40$           | 4,5              | 6,5 | 9,5 | 13  | 19  | 27  | 38 | 54  | 76  | 107 | 152 | 215 | 304 |
| $280 < d \leq 560$           | $0,5 \leq m_n \leq 2,0$      | 4,5              | 6,5 | 9,0 | 13  | 18  | 26  | 36 | 51  | 73  | 103 | 146 | 206 | 291 |
|                              | $2,0 < m_n \leq 3,5$         | 4,5              | 6,5 | 9,0 | 13  | 18  | 26  | 37 | 52  | 74  | 105 | 148 | 209 | 296 |
|                              | $3,5 < m_n \leq 6,0$         | 4,5              | 6,5 | 9,5 | 13  | 19  | 27  | 38 | 53  | 75  | 106 | 150 | 213 | 301 |
|                              | $6,0 < m_n \leq 10$          | 5,0              | 7,0 | 9,5 | 14  | 19  | 27  | 39 | 55  | 77  | 109 | 155 | 219 | 310 |
|                              | $10 < m_n \leq 16$           | 5,0              | 7,0 | 10  | 14  | 20  | 29  | 40 | 57  | 81  | 114 | 161 | 228 | 323 |
|                              | $16 < m_n \leq 25$           | 5,5              | 7,5 | 11  | 15  | 21  | 30  | 43 | 61  | 86  | 121 | 171 | 242 | 343 |
|                              | $25 < m_n \leq 40$           | 6,0              | 8,5 | 12  | 17  | 23  | 33  | 47 | 66  | 94  | 132 | 187 | 265 | 374 |
|                              | $40 < m_n \leq 70$           | 7,0              | 9,5 | 14  | 19  | 27  | 38  | 54 | 76  | 108 | 153 | 216 | 306 | 432 |
| $560 < d \leq 1000$          | $0,5 \leq m_n \leq 2,0$      | 6,0              | 8,5 | 12  | 17  | 23  | 33  | 47 | 66  | 94  | 133 | 188 | 266 | 376 |
|                              | $2,0 < m_n \leq 3,5$         | 6,0              | 8,5 | 12  | 17  | 24  | 34  | 48 | 67  | 95  | 134 | 190 | 269 | 380 |
|                              | $3,5 < m_n \leq 6,0$         | 6,0              | 8,5 | 12  | 17  | 24  | 34  | 48 | 68  | 96  | 136 | 193 | 272 | 385 |
|                              | $6,0 < m_n \leq 10$          | 6,0              | 8,5 | 12  | 17  | 25  | 35  | 49 | 70  | 98  | 139 | 197 | 279 | 394 |
|                              | $10 < m_n \leq 16$           | 6,5              | 9,0 | 13  | 18  | 25  | 36  | 51 | 72  | 102 | 144 | 204 | 288 | 407 |
|                              | $16 < m_n \leq 25$           | 6,5              | 9,5 | 13  | 19  | 27  | 38  | 53 | 76  | 107 | 151 | 214 | 302 | 427 |
|                              | $25 < m_n \leq 40$           | 7,0              | 10  | 14  | 20  | 29  | 41  | 57 | 81  | 115 | 162 | 229 | 324 | 459 |
|                              | $40 < m_n \leq 70$           | 8,0              | 11  | 16  | 23  | 32  | 46  | 65 | 91  | 129 | 183 | 258 | 365 | 517 |
| $1000 < d \leq 1600$         | $2,0 \leq m_n \leq 3,5$      | 7,5              | 10  | 15  | 21  | 30  | 42  | 59 | 84  | 118 | 167 | 236 | 334 | 473 |
|                              | $3,5 < m_n \leq 6,0$         | 7,5              | 11  | 15  | 21  | 30  | 42  | 60 | 85  | 120 | 169 | 239 | 338 | 478 |
|                              | $6,0 < m_n \leq 10$          | 7,5              | 11  | 15  | 22  | 30  | 43  | 61 | 86  | 122 | 172 | 243 | 344 | 487 |
|                              | $10 < m_n \leq 16$           | 8,0              | 11  | 16  | 22  | 31  | 44  | 63 | 88  | 125 | 177 | 250 | 354 | 500 |
|                              | $16 < m_n \leq 25$           | 8,0              | 11  | 16  | 23  | 33  | 46  | 65 | 92  | 130 | 184 | 260 | 368 | 520 |
|                              | $25 < m_n \leq 40$           | 8,5              | 12  | 17  | 24  | 34  | 49  | 69 | 98  | 138 | 195 | 276 | 390 | 552 |
|                              | $40 < m_n \leq 70$           | 9,5              | 13  | 19  | 27  | 38  | 54  | 76 | 108 | 152 | 215 | 305 | 431 | 609 |

