

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина

ИЗМЕРЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Учебное пособие
к лабораторным работам

Ульяновск УлГТУ
2018

УДК 621.833 (075.8)

ББК 34.5я7

П 68

Рецензенты:

Кафедра «Технологии профессионального обучения» Ульяновского государственного педагогического университета им. И.Н. Ульянова;
доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационная техника»
ФГБОУ ВПО «Ульяновский институт авиации имени Главного маршала авиации
Б.П. Бугаева» И.В. Антонец

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

Правиков, Юрий Михайлович

П 68

Измерение цилиндрических зубчатых колес : учебное пособие к лабораторным работам / Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина. – Ульяновск : УлГТУ, 2018. – 143 с.

ISBN 978-5-9795-1834-3

Приведены теоретические положения, лабораторный практикум и некоторые справочные данные по измерению показателей точности цилиндрических зубчатых колес и передач. Учебное пособие предназначено для выполнения лабораторных работ по дисциплинам «Нормирование точности и технические измерения» и «Метрология, стандартизация и сертификация».

Содержание учебного пособия соответствует требованиям федерального государственного образовательного стандарта и рабочим программам названных дисциплин для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Пособие подготовлено также с учетом требований образовательного модуля «Подготовка высококвалифицированных бакалавров в области разработки технологических процессов машиностроительных производств и средств их технологического обеспечения» для предприятий оборонно-промышленного комплекса.

Пособие может быть использовано при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Метрология, стандартизация и сертификация», «Технические измерения», «Метрологическое обеспечение автомобилестроения», предусмотренных учебными планами направления 15.03.01 и специальности 23.05.01.

УДК 621.833 (075.8)

ББК 34.5я7

© Правиков Ю. М., Муслина Г. Р., 2018

© Оформление. УлГТУ, 2018

ISBN 978-5-9795-1834-3

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И АББРЕВИАТУРЫ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	6
1. НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ	8
1.1. Система точности цилиндрических зубчатых колес и передач	8
1.2. Комплексы контролируемых показателей точности зубча- тых колес и передач	13
2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ	19
2.1. Измерение показателей точности зубчатых колес и передач	19
2.2. Координатные методы измерения показателей точности зубчатых колес	42
2.3. Система контроля при производстве зубчатых колес и передач	48
3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	51
3.1. Лабораторная работа № 1. Измерение показателей точно- сти зубчатых колес на универсальном приборе ЗИП-1	51
3.2. Лабораторная работа № 2. Измерение показателей точно- сти зубчатых колес на универсальном приборе УЗП-400 ...	70
3.3. Лабораторная работа № 3. Измерение колебания измери- тельного межосевого расстояния зубчатых колес на межосемере МЦ-160М2	87

3.4. Лабораторная работа № 4. Определение бокового зазора зубчатой передачи косвенным методом	97
3.5. Лабораторная работа № 5. Измерение отклонения профи- ля зуба на индивидуально-дисковом эвольвентомере	102
3.6. Лабораторная работа № 6. Измерение показателей боко- вого зазора зубчатых колес накладными инструментами . .	112
3.7. Лабораторная работа № 7. Измерение показателей боко- вого зазора зубчатых колес методом двух роликов	130
ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ	136
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	137
ПРИЛОЖЕНИЯ	139

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И АББРЕВИАТУРЫ

ЗК и ЗП	– соответственно зубчатое колесо и передача;
КИМ	– координатно-измерительная машина;
СИ	– средство измерения;
A, B, C, D, E, H	– виды сопряжений ЗК в передаче;
a, b, c, d, h, x, y, z	– виды допуска на боковой зазор;
a''	– измерительное межосевое расстояние;
a_w	– номинальное значение межосевого расстояния;
b_w	– ширина зубчатого венца;
d	– диаметр делительной окружности ЗК;
$F_{\text{к.п.к.}}$	– кинематическая погрешность ЗК;
$F_{\text{к.п.п.}}$	– кинематическая погрешность ЗП;
$F'_{ir}, F'_{ior}, F_{pr}$ и др.	– показатели кинематической точности ЗК и ЗП (см. табл. 2);
$f'_{ir}, f'_{ior}, f_{zzr}$ и др.	– показатели плавности работы ЗК и ЗП (см. табл. 2);
$F_{\beta r}, F_{kr}, f_{xr}, f_{yr}$ и др.	– показатели норм контакта зубьев ЗК и ЗП (см. табл. 2);
$E_{Hs}, T_H, j_{n\min}$ и др.	– показатели бокового зазора ЗК и ЗП (см. табл. 2);
m	– модуль ЗК;
r	– радиус делительной окружности ЗК;
W	– номинальное значение длины общей нормали;
z	– число зубьев ЗК;
θ	– функция эвольвенты;
α	– угол профиля зуба ЗК;
ε_β	– коэффициент осевого перекрытия зубьев ЗК;
ξ	– коэффициент коррекции ЗК;
φ	– угол поворота ЗК.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Зубчатые передачи (ЗП) являются ответственными звеньями кинематических и силовых механизмов большого количества машин. От качества ЗП зависят эксплуатационные свойства этих машин: точность, долговечность, надежность и др. Изготовление, в том числе измерение и контроль зубчатых колес (ЗК) и ЗП, являются сложными техническими процессами, требующими применения современных зубообрабатывающих станков, методов и средств измерений и контроля ЗК и ЗП.

Учебное пособие содержит основные положения системы нормирования точности цилиндрических ЗК и ЗП, краткое описание методов и средств измерения показателей точности цилиндрических ЗК и ЗП и лабораторный практикум по соответствующей тематике.

В первом разделе пособия приведена информация о нормах точности цилиндрических ЗК и ЗП, степенях точности для норм кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев в передаче, о нормировании бокового зазора в ЗП. Приведены комплексы показателей точности цилиндрических ЗК и ЗП, обеспечивающие необходимые эксплуатационные характеристики этих ЗК и ЗП.

Во втором разделе пособия описаны используемые в настоящее время методы и средства измерения показателей точности цилиндрических ЗК и ЗП. Отмечено, что предпочтение необходимо отдавать измерению комплексных показателей, таких как кинематическая погрешность ЗК и ЗП, пятно контакта боковых поверхностей зубьев, боковой зазор в передаче.

Третий раздел содержит лабораторный практикум по соответствующему разделу дисциплины «Нормирование точности и технические измерения», включающий описание методов и средств измерений, порядок выполнения и контрольные вопросы к семи лабораторным работам, охватывающим измерения показателей точности всех норм точности цилиндрических ЗК и ЗП.

Настоящее учебное пособие предназначено для методического

обеспечения подготовки бакалавров по дисциплинам «Метрология, стандартизация и сертификация» и «Нормирование точности и технические измерения» в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 15.03.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных предприятий.

В результате освоения изложенного материала обучающийся должен приобрести знания и навыки, позволяющие ему в полной мере обладать следующими компетенциями:

ПК–4 – способность участвовать в разработке проектов изделий машиностроения, средств технологического оснащения, автоматизации и диагностики машиностроительных производств, технологических процессов их изготовления и модернизации с учетом технологических, эксплуатационных, эстетических, экономических, управленческих параметров и использованием современных информационных технологий и вычислительной техники, а также выбирать эти средства и проводить диагностику объектов машиностроительных производств с применением необходимых методов и средств анализа;

ПК–17 – способность участвовать в организации на машиностроительных производствах рабочих мест, их технического оснащения, размещения оборудования, средств автоматизации, управления, контроля и испытаний, эффективного контроля качества материалов, технологических процессов, готовой продукции;

ПК–18 – способность участвовать в разработке программ и методик контроля и испытания машиностроительных изделий, средств технологического оснащения, диагностики, автоматизации и управления, осуществлять метрологическую поверку средств измерения основных показателей качества выпускаемой продукции, в оценке ее брака и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению.

1. НОРМИРОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ

1.1. Система точности цилиндрических зубчатых колес и передач

Точность изготовления цилиндрических ЗК регламентирована ГОСТ 1643 «Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски». Стандартом установлено двенадцать степеней точности ЗК и ЗП, обозначаемых в порядке убывания точности цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 (рис. 1). Степени точности 1 и 2 для ЗК с $m > 1$ мм являются перспективными и численные значения допусков и отклонений для них пока не предусмотрены. Для каждой степени точности установлены:

- нормы кинематической точности;
- нормы плавности работы;
- нормы контакта зубьев.

Кинематическая точность определяет степень согласованности углов поворота ведущего и ведомого колес передачи. Нормам кинематической точности особое значение придают в ответственных механизмах, например, в делительных передачах управляющих и следящих систем.

Плавность работы ограничивает погрешности, многократно повторяющиеся за один оборот ЗК. Нормы плавности работы имеют наибольшее значение в скоростных передачах, когда передача должна работать бесшумно и без вибраций при больших окружных скоростях ЗК (до 60 м/с) и большой передаваемой мощности (до 40 МВт) [8].

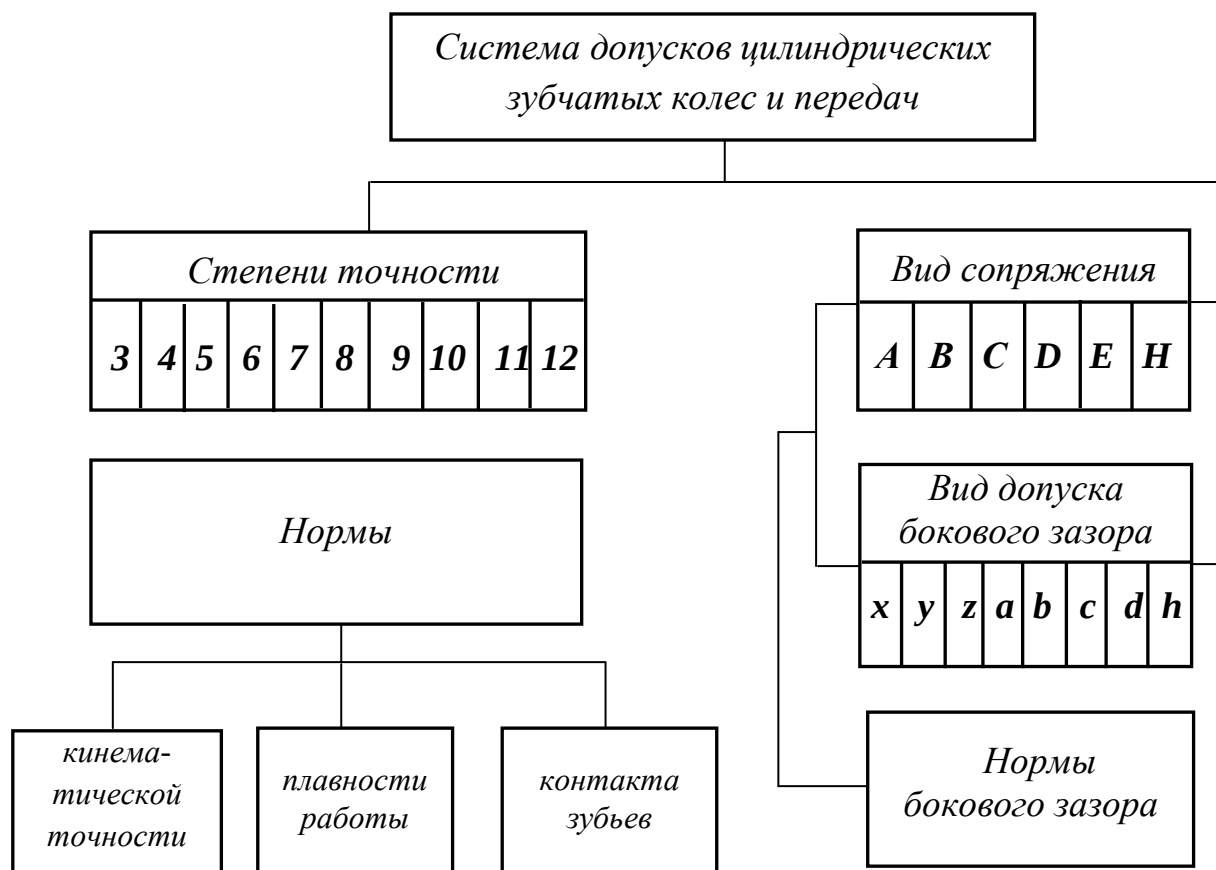


Рис. 1. Система допусков цилиндрических зубчатых колес

Контакт зубьев определяет величину и расположение области прилегания боковых поверхностей зубьев сопряженных колес в передаче, что очень важно для силовых тяжело нагруженных передач, работающих с невысокими скоростями без реверсирования. Примером могут служить ЗК грузоподъемных механизмов.