**Таблица 3. Допуск на радиальное биение  $F_r$  (продолжение)**

| Делительный диаметр $d$ , мм | Нормальный модуль $m_n$ , мм | Степень точности |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |     |      |
|------------------------------|------------------------------|------------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                              |                              | 0                | 1  | 2  | 3  | 4  | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12   |
|                              |                              | $F_r$ , мкм      |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 1600 < $d$ ≤ 2500            | 3,5 ≤ $m_n$ ≤ 6,0            | 9,0              | 13 | 18 | 26 | 36 | 51  | 73  | 103 | 145 | 206 | 291 | 411 | 582  |
|                              | 6,0 < $m_n$ ≤ 10             | 9,0              | 13 | 18 | 26 | 37 | 52  | 74  | 104 | 148 | 209 | 295 | 417 | 590  |
|                              | 10 < $m_n$ ≤ 16              | 9,5              | 13 | 19 | 27 | 38 | 53  | 75  | 107 | 151 | 213 | 302 | 427 | 604  |
|                              | 16 < $m_n$ ≤ 25              | 9,5              | 14 | 19 | 28 | 39 | 55  | 78  | 110 | 156 | 220 | 312 | 441 | 624  |
|                              | 25 < $m_n$ ≤ 40              | 10               | 14 | 20 | 29 | 41 | 58  | 82  | 116 | 164 | 232 | 328 | 463 | 655  |
|                              | 40 < $m_n$ ≤ 70              | 11               | 16 | 22 | 32 | 45 | 63  | 89  | 126 | 178 | 252 | 357 | 504 | 713  |
| 2500 < $d$ ≤ 4000            | 6,0 ≤ $m_n$ ≤ 10             | 11               | 16 | 23 | 32 | 45 | 64  | 90  | 127 | 180 | 255 | 360 | 510 | 721  |
|                              | 10 < $m_n$ ≤ 16              | 11               | 16 | 23 | 32 | 46 | 65  | 92  | 130 | 183 | 259 | 367 | 519 | 734  |
|                              | 16 < $m_n$ ≤ 25              | 12               | 17 | 24 | 33 | 47 | 67  | 94  | 133 | 188 | 267 | 377 | 533 | 754  |
|                              | 25 < $m_n$ ≤ 40              | 12               | 17 | 25 | 35 | 49 | 69  | 98  | 139 | 196 | 278 | 393 | 555 | 785  |
|                              | 40 < $m_n$ ≤ 70              | 13               | 19 | 26 | 37 | 53 | 75  | 105 | 149 | 211 | 298 | 422 | 596 | 843  |
| 4000 < $d$ ≤ 6000            | 6,0 ≤ $m_n$ ≤ 10             | 14               | 19 | 27 | 39 | 55 | 77  | 110 | 155 | 219 | 310 | 438 | 620 | 876  |
|                              | 10 < $m_n$ ≤ 16              | 14               | 20 | 28 | 39 | 56 | 79  | 111 | 157 | 222 | 315 | 445 | 629 | 890  |
|                              | 16 < $m_n$ ≤ 25              | 14               | 20 | 28 | 40 | 57 | 80  | 114 | 161 | 227 | 322 | 455 | 643 | 910  |
|                              | 25 < $m_n$ ≤ 40              | 15               | 21 | 29 | 42 | 59 | 83  | 118 | 166 | 235 | 333 | 471 | 665 | 941  |
|                              | 40 < $m_n$ ≤ 70              | 16               | 22 | 31 | 44 | 62 | 88  | 125 | 177 | 250 | 353 | 499 | 706 | 999  |
| 6000 < $d$ ≤ 8000            | 6,0 ≤ $m_n$ ≤ 10             | 16               | 23 | 32 | 45 | 64 | 91  | 128 | 181 | 257 | 363 | 513 | 726 | 1026 |
|                              | 10 < $m_n$ ≤ 16              | 16               | 23 | 32 | 46 | 65 | 92  | 130 | 184 | 260 | 367 | 520 | 735 | 1039 |
|                              | 16 < $m_n$ ≤ 25              | 17               | 23 | 33 | 47 | 66 | 94  | 132 | 187 | 265 | 375 | 530 | 749 | 1059 |
|                              | 25 < $m_n$ ≤ 40              | 17               | 24 | 34 | 48 | 68 | 96  | 136 | 193 | 273 | 386 | 545 | 771 | 1091 |
|                              | 40 < $m_n$ ≤ 70              | 18               | 25 | 36 | 51 | 72 | 102 | 144 | 203 | 287 | 406 | 574 | 812 | 1149 |
| 8000 < $d$ ≤ 10000           | 6,0 ≤ $m_n$ ≤ 10             | 18               | 26 | 36 | 51 | 72 | 102 | 144 | 204 | 289 | 408 | 577 | 816 | 1154 |
|                              | 10 < $m_n$ ≤ 16              | 18               | 26 | 36 | 52 | 73 | 103 | 146 | 206 | 292 | 413 | 584 | 826 | 1168 |
|                              | 16 < $m_n$ ≤ 25              | 19               | 26 | 37 | 52 | 74 | 105 | 148 | 210 | 297 | 420 | 594 | 840 | 1188 |
|                              | 25 < $m_n$ ≤ 40              | 19               | 27 | 38 | 54 | 76 | 108 | 152 | 216 | 305 | 431 | 610 | 862 | 1219 |
|                              | 40 < $m_n$ ≤ 70              | 20               | 28 | 40 | 56 | 80 | 113 | 160 | 226 | 319 | 451 | 639 | 903 | 1277 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Материалы стандарта ISO/TR 10064-2