Нормы бокового зазора – это такие параметры колес и передач, которые влияют на зазор по нерабочим профилям ЗК в передаче. Независимо от степеней точности ЗК и ЗП установлены шесть видов сопряжений ЗК в передаче – *A, B, C, D, E, H* и восемь видов допуска на боковой зазор, обозначаемых в порядке его возрастания буквами: *x, y, z, a, b, c, d, h*. Эти нормы важны для передач, работающих в тяжелых

тепловых условиях, при больших нагрузках, для реверсивных передач.

Передачи, к которым не предъявляют особых требований по нормам точности, относят к передачам общего назначения.

Точность ЗК и ЗП задают степенями точности по нормам кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев, видом сопряжения и видом допуска бокового зазора в последовательности, указанной на рис. 2, *а*. Возможно краткое обозначение точности ЗК и ЗП (рис. 2, *б*) в том случае, когда степени точности по всем трем нормам одинаковы и виду сопряжения соответствует вид допуска на боковой зазор, обозначаемый той же буквой.

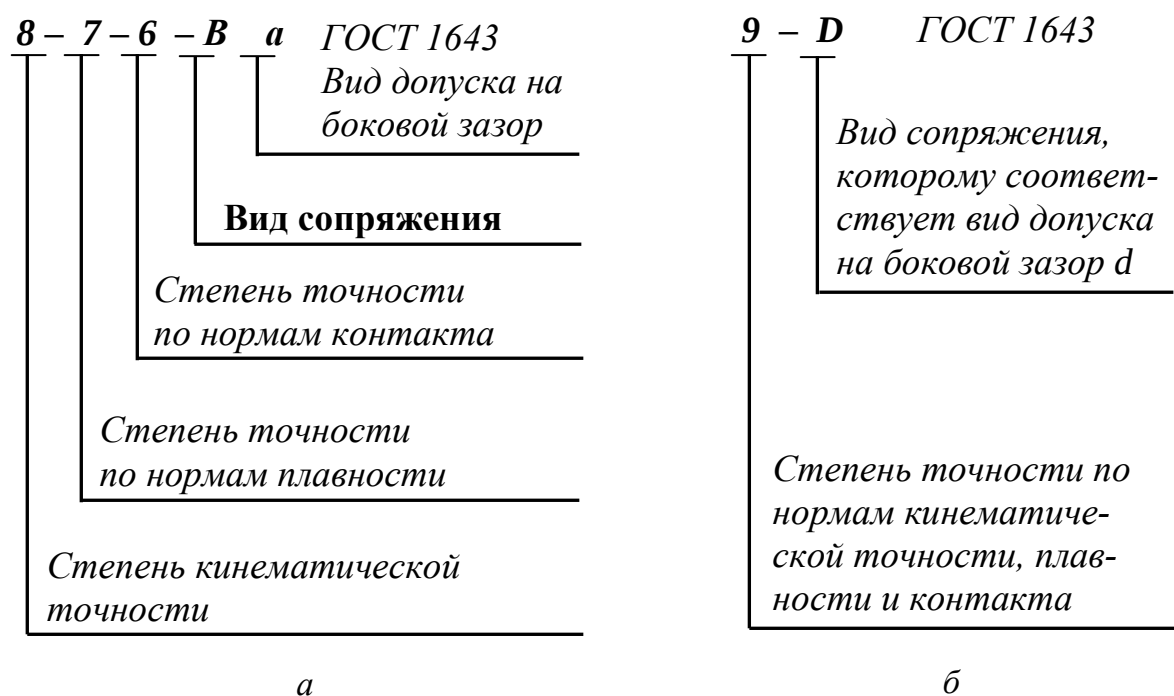


Рис. 2. Обозначение точности зубчатых колес и передач:

а – полное, *б* – краткое

Наиболее часто используют промежуточные варианты обозначения, например, 8-7-6-B, ГОСТ 1643. При необходимости в обозна-

чениях ЗК и ЗП указывают класс отклонений межосевого расстояния и соответствующий боковой зазор, например, 8-7-6-*Ca/V*-128, ГОСТ 1643. В том случае, когда по одной из норм точности степень точности конструктор не устанавливает, в обозначении указывают букву *N* вместо номера этой степени, например, 8-*N*-6-*B*, ГОСТ 1643.

Степень точности ЗК и ЗП устанавливают в зависимости от требований к кинематической точности, плавности работы, передаваемой мощности, а также окружной скорости ЗК, выполняя соответствующие расчеты (расчет угла рассогласования вращения ведущего и ведомого ЗК для определения степени кинематической точности, расчет динамики передачи для определения степени точности по нормам плавности, расчет на прочность и долговечность для определения степени точности по нормам контакта) [8].

При назначении степеней точности используют принцип комбинирования норм точности, позволяющий для конкретной передачи, в зависимости от ее назначения, установить различные степени точности по нормам кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев. Комбинирование норм позволяет установить более высокую точность для основных, определяющих служебное назначение норм точности и менее высокую – для остальных норм.

В соответствии с этим принципом нормы плавности работы ЗК и ЗП не могут быть более чем на две степени точнее или на одну степень грубее норм кинематической точности; нормы контакта зубьев не могут быть грубее норм плавности (за исключением передач с коэффициентом осевого перекрытия $\varepsilon_\beta \leq 1,25$, для которых нормы контакта могут быть на одну степень грубее норм плавности). Комбини-

рование норм точности позволяет снизить затраты на изготовление ЗК, а следовательно, и ЗП, за счет применения более простых методов обработки зубьев.

Вид сопряжения ЗП характеризуется величиной минимального бокового зазора в ЗП $j_{n\min}$, необходимого для компенсации температурных деформаций и размещения смазочного материала и определяемого расчетным путем.

ГОСТ 1643 устанавливает виды сопряжений в зависимости от степени точности ЗК и ЗП (табл. 1).

1. Соответствие видов сопряжения степеням точности ЗК и ЗП (ГОСТ 1643)

Вид сопряжения	Диапазон степеней кинематической точности ЗК и ЗП	Примечание
<i>A</i>	3 – 12	Сопряжения вида <i>B</i> гарантирует величину $j_{n\min}$, при котором исключается возможность заклинивания стальных или чугунных ЗК в передаче от нагрева при разности температур ЗК и корпуса в 25 °С
<i>B</i>	3 – 10	
<i>C</i>	3 – 9	
<i>D</i>	3 – 8	
<i>E</i>	3 – 7	
<i>H</i>	3 – 7	

При отсутствии специальных требований к партии или комплекту передач видам сопряжений *H* и *E* соответствует вид допуска на боковой зазор *h*, а видам сопряжений *D*, *C*, *B* и *A* – виды допуска *d*, *c*, *b* и *a* соответственно.

1.2. Комплексы контролируемых показателей точности зубчатых колес и передач

ГОСТ 1643 характеризует точность ЗК и ЗП рядом показателей. Набор этих показателей значительно больший, чем требуется для оценки нормируемых эксплуатационных свойств. При этом установлено несколько равноправных комплексов показателей точности ЗК и ЗП по всем нормам точности (табл. 2) [5, 8].

2. Показатели точности зубчатых колес и передач (ГОСТ 1643)

Нормы	Комплексы контролируемых показателей точности			Степень точности	Назначение
	№	Наименование	Обозначение		
1	2	3	4	5	6
Кинематическая точность	<i>Для колеса</i>				
	1	Наибольшая кинематическая погрешность ЗК	F'_{ir}	3 – 8	Для любых ЗК
	2	Накопленная погрешность шага ЗК и накопленная погрешность k шагов	F_{Pr} и F_{Pkr}	3 – 6	
	3	Накопленная погрешность шага ЗК	F_{Pr}	7, 8	
	4	Погрешность обката и радиальное биение зубчатого венца	F_{cr} и F_{rr}	3 – 8	
	5	Колебание длины общей нормали и радиальное биение зубчатого венца	F_{vWz} и F_{rr}	3 – 8	
	6	Колебание длины общей нормали и колебание измерительного межосевого расстояния за оборот ЗК	F_{vWz} и F''_{ir}	5 – 8	
	7	Погрешность обката и колебание измерительного межосевого расстояния за оборот ЗК	F_{cr} и F''_{ir}	5 – 8	

1	2	3	4	5	6
Кинематическая точность	8	Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот ЗК	F_{ir}''	9 – 12	
	9	Радиальное биение зубчатого венца	F_{rr}	7 – 12	7, 8 степени – для колес с делительным диаметром >1600 мм
	Для передачи				
	10	Наибольшая кинематическая погрешность передачи	F_{ior}'	3 – 8	Для любых передач
П л а в н о с т ь р а б о т ы	Для колеса				
	1	Местная кинематическая погрешность ЗК	f_{ir}'	3 – 8	Для прямозубых и узких косозубых колес
	2	Циклическая погрешность зубцовой частоты ЗК	f_{zzr}	3 – 8	
	3	Отклонение шага зацепления и погрешность профиля зуба	f_{Pbr} и f_{fr}	3 – 8	
	4	Отклонение шага зацепления и отклонение шага	f_{Pbr} и f_{Ptr}	3 – 8	
	5	Колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе	f_{ir}''	5 – 8	
		То же	f_{ir}''	9 – 12	Для любых колес
	6	Отклонение шага зацепления	f_{Pbr}	9 – 12	
	7	Отклонение шага	f_{Ptr}	9 – 12	
		То же	f_{Ptr}	7, 8	Для широких косозубых колес
	8	Циклическая погрешность ЗК	f_{zkr}	3 – 8	
	Для передачи				
	9	Местная кинематическая погрешность передачи	f_{ior}'	3 – 8	Для прямозубых и узких косозубых передач
	10	Циклическая погрешность зубцовой частоты в передаче	f_{zzor}	3 – 8	

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6
	11	Циклическая погрешность передачи	f_{zkr}	3 – 8	Для косозубых передач с широкими ЗК
Контакт зубьев	Для колеса				
	1	Погрешность направления зуба	$F_{\beta r}$	3 – 12	Для прямо-зубых и узких косозубых колес
	2	Суммарная погрешность контактной линии	F_{kr}	3 – 12	
	3	Отклонение осевых шагов по нормали и суммарная погрешность контактной линии	$F_{P_{\chi nr}}$ и F_{kr}	3 – 9	Для широких косозубых колес
	4	Отклонение осевых шагов по нормали и отклонение шага зацепления	$F_{P_{\chi nr}}$ и $F_{P_{br}}$	3 – 9	
	Для передачи				
	5	Отклонение от параллельности осей и перекос осей	f_{xr} и f_{yr}	3 – 12	Для любых передач
	6	Суммарное пятно контакта	–	3 – 11	
	7	Мгновенное пятно контакта	–	3 – 11	
Боковой зазор	Для колеса				
	1	Наименьшее дополнительное смещение и допуск на смещение исходного контура	E_{Hs} и T_H	3 – 2	Для любых колес
	2	Предельные отклонения измерительного межосевого расстояния	$E_{a''s}$ и $E_{a''i}$	6 – 7	
	3	Наименьшее отклонение средней длины и допуск на среднюю длину общей нормали	E_{Wms} и T_{Wm}	3 – 12	
	4	Наименьшее отклонение длины общей нормали и допуск на длину общей нормали	E_{Ws} и T_W	3 – 12	
	5	Наименьшее отклонение и допуск на толщину зуба	E_{cs} и T_c	3 – 12	

1	2	3	4	5	6
Боковой зазор	<i>Для передачи</i>				
	6	Гарантированный боковой зазор	$j_{n\ min}$	3 – 12	Для передач с регулируемым расположением осей
	7	Предельные отклонения межосевого расстояния	f_a	3 – 12	Для передач с нерегулируемым расположением осей
Примечания: 1. Под узкими косозубыми ЗК понимают колеса с коэффициентом осевого перекрытия: $\varepsilon_\beta \leq 1,25$ для ЗК 3-й и 4-й степеней точности, $\varepsilon_\beta \leq 1,5$ – для 5-й, $\varepsilon_\beta \leq 2,0$ – для 6-й, $\varepsilon_\beta \leq 2,5$ – для 7-й и $\varepsilon_\beta \leq 3,0$ – для 8-й степени точности по нормам контакта. 2. Допускается оценивать точность ЗК по суммарному или мгновенному пятну контакта его зубьев с зубьями измерительного ЗК. 3. Показатели плавности f'_{ir} (f'_{ior}), f_{zkr} (f_{zkr}), f_{zkr} (f_{zkr}), f''_{ir} получают по результатам измерения кинематической погрешности колеса (передачи).					