**Таблица 1. Рекомендуемые величины минимального нормального бокового зазора  $j_{bnmin}$  для крупномодульных зубчатых колес**

| Модуль<br>нормальный<br>$m_n$ , мм | Минимальное межосевое расстояние, |     |     |     |     |      |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
|                                    | $a_i$ , мм                        |     |     |     |     |      |
|                                    | 50                                | 100 | 200 | 400 | 800 | 1600 |
|                                    | МКМ                               |     |     |     |     |      |
| 1,5                                | 90                                | 110 | –   | –   | –   | –    |
| 2                                  | 100                               | 120 | 150 | –   | –   | –    |
| 3                                  | 120                               | 140 | 170 | 240 | –   | –    |
| 5                                  | –                                 | 180 | 210 | 280 | –   | –    |
| 8                                  | –                                 | 240 | 270 | 340 | 470 | –    |
| 12                                 | –                                 | –   | 350 | 420 | 550 | –    |
| 18                                 | –                                 | –   | –   | 540 | 670 | 940  |

Величины из таблицы можно рассчитать, пользуясь уравнением:

$$j_{bnmin} = \left(\frac{2}{3}\right) [0,06 + 0,0005 a_i + 0,03 m_n],$$

где  $a_i$  – межосевое расстояние;  $m_n$  – модуль зубьев нормальный.

В приложении приведены только те материалы стандартов ISO, которые необходимы для понимания отдельных глав данного издания. Отметим, что эти материалы переведены и публикуются на русском языке впервые.

# СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....   | 3  |
| 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СТАНДАРТА ГОСТ 1643-81 .....   | 7  |
| 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ МНОГОЗВЕННЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ<br>МЕХАНИЗМОВ .....  | 13 |
| 2.1 Основные положения стандарта ГОСТ 21098–82 .....   | 13 |
| 2.2 Основные требования к созданию стандарта параметров точности передач и<br>многозвенных зубчатых механизмов .....   | 19 |
| 3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ ISO 1328 .....  | 20 |
| 4. КРИТИКА ПОЛОЖЕНИЙ СТАНДАРТОВ ГОСТ 1643-81 И ГОСТ 21098-82 .....   | 26 |
| 5. ПРОБЛЕМЫ ВВЕДЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ISO В ПРАКТИКУ ОТЕЧЕСТВЕННОГО<br>РЕДУКТОРОСТРОЕНИЯ .....   | 31 |
| 6. ВЛИЯНИЕ НОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС И<br>ПЕРЕДАЧ НА ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО<br>ПРОИЗВОДСТВА ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАТОЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ .....   | 35 |
| 6.1 Сравнительный анализ требований к параметрам точности зубчатых колёс и передач<br>в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 по нормам кинематической точности .....                 | 36 |
| 6.2 Сравнительный анализ требований к параметрам точности зубчатых колёс и передач<br>в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 по нормам плавности .....                               | 39 |
| 6.3 Сравнительный анализ требований к параметрам точности зубчатых колёс и передач<br>в стандартах ISO 1328 и ГОСТ 1643-81 по нормам контакта .....                                | 44 |
| 6.4 Сравнительный анализ требований к параметрам точности зубчатых колёс и передач<br>в стандартах ISO 1328, ISO/TR 10064–2:1996 и ГОСТ 1643-81 по нормам бокового<br>зазора ..... | 47 |
| 7. КОМБИНИРОВАНИЕ НОРМ ТОЧНОСТИ .....  | 55 |
| ЛИТЕРАТУРА .....   | 62 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....   | 67 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....   | 83 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....   | 89 |