Система обозначения показателей точности ЗК и ЗП построена по следующим правилам [5, 8]:

- показатели кинематической точности, обозначают буквой « F », плавности работы – « f », бокового зазора – « E »;
- проставляют верхний индекс в виде штриха (например, показатель «наибольшая кинематическая погрешность колеса F'_{ir} »), если показатель контролируется в однопрофильном зацеплении; в виде двух штрихов (например, «колебание измерительного межосевого расстояния за оборот колеса F''_{ir} »), если показатель определяется в двухпрофильном зацеплении (беззазорное зацепление);
- нижним индексом « o » отмечают показатели точности передачи (например, «наибольшая кинематическая погрешность передачи

F_{ior} »); при отсутствии этого индекса показатель определяет точность ЗК;

– чтобы отличить действительное отклонение от допускаемого (от допуска), к обозначению отклонения добавляют нижний индекс « r ». Например, кинематическую погрешность ЗК обозначают F'_{ir} , а допуск на кинематическую погрешность ЗК – F'_{ir} .

Показатели кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев и бокового зазора ЗК в передаче установлены так, что результаты контроля ЗК или ЗП по одному из указанных комплексов не противоречат результатам проверки по другому комплексу. Например, если колесо по нормам кинематической точности признано годным по третьему комплексу контролируемых показателей (см. табл. 2), то оно не должно быть забраковано при повторном контроле по первому или любому другому комплексу.

Показатели точности зубчатой передачи (см. табл. 2) являются комплексными, поэтому контроль по этим показателям предпочтителен. Если кинематическая точность и плавность работы собранной передачи соответствуют требованиям стандарта, то контроль колес в отдельности по этим нормам не проводят. При раздельном предварительном контроле колес, входящих в передачу, контроль собранной передачи не является обязательным. Это положение распространяется и на контроль по нормам контакта зубьев.

При установлении комплекса контролируемых показателей для окончательного контроля следует отдавать предпочтение комплексным показателям, которые выявляют совокупность погрешностей при непрерывном процессе контроля. К ним относятся: показатель кинематической точности зубчатой передачи (ЗК); показатель плавности работы зубчатой передачи (ЗП); показатель бокового зазора (ЗБЗ); показатель контакта зубьев (ЗКЗ).

матической точности F'_{ir} (см. табл. 2), показатель плавности f'_{ir} , погрешность направления зуба $F_{\beta r}$ (для контакта зубьев), показатели бокового зазора E_{Hs} и T_H . Эти показатели, по сравнению с поэлементными (остальными по табл. 2), наиболее полно характеризуют точность ЗК. Средства измерения (СИ) ЗК, определяющие комплексные показатели, по сравнению со СИ поэлементных показателей являются более производительными.

В то же время для выявления технологических погрешностей (с целью подналадки технологической системы) целесообразно использовать поэлементные показатели.

2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ПЕРЕДАЧ

2.1. Измерение показателей точности зубчатых колес и передач

2.1.1. Измерение показателей кинематической точности

Измерение кинематической точности ЗК и ЗП производят по одному из указанных в табл. 2 нормируемых показателей или их комплексов.

Нормы кинематической точности передачи характеризуют величину погрешности угла поворота ведомого ЗК за его оборот. В ЗП (рис. 3) при повороте ведущего ЗК 1 на угол φ_1 ведомое ЗК 2 с учетом передаточного отношения должно повернуться на номинальный угол φ_3

$$\varphi_3 = \varphi_1 \frac{z_1}{z_2}, \quad (1)$$

где φ_1 – действительный угол поворота ведущего ЗК; z_1 и z_2 – соответственно число зубьев ведущего 1 и ведомого 2 ЗК.

Однако вследствие воздействия различных факторов (например, погрешностей изготовления ЗК, установки их при измерении и др.) ведомое ЗК 2 в действительности повернется на угол φ_2 , отличающийся от номинального угла поворота φ_3 .

Кинематической погрешностью передачи $F_{к.п.п}$ называют разность между действительным φ_2 и номинальным (расчетным) φ_3 углами поворота ведомого ЗК, выраженную в линейных величинах длиной дуги его делительной окружности.

$$F_{\text{к.п.п.}} = (\varphi_2 - \varphi_3) \cdot r, \quad (2)$$

где r – радиус делительной окружности ведомого ЗК.

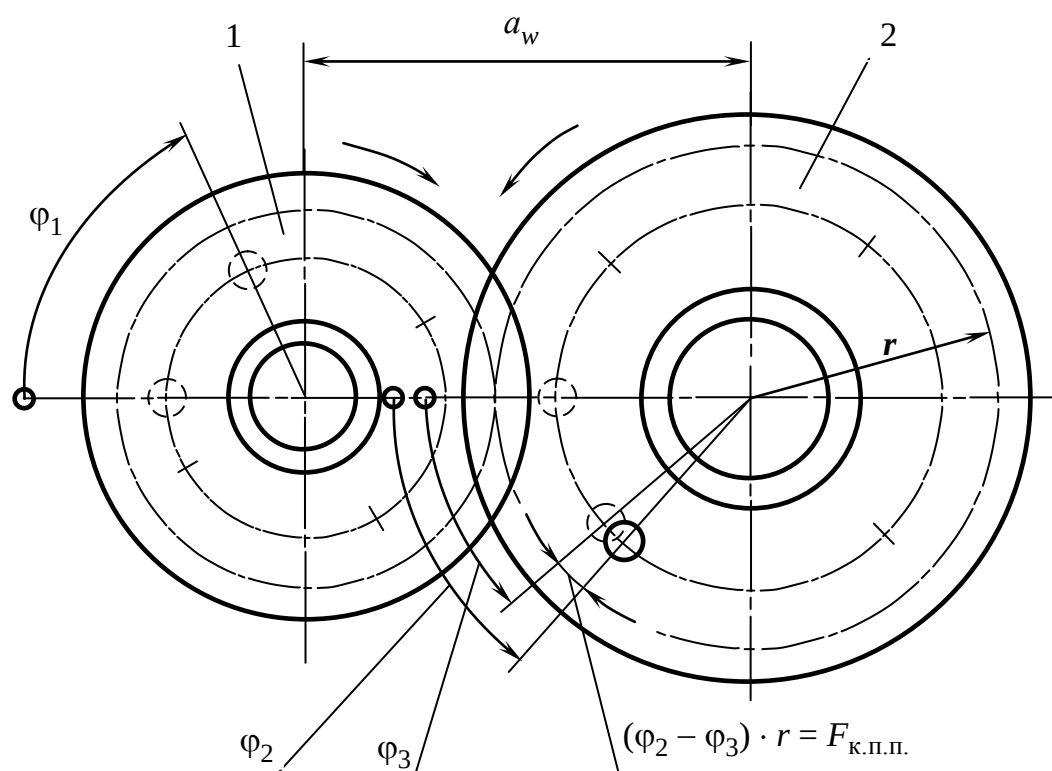


Рис. 3. Кинематическая погрешность ЗП:

1 – ведущее ЗК; 2 – ведомое ЗК

Кинематической погрешностью ЗК $F_{\text{к.п.к.}}$ называют разность между действительным и номинальным (расчетным) углами поворота ЗК на его *рабочей оси* ведомого *измерительным* (точным) ЗК при номинальном взаимном положении осей (номинальном межосевом расстоянии a_w) вращения этих колес. Эта погрешность выражается в линейных единицах длиной дуги делительной окружности ведомого (измеряемого) ЗК.

Согласно ГОСТ 1643 под рабочей осью ЗК понимают ось коле-

са, вокруг которой оно вращается в передаче (в изделии). Требования к точности ЗК допускается устанавливать относительно другой оси, например, оси отверстия ЗК под вал, которая может не совпадать с рабочей осью. Погрешности, вносимые вследствие несовпадения измерительной базы с рабочей осью, должны быть учтены при установлении точности передачи или компенсированы введением уменьшенного производственного допуска.

В качестве измерительного ЗК используют колесо повышенной точности, как правило, на 2–3 степени точнее измеряемого ЗК.

Показатели кинематической точности отдельных ЗК имеют преимущественное применение перед показателями кинематической точности передачи, так как позволяют независимо оценивать качество каждого из парных колес при их изготовлении. Если кинематическая погрешность ЗК при измерении на их рабочей оси не превышает допускаемых значений и требования селективной сборки (с сортировкой зубчатых колес на группы по точности) не выдвигаются, то контроль кинематической точности передачи не обязателен [5, 8]. Также если контролируемая кинематическая точность передачи соответствует требованиям стандарта, то контроль кинематической точности ЗК не обязателен.

Комплексным показателем кинематической точности колес (3–8) степеней точности является **наибольшая кинематическая погрешность зубчатого колеса** F'_{ir} – наибольшая алгебраическая разность значений кинематической погрешности ЗК, в пределах его полного оборота (см. рис. 4).

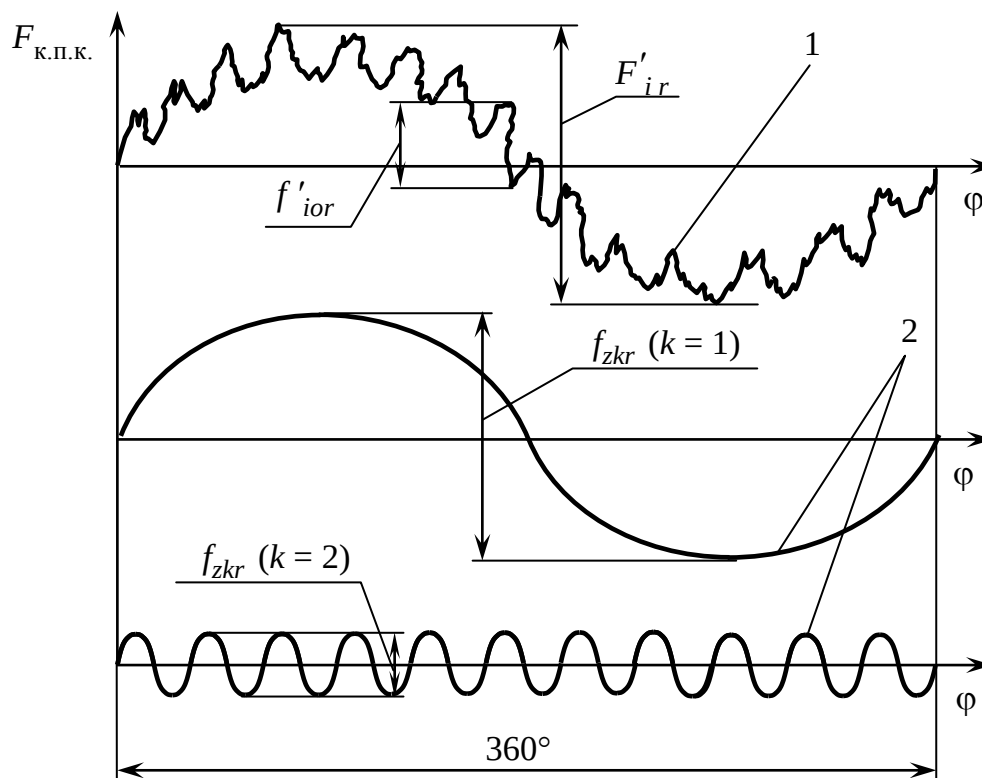


Рис. 4. Характер изменения кинематической погрешности ЗК и ее гармонических составляющих: 1 – кривая кинематической погрешности; 2 – гармонические составляющие кинематической погрешности при разных значениях частоты колебаний k

Наибольшую кинематическую погрешность ЗК определяют при однопрофильном зацеплении измерительного ЗК (его погрешностью, как правило, пренебрегают) с измеряемым ЗК при непрерывном их обкате путем сопоставления углов поворота этих колес. Однопрофильным называют зацепление ЗК, в котором в процессе обката межосевое расстояние (как правило, номинальное) сохраняется неизменным, а ЗК обкатывают, прижимая их к одному (левому или правому) профилю. Достоинством измерения в однопрофильном зацеплении (однопрофильного измерения) является то, что условие зацеп-

ления при контроле соответствует условиям работы ЗК в механизме.

Существуют различные конструкции приборов для измерения кинематической погрешности в однопрофильном зацеплении [3, 10].

В современных приборах, оснащенных электронными системами, измерение кинематической погрешности сводится к определению угловых перемещений измеряемого ЗК (с использованием импульсных преобразователей) при постоянном вращении измерительного ЗК. Примером могут служить приборы БВ-5058 и БВ-5083 Челябинского инструментального завода. Приборы позволяют измерять наибольшую кинематическую погрешность ЗК F'_{ir} и ее составляющие: местную кинематическую погрешность f'_{ir} и циклическую погрешность f_{zr} зубцовой частоты ЗК (см. рис. 4).

Прибор для измерения кинематической погрешности ЗК с использованием фотоимпульсного электронного преобразователя работает следующим образом (рис. 5) [10]. Измерительное 1 и измеряемое 2 зубчатые колеса приводятся в однопрофильное зацепление при номинальном межосевом расстоянии. Вращение ЗК осуществляется приводом 8. Соосно с каждым из колес расположены стеклянные лимбы 5 и 13 с радиальными штрихами по окружности (расположены через 2' и 4'). С одной стороны лимбов расположены осветительные лампы 3 и 11, которые через фокусирующие линзы 4 и 12 направляют свет на фотодиоды 7 и 15. Между стеклянными лимбами и фотодиодами расположены сетки 6 и 14 с такими же рисками, что и на лимбах. Прохождение света через вращающиеся прозрачные лимбы и неподвижные сетки с нанесенными рисками вызывает пульсирующий ток в фотодиодах, пропорциональный угловому положению ЗК.

По фазометру 9 определяют сдвиг фаз синусоидальных сигналов, характеризующих погрешность зацепления зубчатой пары.

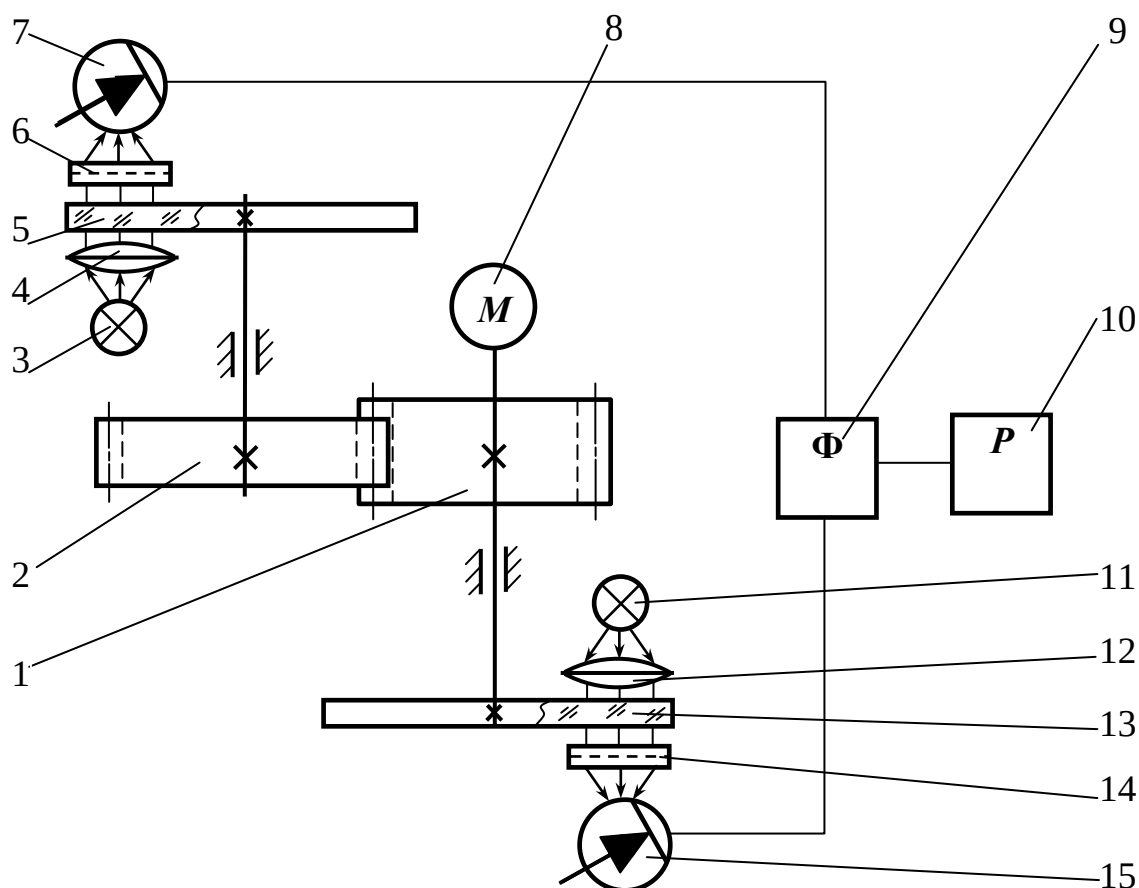


Рис. 5. Схема прибора для контроля кинематической погрешности цилиндрических ЗК: 1 – измерительное ЗК; 2 – контролируемое ЗК; 3, 11 – источник света; 4, 12 – фокусирующие линзы; 5, 13 – стеклянные лимбы; 6, 14 – сетки; 7, 15 – фотодиоды; 8 – привод вращения ЗК; 9 – фазометр; 10 – регистрирующее устройство

Комплексный показатель F'_{ir} наиболее полно характеризует кинематическую погрешность ЗК в условиях, близких к эксплуатационным [3, 5]. Однако сложность измерения кинематической погрешности в однопрофильном зацеплении и высокая стоимость измерительных приборов ограничивают применение этого показателя. Этим обу-

словлено применение для оценки кинематической погрешности ЗК поэлементных показателей.

Для оценки кинематической погрешности ЗК (3 – 6) степеней точности установлены комплексы контролируемых показателей, включающие накопленную погрешность шага ЗК F_{Pr} и накопленную погрешность k шагов F_{Pkr} . Для зубчатых колес 7, 8 степеней точности достаточным является измерение накопленной погрешности шага F_{Pr} (см. табл. 2). Применение этих показателей обосновано тем, что в ГОСТ 1643 одним из составляющих допуска на наибольшую кинематическую погрешность ЗК F'_i является допуск на накопленную погрешность шага F_{Pr} .

Накопленная погрешность шага ЗК F_{Pr} – наибольшая алгебраическая разность значений накопленных погрешностей шага в пределах ЗК.

Накопленная погрешность k шагов F_{Pkr} – наибольшая разность дискретных значений кинематической погрешности ЗК при номинальном его повороте на k целых угловых шагов (рис. 6):

$$F_{Pkr} = (\varphi - k \cdot 2\pi / z) \cdot r, \quad (3)$$

где φ – действительный угол поворота измеряемого ЗК; z – число зубьев ЗК; $k \cdot 2\pi / z$ – номинальный угол поворота ЗК; k – число целых угловых шагов, $k \geq 2$; r – радиус делительной окружности ЗК.

Накопленные погрешности шага и k шагов ЗК измеряют на угловых шагомерах или с применением универсальных приборов для угловых измерений, например, с помощью оптической делительной

головки [3, 10, 11]. Принципиальная схема измерения накопленной погрешности шага с помощью углового шагомера приведена на рис. 7.

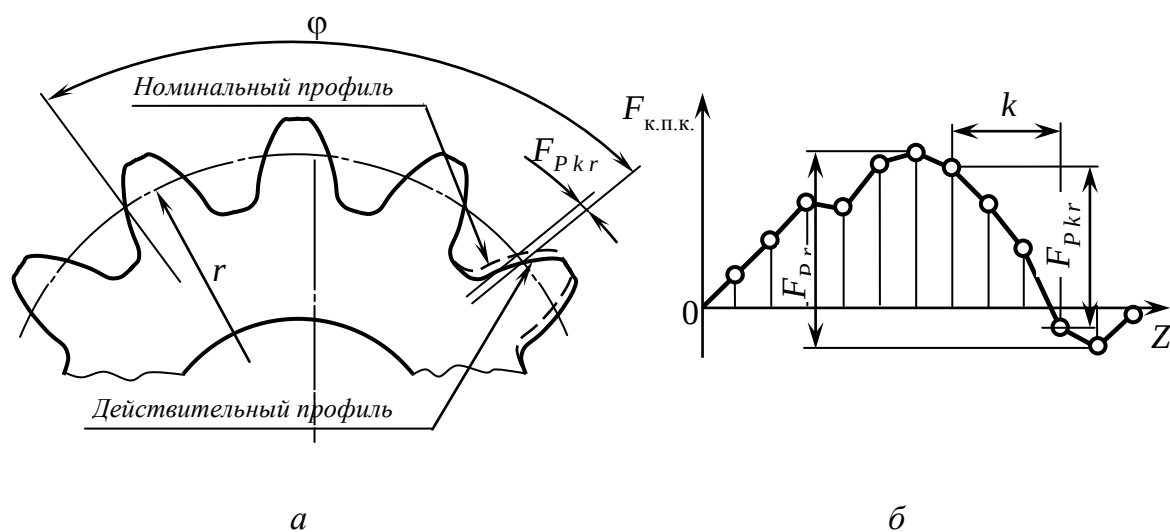


Рис. 6. Схемы к определению накопленной погрешности шага ЗК:

a – накопленная погрешность k шагов; *б* – характер изменения накопленной погрешности шага

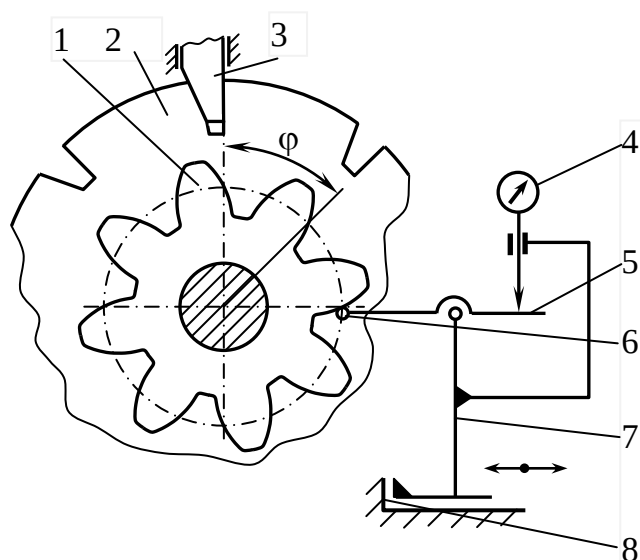


Рис. 7. Измерение накопленной погрешности шага с помощью углового шагомера:

1 – измеряемое ЗК; 2 – угловой лимб; 3 – фиксатор;
4 – измерительный прибор; 5 – рычаг; 6 – измерительный наконечник;
7 – каретка; 8 – упор

Измеряемое ЗК 1 устанавливают соосно с угловым лимбом 2 и стопорят фиксатором 3. Измерительный наконечник 6, установленный на рычаге 5 каретки 7, приводят в соприкосновение с боковой поверхностью зуба и измерительный прибор (например, индикатор часового типа) устанавливают в начальное положение. Измерительный наконечник 6 при всех измерениях должен находиться на одинаковом расстоянии от оси ЗК. Радиальное положение каретки 7 фиксируют упором 8. Затем при помощи каретки 7 наконечник 6 отводят и ЗК последовательно поворачивают от зуба к зубу по всей окружности на величину номинального углового шага $\varphi = 360^\circ/z$. Разность наибольшего и наименьшего отклонений измерительного прибора по всей окружности ЗК составит накопленную погрешность шага.