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»



## Кафедра МЕХАТРОНИКИ

Кафедра Мехатроники, одна из старейших кафедр СПбГУ ИТМО, история которой начинается с 30-х годов XX века. Первое упоминание о прародительнице кафедры Мехатроники содержится в приказе № 18 от 3.10.1930 по Учебному комбинату точной механики и оптики: "доцент Замыцкий Н.П. назначен с 1.10.1930 заведующим кафедрой Детали машин института точной механики и оптики". Важным этапом было существование в 30-х годах кафедры «Соппротивление материалов и детали машин», поскольку речь шла уже не только о выборе схемы устройства (машины, прибора), но и об определении размеров и формы деталей при прочностном расчете. Руководил кафедрой в то время виднейший ученый в области строительной механики Яги Ю.И.

С 1945 г. руководство кафедрой осуществляет Н.И. Колчин, крупнейший учёный механик в самом широком смысле этого слова. Он расширил и обогатил исследовательскую и преподавательскую деятельность кафедры методами Теории машин и механизмов. Нельзя не сказать, что Н.И. Колчин был в той или иной мере учителем трех последующих заведующих кафедрой – Ф.Л. Литвина, К.И. Гуляева, Б.П. Тимофеева.

С 1951 года, заведующим кафедрой Теории механизмов и деталей машин, становится Рифтин Л.П. Именно в этот момент учебная и научная деятельность кафедры приобрела черты синтетической научной дисциплины, где выбор схем машины, прибора, устройства сопровождался учетом не только геометро-кинематических, но и динамических, прочностных характеристик.

1964 год: "Ректорат и Совет ЛИТМО поручили профессору Литвину Ф.Л. провести реорганизацию кафедры Теории механизмов и деталей машин в кафедру приборостроительного типа, закладывающую основы конструкторской подготовки специалистов, выпускаемых ЛИТМО". Во время заведования кафедрой Литвиным Ф.Л. была создана лабораторная база с оригинальными лабораторными установками, написаны многочисленные методические пособия, разработаны и изготовлены учебные стенды, макеты устройств и прозрачные модели, отвечающие современным требованиям учебного процесса в высшей школе.

В начале 1979 года заведующим кафедрой становится профессор Гуляев К.И. По своей направленности кафедра становится общеинженерной.

В 1989 году Тимофеев Б.П. приступил к заведыванию общеинженерной кафедрой Теории механизмов и деталей приборов, преобразовав её в 1991 году в выпускающую кафедру Мехатроники. Только в 1994 году специальность «Мехатроника» появилась в официальном списке специальностей.

С 2005 года кафедру возглавляет доцент Ноздрин М.А. В учебную и научную деятельность внедряются компьютерные технологии, разрабатываются инновационные образовательные программы, создаются новые лабораторные циклы и лаборатории. В 2009 году утверждена научная школа «Фундаментальные проблемы надежности и точности машин и приборов».

В 2011 году исполняющим обязанности заведующего становится Монахов Ю.С., в прошлом выпускник кафедры Мехатроники.

Борис Павлович Тимофеев  
Михаил Владимирович Абрамчук  
Денис Сергеевич Смирнов

**Использование международных стандартов (ИСО) для  
повышения точности отечественных передаточных  
механизмов**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Компьютерный набор и вёрстка

Дизайн обложки

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО

Зав. РИО

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 50 экз.

Отпечатано на ризографе

Б.П. Тимофеев  
М.В. Абрамчук  
Д.С. Смирнов  
М.В. Абрамчук  
Д.С. Смирнов  
М.В. Абрамчук  
А.Ю. Дайнеко

Н.Ф. Гусарова



**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского национального  
исследовательского университета  
информационных технологий, механики  
и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