Кинематическую погрешность ЗК (передачи) можно рассматривать как результат проявления радиальной и тангенциальной составляющих этой погрешности. Радиальная составляющая, как правило, является результатом биения заготовки ЗК относительно оси вращения стола зуборезного станка и биения режущего инструмента. Тангенциальная составляющая является следствием несогласованности движения режущего инструмента и заготовки ЗК при зубонарезании, т. е. кинематических погрешностей зуборезного станка.

Поэтому один из комплексов контролируемых показателей включает погрешность обката F_{cr} и радиальное биение зубчатого венца F_{rr} (см. табл. 2, комплекс 4).

Погрешность обката F_{cr} – составляющая кинематической погрешности ЗК, определяемая при вращении его на технологической оси и при исключении циклических погрешностей зубцовой частоты.

Под технологической осью ЗК понимают ось, вокруг которой оно вращается в процессе окончательной обработки зубьев (ось вращения стола зуборезного станка).

Погрешность обката, как правило, измеряют с помощью специальных приборов – кинематометров [1], позволяющих оценить погрешность кинематической цепи деления зубообрабатывающего станка. Принцип действия этих приборов тот же, что и электронных приборов для измерения кинематической погрешности колес (см. рис. 5). Те же и недостатки этих приборов – их сложность и высокая стоимость.

Часто тангенциальную составляющую кинематической погрешности ЗК оценивают измерением *колебания длины общей нормали* F_{vwz} с помощью более простых универсальных приборов. Измерить колебания длины общей нормали можно с помощью микрометров, оснащенных тарельчатыми измерительными наконечниками, специальными рычажными скобами, а также нормалемерами. Определение и методика измерения колебания длины общей нормали на универсальном приборе для измерения ЗК ЗИП-1 изложены в лабораторной работе № 1 (см. п. 3.1), с помощью нормалемера индикаторного – в лабораторной работе № 6 (см. п. 3.6).

Как правило, совместно с колебанием длины общей нормали F_{vwz} измеряют радиальную составляющую кинематической погрешности ЗК – радиальное биение зубчатого венца F_{rr} . Эти показатели входят в пятый комплекс контролируемых показателей точности, предусмотренных для ЗК (3 – 8) степеней точности (см. табл. 2).

Радиальное биение зубчатого венца F_{rr} измеряют с помощью биениемеров или универсальных приборов для измерения ЗК (например, ЗИП-1), оснащенных наладками с модульными профильными наконечниками с углом конуса 40° . Определение и методика измерения радиального биения зубчатого венца приведены в лабораторных работах № 1 и № 2 (см. пп. 3.1 и 3.2).

В условиях массового и крупносерийного производства ЗК (5 – 8) степеней точности для оценки радиальной составляющей кинематической погрешности часто используют комплексный параметр – **колебание измерительного межосевого расстояния за оборот колеса F_{ir}''** . Параметр F_{ir}'' определяют при двухпрофильном зацеплении измерительного ЗК с измеряемым колесом при повороте последнего на полный оборот. При этом методе контроля измеряемое и измерительное ЗК при их вращении радиально поджимаются друг к другу без бокового зазора, соприкасаясь одновременно как по левым, так и по правым профилям зубьев. Таким образом осуществляется двухпрофильное зацепление.

Колебание измерительного межосевого расстояния можно определить в цеховых условиях с использованием межосемеров Челябинского инструментального завода. Эти приборы снабжены мотоприводом, отсчетным и записывающими устройствами и легко автоматизируются [3]. Определение и методика измерения колебания измерительного межосевого расстояния с использованием межосемера МЦ-160 М2 приведены в лабораторной работе № 3 (см. п. 3.3).

ЗК (9 – 12) степеней точности допускается контролировать по одному из показателей точности – колебанию измерительного межосе-

севого расстояния за оборот колеса F_{ir}'' или радиальному биению зубчатого венца F_{rr} (комплексы контролируемых показателей 8 и 9 в табл. 2).

Для контроля кинематической погрешности передачи, как правило, рекомендуется [3, 5] только комплексный показатель (см. табл. 2) – **наибольшая кинематическая погрешность передачи** F_{ior}' – наибольшая алгебраическая разность значений кинематической погрешности передачи за полный цикл изменения относительного положения ЗК (т. е. в пределах числа оборотов большего ЗК, равного частному от деления числа зубьев меньшего ЗК на общий наибольший делитель чисел зубьев обоих ЗК передачи).

Наибольшую кинематическую погрешность ЗП измеряют при однопрофильном зацеплении ЗК на тех же приборах, что и наибольшую кинематическую погрешность ЗК (см. приложение табл. П.1). Эти приборы позволяют измерить также местную кинематическую погрешность передачи f_{ior}' , как составляющую F_{ior}' .

Для контроля накопленной погрешности шага и накопленной погрешности k шагов, колебания длины общей нормали и радиального биения зубчатого венца кроме указанных выше средств и методов измерения можно использовать современные СИ – зубоизмерительные машины [4, 12]. Одним из примеров является зубоизмерительная машина фирмы *Mahr GMX 400*. Машина создана на базе кругломера и оснащена, как и трехкоординатные измерительные машины, сканирующей головкой и соответствующим программным обеспечением. Эта измерительная машина оснащена также встроенной системой

термокомпенсации, что обеспечивает высокую точность измерения даже при значительных колебаниях температуры. Измерения указанных выше показателей точности ЗК полностью автоматизированы.

2.1.2. Измерение показателей плавности работы

Плавность работы ЗК и ЗП характеризуется показателями, погрешности которых циклически (многократно) повторяются за оборот колеса. Циклический характер погрешностей позволяет нормировать и оценивать погрешности плавности работы по спектру гармонических составляющих кинематической погрешности.

Особенность нормирования требований к плавности работы заключается в том, что даются отдельные комплексы контролируемых показателей (см. табл. 2) для передач прямозубых вместе с узкими косозубыми и для косозубых передач с широкими ЗК. Это связано с тем, что при работе косозубых передач с широкими зубьями, в отличие от прямозубых и узких косозубых, имеется осевое перекрытие зубьев, т. е. одновременно при зацеплении находится более пары зубьев в сечении осевой плоскостью [5].

Плавность работы прямозубых и узких косозубых ЗК и ЗП в первую очередь рекомендуется оценивать с помощью комплексных показателей местной кинематической погрешности передачи f'_{ir} и f'_{ior} и циклической погрешности зубцовой частоты f_{zkr} и f_{zkor} , а широких косозубых колес и передач – с помощью циклической погрешности f_{zkr} и f_{zkor} (см. табл. 2).

Местная кинематическая погрешность колеса (передачи) f'_{ir}

(f'_{ior}) – наибольшая разность между местными соседними экстремальными (минимальными и максимальными) значениями кинематической погрешности ЗК (ЗП) в пределах его оборота (за полный цикл изменения относительно положения ЗК передачи) (см. рис. 4).

Циклическая погрешность колеса (передачи) f_{zkr} (f_{zkor}) – удвоенная амплитуда гармонической составляющей кинематической погрешности ЗК (ЗП). Контролируют обычно вторую ($k = 2$) гармоническую составляющую (см. рис. 4).

Циклическая погрешность зубцовой части колеса (передачи) $f_{z zr}$ ($f_{z zor}$) – циклическая погрешность ЗК при зацеплении с измерительным ЗК (в передаче) с частотой повторений, равной частоте входа зубьев в зацепление.

Для определения показателей плавности работы зубчатых колес и передач f'_{ir} и f'_{ior} , $f_{z zr}$ и $f_{z zor}$, $f_{z kr}$ и $f_{z kor}$ применяют автоматические анализаторы для комплексного однопрофильного измерения, оснащенные электронной системой и импульсными преобразователями, позволяющие производить запись кинематической погрешности и выполнить ее гармонический анализ (см. рис. 5).

Для ЗК (3 – 8) степеней точности кроме рассмотренных выше комплексных показателей можно использовать комплексы 3 и 4 (см. табл. 2) поэлементных показателей: **отклонение шага зацепления f_{Pbr}** и **погрешность профиля зуба f_{fr}** и **отклонение шага f_{Ptr}** .

Отклонения шага зацепления и шага контролируют с помощью накладных шагомеров или на универсальных зубоизмерительных приборах. Определения и методики измерения f_{Pbr} и f_{Ptr} с помощью

универсальных приборов ЗИП-1 и УЗП-400 приведены в лабораторных работах № 1 и № 2 (см. пп. 3.1 и 3.2).

Измерение профиля зуба заключается в сопоставлении действительного эвольвентного профиля с его теоретической формой с помощью эвольвентомера. Определения и методика измерения отклонения профиля зуба на эвольвентомере изложены в лабораторной работе № 5 (см. п. 3.5).

Для прямозубых и узких косозубых ЗК (5 – 8) степеней точности (см. табл. 2) в качестве контролируемого параметра может быть использовано *колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе f_{iz}''* . Измерение колебания измерительного межосевого расстояния осуществляют с помощью межосемеров – приборов для комплексного двухпрофильного контроля. Определения и методика измерения этого параметра на межосемере МЦ-160 М2 изложены в лабораторной работе № 3 (см. п. 3.3).

ЗК пониженных (9 – 12) степеней точности могут быть проконтролированы по одному из трех показателей точности f_{iz}'' , f_{pbr} и f_{ptr} .

2.1.3. Измерение полноты контакта зубьев

На полноту контакта зубьев влияют как погрешности самих ЗК, особенно по направлению и профилю зуба, так и погрешности их взаимного расположения в передаче. Поэтому наиболее объективной оценкой полноты контакта зубьев является измерение комплексного показателя – суммарного пятна контакта с парным ЗК в собранной передаче.

Для оценки полноты контакта зубьев ЗК используются также и поэлементные показатели, входящие в 1-й и 2-й комплексы контролируемых показателей (см. табл. 2). Так же, как и для контроля плавности работы, комплексы контролируемых показателей назначены отдельно для прямозубых (и узких косозубых) колес и широких косозубых колес. Для прямозубых и узких косозубых колес в ГОСТ 1643 предусмотрены показатели в виде допуска на направление зуба F_{β} или суммарную погрешность контактной линии F_k .

Измерение *погрешности направления зуба* $F_{\beta r}$ прямозубого колеса выполняют на специальных приборах, например, на зубоизмерительной машине БВ-5077 [3], либо на любом устройстве, имеющем центры и каретку, перемещающуюся параллельно оси центров. Определение и методика измерения погрешности направления зуба на универсальном приборе УЗП-400 изложены в лабораторной работе № 2 (см. п. 3.2).

Суммарная погрешность контактной линии F_{kr} – расстояние по нормали между двумя ближайшими друг к другу номинальными контактными линиями, условно наложенными на плоскость (поверхность) зацепления, между которыми размещается действительная контактная линия на активной боковой поверхности зуба (рис. 8). Фактически это погрешность формы и расположения контактной линии. Потенциальная контактная линия представляет собой линию пересечения поверхности зуба плоскостью зацепления.

В прямозубых ЗК контактные линии должны располагаться параллельно оси колеса, а в косозубых – под углом к оси. При зубооб-

работке, например, при зубодолблении, контактная линия получается как след кромки режущего инструмента.

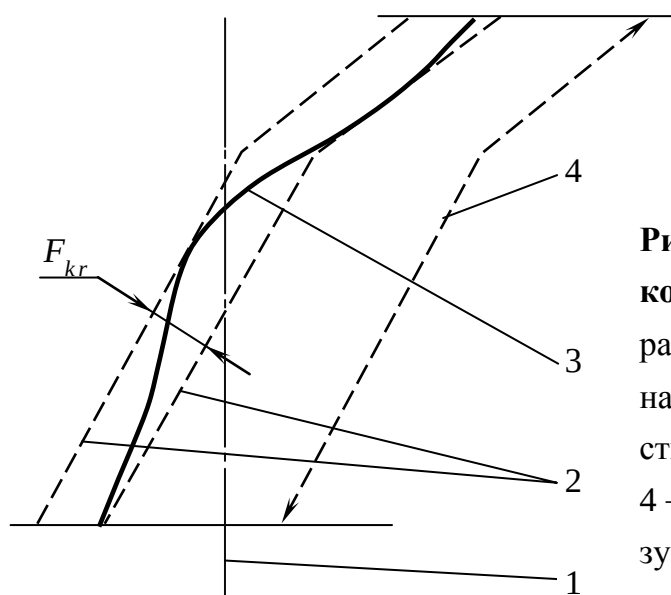


Рис. 8. Суммарная погрешность контактной линии: 1 – направление рабочей оси вращения ЗК; 2 – номинальные контактные линии; 3 – действительная контактная линия; 4 – границы активной поверхности зуба

В настоящее время нормирование и использование в качестве контролируемого показателя суммарной погрешности контактной линии не получило распространения [5].

Для широких косозубых ЗК кроме комплексного показателя – суммарного пятна контакта – нормируют два комплекса поэлементных показателей (см. табл. 2): отклонение осевых шагов по нормали $F_{P_{xnr}}$ и суммарная погрешность контактной линии F_{kr} ; отклонение осевых шагов по нормали $F_{P_{xnr}}$ и отклонение шага зацепления f_{pbr} .

Отклонение осевых шагов по нормали $F_{P_{xnr}}$ – разность между действительным осевым расстоянием зубьев и суммой соответствующего числа номинальных осевых шагов, умноженных на синус угла наклона делительной линии зуба.

Под действительным осевым расстоянием зубьев понимают

расстояние между одноименными линиями зубьев косозубого ЗК по прямой, параллельной рабочей оси. Для ограничения этой погрешности установлены предельные отклонения: верхнее “ $+F_{p\chi n}$ ” и нижнее “ $-F_{p\chi n}$ ”.

Показатель $F_{p\chi nr}$ для нормирования точности ЗК в промышленности почти не используется ввиду того, что он не характеризует полностью контакт зубьев в передаче и не связан с конкретными технологическими причинами возникновения погрешностей. Процесс его измерения трудно реализовать на больших ЗК, для которых контакт зубьев в передаче особенно важен [5].

Как отмечалось выше, на полноту контакта зубьев влияют погрешности взаимного расположения ЗК в передаче. Эти погрешности возникают из-за отклонения от параллельности $f_{\chi r}$ и перекоса f_{yr} осей в передаче (см. табл. 2, комплекс 5).

Отклонение от параллельности осей $f_{\chi r}$ – отклонение от параллельности проекций рабочих осей ЗК в передаче на плоскость, в которой лежит одна из осей и точка второй оси в средней плоскости передачи. Определяется в торцовой плоскости в линейных единицах на длине, равной рабочей ширине зубчатого венца B_w или ширине полушеврона (рис. 9, а). Под средней плоскостью передачи понимается плоскость, проходящая через середину рабочей ширины зубчатого венца.

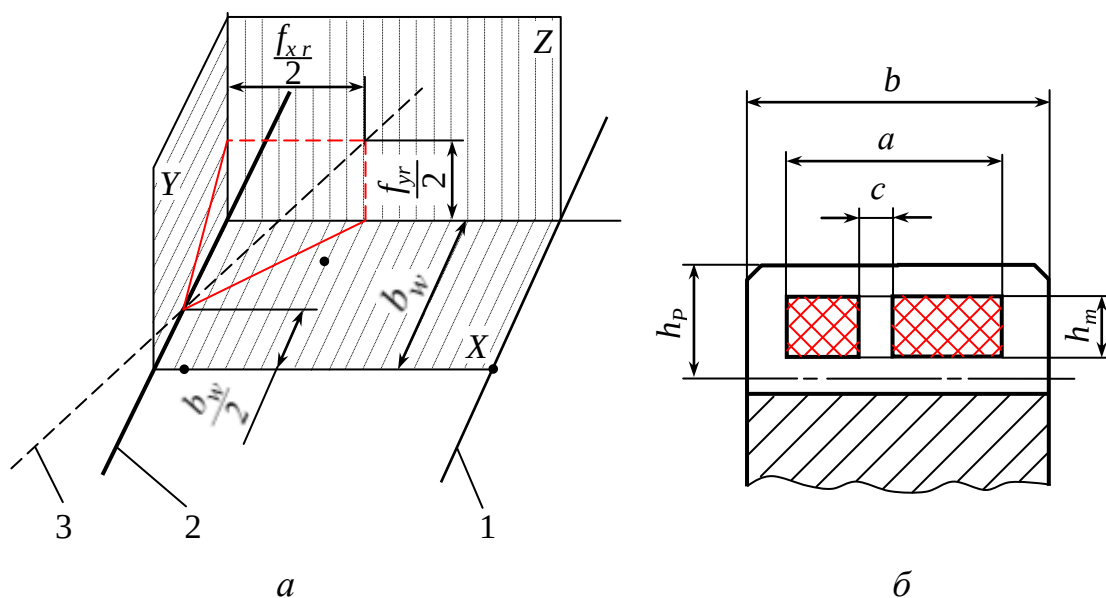


Рис. 9. Показатели норм контакта зубьев для передачи:

a – отклонение от параллельности f_{xr} и перекос f_{yr} осей;

б – суммарное пятно контакта; 1 – действительное положение оси 1;
2 – номинальное положение оси 2; 3 – действительное положение оси 2

Перекас осей f_{yr} – отклонение от параллельности проекции рабочих осей ЗК в передаче на плоскость, параллельную одной из осей и перпендикулярную плоскости, в которой лежит эта ось, и точка пересечения второй оси со средней плоскостью передачи. Определяется в торцевой плоскости в линейных единицах на длине, равной рабочей ширине зубчатого венца B_w или для *шевронной* передачи через середину расстояния между внешними торцами, ограничивающими рабочую ширину полушеврона (см. рис. 9, *a*).

Погрешности f_{xr} и f_{yr} характеризуют точность монтажа передачи с нерегулируемым расположением осей и во многом зависят от точности расположения осей основных отверстий корпуса механизма.

Значения f_{xr} и f_{yr} определяют при сборке передачи с использованием специальных стендов или поверочных контрольных приспособлений [2, 3].

Для оценки полноты контакта зубьев передачи предпочтительными являются суммарное или мгновенное пятно контакта (см. табл. 2, комплексы 6 и 7).

Суммарное пятно контакта – часть активной боковой поверхности зуба ЗК, на которой располагаются следы прилегания зубьев парного ЗК в собранной передаче после вращения под нагрузкой, установленной конструктором (рис. 9, б). Для лучшего обнаружения суммарного пятна контакта зубьев боковую поверхность меньшего или измерительного колеса покрывают слоем краски. Величину пятна контакта определяют по относительным размерам в процентах:

– по длине зуба – отношением расстояния a между крайними точками следов прилегания за вычетом разрывов c , превосходящих величину модуля в нем, к длине зуба b

$$\frac{a - c}{b} \cdot 100\%; \quad (4)$$

– по высоте зуба – отношением средней (по всей длине зуба) высоты следов прилегания h_m к высоте зуба соответствующей активной боковой поверхности h_p

$$\frac{h_m}{h_p} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Допускается оценивать точность ЗК по пятну контакта их зубьев с зубьями измерительного ЗК.

Мгновенное пятно контакта – часть активной боковой поверхности зуба колеса передачи, на которой располагаются следы его прилегания к зубьям шестерен (ЗК с меньшим числом зубьев), покрытым красителем, после поворота колеса собранной передачи на

полный оборот при легком торможении, обеспечивающем непрерывное контактирование зубьев обоих ЗК. Мгновенное пятно контакта определяют не вращая колеса, а лишь поворачивая их в пределах двух – трех зубьев и без существенной нагрузки [10].

Измерение пятна контакта осуществляют в собранной передаче, либо на контрольно-обкатном станке (при зацеплении с измерительным ЗК) [3].

2.1.4. Измерение показателей бокового зазора

Боковым зазором называется расстояние по нормали между нерабочими профилями зубьев ЗК, находящихся в непосредственном зацеплении.

Наименьшее значение бокового зазора играет решающую роль для предотвращения чрезмерного «мертвого хода», возможного заклинивания при нагреве передачи, шума при работе и обеспечения нормальных условий смазывания рабочих поверхностей зубьев [10].

Для передач с нерегулируемым расположением осей показателем бокового зазора является *предельное отклонение межосевого расстояния* f_a , а с *регулируемым* – *гарантированный боковой зазор* $j_{n\min}$ (см. табл. 1). Непосредственное измерение f_{ar} и j_n является наиболее объективным методом оценки бокового зазора в передаче.

Отклонение f_{ar} межосевого расстояния – разность между действительным и номинальным a_w межосевым расстояниями в средней торцовой плоскости передачи (см. рис. 3). Для этой погрешности установлены предельные отклонения: верхнее “+ f_a ” и нижнее “– f_a ”.

Измерение отклонения межосевого расстояния производят в условиях, близких к эксплуатационным, на межосемерах (станковых измерительных приборах для комплексной двухпрофильной проверки) с установкой ЗК на рабочую ось. Определение и методика измерения межосевого расстояния на межосемере приведены в [3].

Измерение бокового зазора осуществляют в собранной передаче с помощью щупа, свинцовой пластины или стрелочного прибора (например, индикатора часового типа), упирающегося в боковые поверхности зуба методом люфтирования [3, 10]. Определение и методика измерения бокового зазора ЗП косвенным методом на межосемере МЦ-160 М2 приведены в лабораторной работе № 4 (см. п. 3.4).

Боковой зазор в передачах, как правило, создается за счет некоторого уменьшения толщины зубьев сопрягаемых колес. Уменьшение толщины зубьев при изготовлении обеспечивается смещением исходного контура режущего инструмента в направлении оси ЗК. Это обязательное смещение носит название «дополнительное смещение исходного контура», которое может быть измерено непосредственно на ЗК [5]. Поэтому в качестве контролируемых показателей точности ЗК по нормам, характеризующим боковой зазор, используют (см. табл. 2) наименьшее дополнительное смещение исходного контура E_{Hs} и допуск на его смещение T_H , наименьшее отклонение толщины зуба E_{cs} и допуск на толщину зуба T_c , а также наименьшее отклонение средней длины общей нормали E_{Wms} и допуск на длину общей нормали T_{Wm} .

Измерение *дополнительного смещения исходного контура* E_{Hs} осуществляют с помощью зубомеров смещения, а также универсальными средствами измерений, например, микрометром или индикаторной скобой методом двух роликов [3, 10]. Определение и методика измерения этого параметра с помощью зубомера смещения приведены в лабораторной работе № 6, методом двух роликов – в лабораторной работе № 7 (см. п. 3.6 и п. 3.7).

Отклонение *толщины зуба* E_{cs} от заданного значения измеряют прямым методом с помощью кромочных зубомеров (микрометрических или индикаторных), штангензубомеров и др. [3]. Определение и методика измерения отклонения толщины зуба по постоянной хорде зуба штангензубомером приведены в лабораторной работе № 6 (см. п. 3.6).

Измерение *отклонений средней длины общей нормали* E_{wmr} производят с помощью тех же приборов, что и для измерения колебания длины общей нормали (см. стр. 28) при настройке их на номинальное значение этой длины. Определение и методика измерения отклонений средней длины общей нормали с помощью нормалемера индикаторного приведены в лабораторной работе № 6, на станковом приборе ЗИП-1 – в лабораторной работе № 2 (см. п. 3.6 и п. 3.2).

Боковой зазор между зубьями в передаче является замыкающим звеном сборочной размерной цепи, в которой межосевое расстояние – одно из составляющих звеньев. Поэтому в качестве одного из комплексов контролируемых показателей для поэлементного измерения зубчатых колес используют предельные отклонения измерительного межосевого расстояния $E_{a''s}$ и $E_{a''i}$.

Измерение *отклонений измерительного межосевого расстояния* $E_{a''s}$ и $E_{a''i}$ выполняют комплексным измерением в двух-профильном зацеплении ЗК, когда измерительное межосевое расстояние в приборе первоначально устанавливают равным его номинальному значению [10]. Для измерения используют станковые измерительные приборы – межосемеры. Методика измерения отклонений измерительного межосевого расстояния на межосемере МЦ-160 М2 изложена в лабораторной работе № 3 (см. п. 3.3).

2.2. Координатные методы измерений параметров точности зубчатых колес

Полный контроль ЗК, то есть контроль всех четырех норм точности, предусматривает измерение достаточно большого количества геометрических и функциональных показателей ЗК, входящих в тот или иной комплекс (см. табл. 2). Такой контроль является процессом трудоемким и осуществляется с применением как универсальных, так и специальных (специализированных), часто дорогостоящих, СИ. К недостаткам таких СИ, в первую очередь, относятся низкий уровень автоматизации процесса измерения и узкая специализация этих СИ, то есть для каждого контролируемого параметра часто необходимо применять свое СИ (табл. П.1*). Кроме того, измерение показателей точности ЗК в этих условиях осуществляется не на всей рабочей поверхности зуба, а либо в определенных точках, либо вдоль определенных линий. Такая измерительная информация не дает объективную оценку годности высокоточных ЗК.

* Здесь и далее табл. П.1, П.2 размещены в приложениях.

К современным направлениям совершенствования метрологического обеспечения производства ЗК можно отнести [4]:

- создание и применение измерительных систем, позволяющих осуществлять анализ отклонений параметров ЗК и обратную связь с их производством;
- повышение точности измерений;
- повышение скорости измерений;
- обеспечение возможности контроля ЗК непосредственно в производстве;
- обеспечение возможности измерения топографии ЗК;
- внедрение новых стандартов измерений и оценки точности ЗК;
- повышение достоверности измерений;
- обеспечение возможности выдачи стандартизированных протоколов измерений (прослеживаемости результатов на различных стадиях производства и при поставке изделия потребителю).

Во многом эти направления могут быть реализованы путем применения координатного метода измерения с помощью координатно-измерительных машин (КИМ) и координатно-измерительных систем (КИС).

Координатные измерения геометрических параметров объектов (деталей) осуществляют путем измерения координат отдельных точек поверхностей объекта в принятой системе координат (прямоугольной декартовой, цилиндрической или сферической (рис. 10)) и последующей математической обработки измеренных координат для определения линейных и угловых размеров, отклонений формы и расположения поверхностей.

Координатно-измерительная машина – средство измерения, предназначенное для проведения координатных измерений в общем случае не менее чем по трем линейным и угловым координатам (координатным перемещениям), причем, по меньшей мере, одна из координат должна быть линейной.

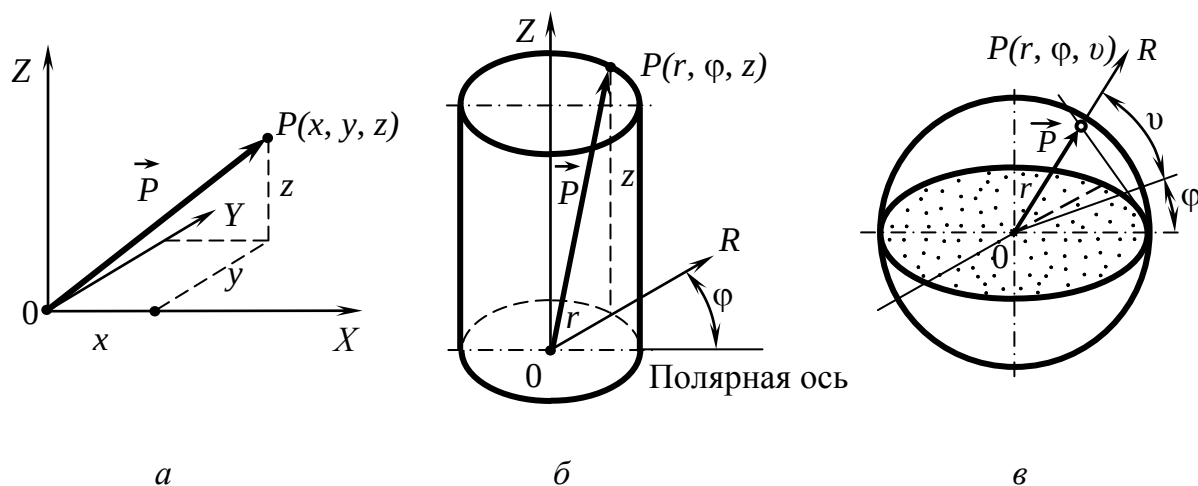


Рис. 10. Системы координат: а – прямоугольная система координат; б – цилиндрическая система координат; в – сферическая система координат; φ – угол поворота (азимут) и проекционный угол в плоскости координат системы; v – угол подъема относительно проекционной плоскости

При координатных измерениях, выполняемых с помощью КИМ, определяют значения координат отдельных точек реальных поверхностей объекта измерения. Измерения производят от единой базы – системы координат воспроизводимой КИМ. При этом с поверхностью объекта измерения соприкасается ощупывающий элемент (сферический измерительный наконечник датчика касания или лазерный сканер), по координатам положения которого получают числовую модель объекта измерения или его отдельных элементов. С помощью компьютера и программного обеспечения, входящих в состав КИМ и

позволяющих выполнить отдельные математические процедуры [4], определяют отклонения размеров, формы и расположения поверхностей и линий, а также суммарные отклонения формы и расположения элементов объекта измерений.

Многие производители универсальных КИМ предлагают в качестве опций программное обеспечение для контроля ЗК. Широкое распространение таких измерений ограничивается двумя причинами: высокой стоимостью универсальных КИМ и отсутствием в России стандартизированной методики расчета параметров ЗК по результатам координатных измерений.

Необходимость такой методики обусловлена следующими обстоятельствами [2, 4, 12]:

- в соответствии с ГОСТ 1643 нормы точности ЗК делятся на четыре группы, что позволяет учесть условия работы той или иной передачи;
- каждая группа включает в себя несколько комплексов контролируемых показателей, которые являются равноправными;
- в отличие от ГОСТ 1643 в международном стандарте ISO 1328 (части 1 и 2) и национальных стандартах большинства других стран нет деления норм точности на группы, а приведены обязательные для контроля поэлементные и комплексные параметры точности ЗК;
- прилагаемые к КИМ методики координатных измерений разработаны для реализации требований стандартов ISO.

В ОАО «ЧелябНИИконтроль» для определения параметров ЗК, установленных ГОСТ 1643, с помощью координатного метода измерений разработали типовые методики, основанные на положениях

указанного государственного стандарта, стандартов *ISO* и результатах научно-исследовательских работ этого предприятия [12]. Так стратегия измерений насадных ЗК включает в себя математическое базирование (определение системы координат ЗК по базовым поверхностям) и определение заданного массива координат точек на боковых эвольвентных поверхностях зубьев.

В соответствии с разработанной методикой у таких ЗК выбирают минимум четыре равномерно распределенных по окружности зуба. На левой и правой боковой поверхности этих зубьев измеряется массив координат точек, расположенных в виде креста (рис. 11). В зависимости от типа измерительной головки применяют стратегию поточечных измерений (см. рис. 11, *а*) или циклы сканирования (см. рис. 11, *б*). Отклонение профиля эвольвенты контролируется в среднем сечении (кривая 1 на рис. 11, *б*), отклонение направления контактной линии зуба измеряется вдоль линии пересечения боковой поверхности с расчетной поверхностью делительного цилиндра (кривая 2 на рис. 11, *б*).

На левой и правой боковых сторонах остальных зубьев измеряются координаты одной точки в месте теоретического пересечения центрального сечения и контактной линии (см. рис. 11). По результатам таких координатных измерений могут быть определены основные параметры ЗК (рис. 12).

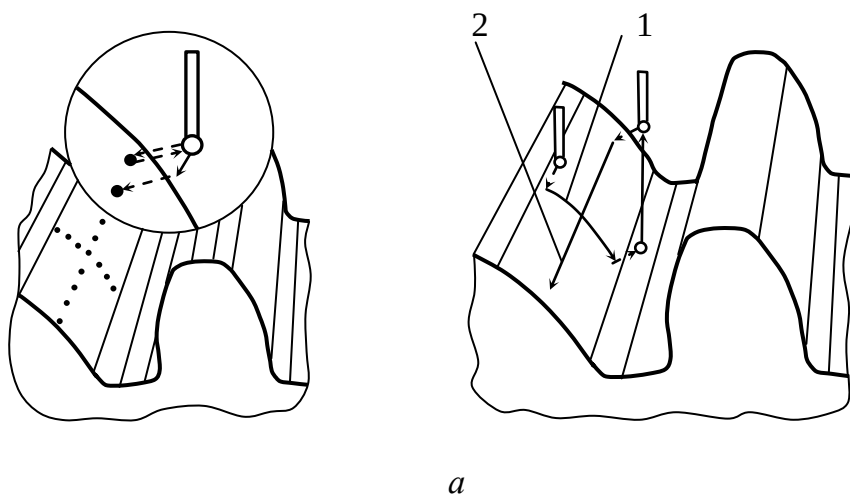


Рис. 11. Стратегии измерения боковых поверхностей зубьев:
а – поточечные измерения; *б* – циклы сканирования;
 1 – в среднем сечении; 2 – вдоль боковой поверхности зуба

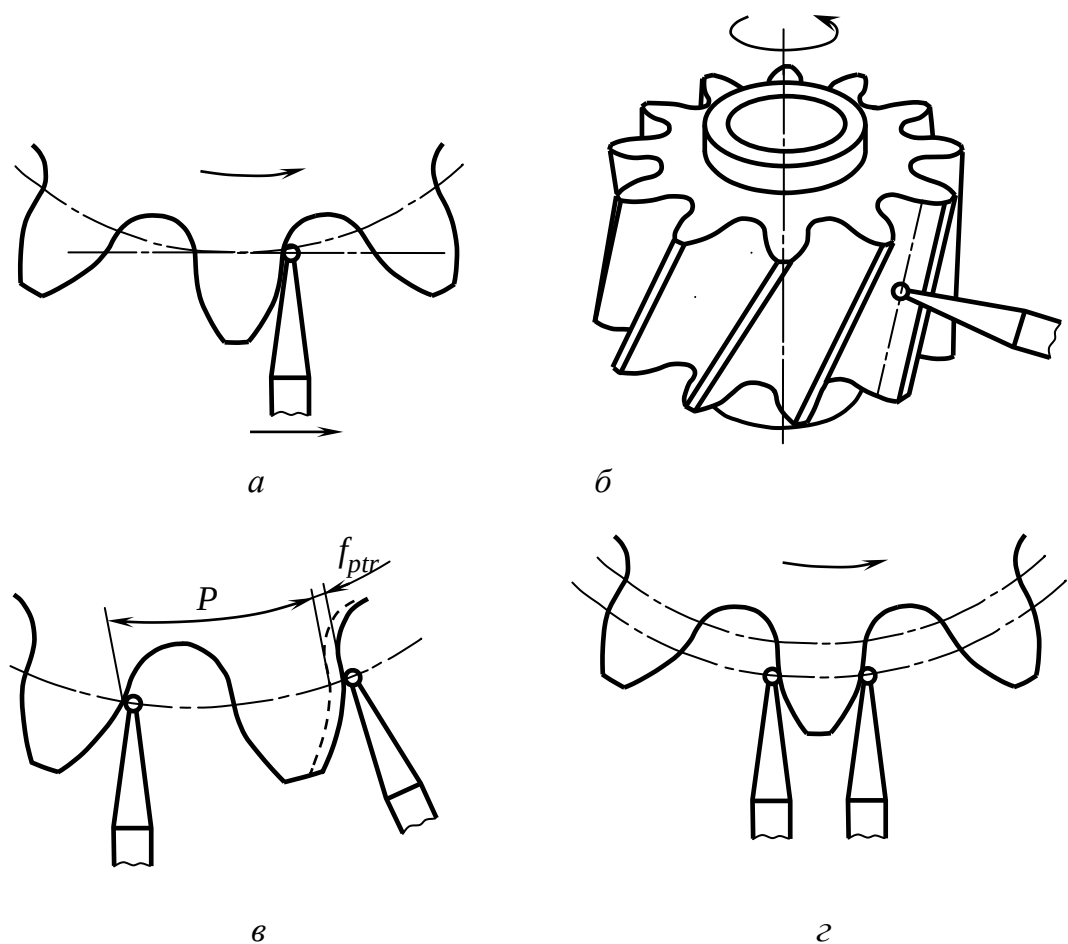


Рис. 12. Определение показателей точности ЗК по результатам измерения координат точек боковых поверхностей:
а – отклонения профиля зуба; *б* – отклонения направления зуба;
в – отклонения осевого шага; *г* – отклонения толщины зуба

Измерение координат массива точек в виде «сетки» на правой и левой поверхности каждого зуба требует очень больших затрат времени. Такие измерения выполняют обычно при наладке и подналадке прецизионного оборудования, например шлифовальных станков.

Разработанные в ОАО «ЧелябНИИконтроль» методики координатных измерений реализуются при измерении на четырехкоординатных измерительных системах типа НИК-483 и НИИК-485.

2.3. Система контроля при производстве зубчатых колес и передач

Система контроля^{*)} при производстве ЗК включает *производственный* (текущий) и *приемочный* (окончательный) контроль [3, 8, 10].

С точки зрения цели и времени проведения операции производственного контроля можно разделить на три вида.

Технологический контроль – контроль первых заготовок ЗК с целью настройки технологического оборудования. Контроль производится точными СИ, в большинстве случаев малопроизводительными.

Активный контроль – контроль заготовки в процессе выполнения технологической операции с целью управления точностью обработки (например, осуществления осевого или радиального смещения инструмента при его износе). Активный контроль осуществляется автоматически с использованием адаптивных (самонастраивающихся) систем управления процессом обработки.

^{*)} В этом разделе под контролем понимают процедуры измерения и собственно контроля.

Операционный контроль – контроль показателей точности час-
тично обработанной заготовки ЗК после выполнения промежуточной
технологической операции, например, измерения смещения исходно-
го контура или длины общей нормали ЗК после зубонарезания перед
шевингованием. Как правило, это выборочный контроль, частота
которого зависит от стабильности операций технологического про-
цесса изготовления ЗК. Операционный контроль осуществляет опера-
тор или наладчик непосредственно на производственном участке с
использованием простейших быстродействующих приборов.

Целью **приемочного контроля** ЗК и ЗП является проверка соот-
ветствия основных функциональных показателей, проявляющихся
при работе передачи, требованиям, определяемым ее служебным на-
значением. Для наиболее ответственных передач при приемочном
контроле решают задачу о подборе зубчатых пар, обеспечивающих
заданные эксплуатационные показатели передачи. Приемочный кон-
троль ЗК является сплошным.

В последние годы для условий крупносерийного и массового
производства ЗК созданы высокопроизводительные полуавтоматиче-
ские и автоматические приборы и автоматические линии для одно-
временного контроля нескольких показателей точности ЗП с после-
дующим подбором пар ЗК с целью повышения качества работы
передачи.

При приемочном контроле ЗК рекомендуется измерительные ба-
зы совмещать с конструкторскими, за которые принимают поверхно-
сти, определяющие положение ЗК в собранном узле или в механизме.
Для этого при контроле в качестве измерительных баз принимают оси

посадочных отверстий ЗК или опорных шеек вал-шестерни и их опорные торцы. Следует иметь в виду, что все нормы и допуски в ГОСТ 1643 даны относительно рабочей оси, вокруг которой вращается ЗК в собранной передаче.

При технологическом контроле измерения ЗК следует производить непосредственно на зуборезном станке, т. е. не снимая колесо со станка, а измерительные базы следует совмещать с технологическими.

Контроль цилиндрических ЗК производят с помощью специальных и универсальных СИ, перечень которых приведен в приложении 1 (табл. П.1).

3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

3.1. Лабораторная работа № 1

Измерение показателей точности зубчатых колес на универсальном приборе ЗИП-1

Цель работы: изучение методики и техники измерения показателей точности ЗК на универсальном приборе ЗИП-1.

Задание: измерить радиальное биение зубчатого венца, колебание и отклонение длины общей нормали, разность шагов и дать заключение о годности ЗК (по указанию преподавателя измеряют показатели точности, входящие в тот или иной комплекс).

Перечень приборов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: универсальный прибор ЗИП-1 типоразмера *S1*, класса точности *B* (ГОСТ 5368); наладки для измерения радиального биения зубчатого венца, длины общей нормали и разности шагов ЗК; индикаторы многооборотный 1 МИГ (ГОСТ 9696) с ценой деления 0,001 мм и часового типа ИЧ10 (ГОСТ 577) с ценой деления 0,01 мм или система измерительная электронная мод. 276-05; плоскопараллельные концевые меры длины *H2* класса точности 3 (ГОСТ 9038); объект измерения – ЗК (выдает преподаватель).

3.1.1. Контролируемые параметры

В соответствии с ГОСТ 1643 под **радиальным биением зубчатого венца F_{rr}** понимают разность действительных предельных положений исходного контура в пределах ЗК (от его рабочей оси). Ради-

альное биение зубчатого венца является показателем кинематической точности ЗК и может быть измерено на универсальном приборе ЗИП-1, как разность положений измерительного наконечника, выполненного в виде усеченного конуса 1 (рис. 13), соответствующего форме зуба исходной рейки. Радиальное биение зубчатого венца вызывается погрешностью базирования заготовки ЗК при нарезании зубьев (как правило, из-за несовмещения оси посадочного отверстия зубчатого колеса с технологической осью, т. е. осью вращения стола зуборезного станка), а также радиальным биением делительного колеса станка.

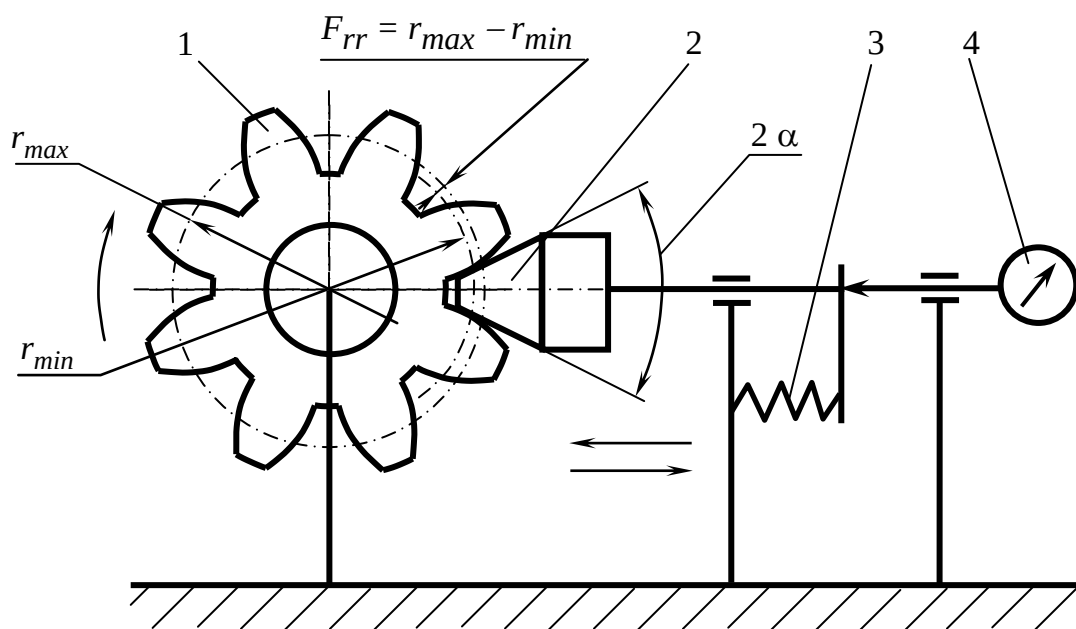


Рис. 13. Измерение радиального биения зубчатого венца:

1 – измеряемое ЗК; 2 – измерительный наконечник в виде усеченного конуса; 3 – пружина; 4 – измерительный прибор или преобразователь

Длиной общей нормали ЗК W называют расстояние между двумя параллельными плоскостями, касательными к двум разноименным активным боковым поверхностям A и B зубьев колеса (рис. 14, a):

$$W = \overline{AB} \approx \widehat{CD}, \quad (6)$$

где AB – касательная к дуге CD основной окружности ЗК радиусом r_b .

Общая нормаль к эвольвентным профилям является одновременно касательной к основной окружности.

Колебание длины общей нормали F_{vWr} представляет собой разность между наибольшей и наименьшей действительными длинами общей нормали ($W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$) в одном и том же ЗК (рис. 14, б).

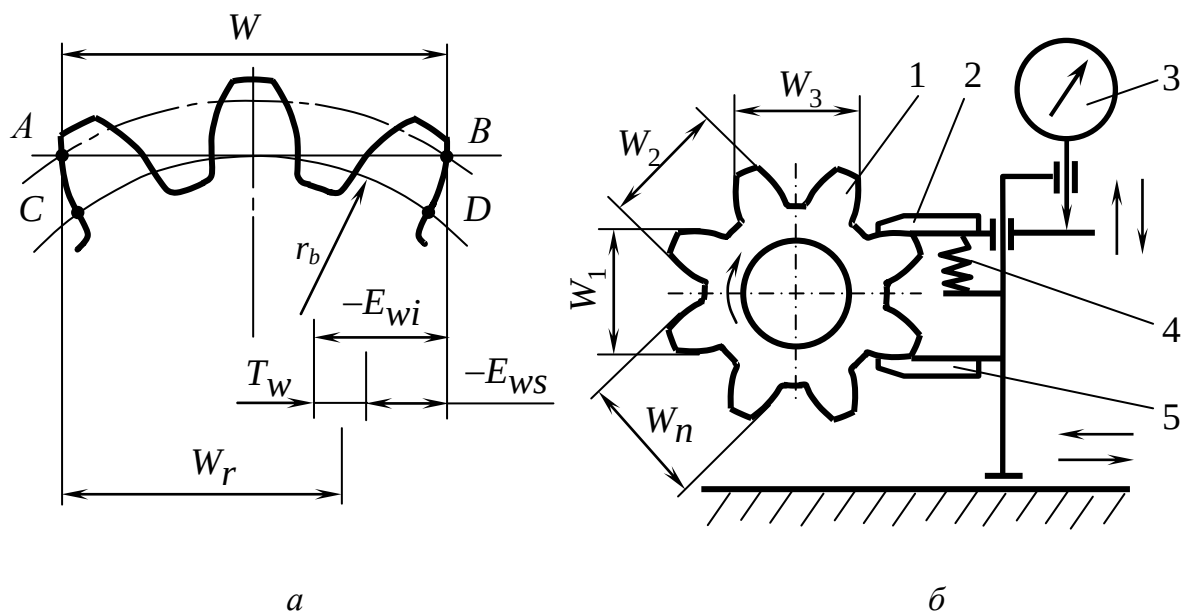


Рис. 14. Измерение отклонения длины общей нормали:

а – схема расположения предельных отклонений длины общей нормали;

б – схема измерения длины общей нормали; 1 – измеряемое ЗК;

2 – подвижный измерительный наконечник; 3 – измерительный прибор или преобразователь; 4 – пружина; 5 – неподвижный измерительный наконечник

Колебание длины общей нормали ЗК зависит от погрешности кинематической цепи деления зубообрабатывающего станка.

Номинальное значение длины общей нормали W для прямозубых колес можно определить по формуле

$$W = m \cdot \cos \alpha [\pi \cdot (n - 0,5) + 2 \xi \operatorname{tg} \alpha + z \cdot \operatorname{inv} \alpha], \quad (7)$$

где m – модуль ЗК, мм; α – угол профиля зуба, равный для эвольвентного зацепления 20° ; z – число зубьев ЗК; n – число зубьев, охватываемых при измерении; ξ – коэффициент коррекции ЗК.

Число зубьев, охватываемых при измерении:

$$n = \frac{\alpha}{\pi} \cdot z + 0,5 - 2 \frac{\xi}{\pi} \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (8)$$

Расчетное число зубьев на длине общей нормали для прямозубых некоррегированных колес с эвольвентным зацеплением можно определить по табл. 3.

3. Число охватываемых зубьев при измерении длины общей нормали

z	11–18	19–27	8–36	37–45	46–54	55–63	64–72	73–81	82–90	91–99
n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

С целью обеспечения в передаче гарантированного бокового зазора в ГОСТ 1643 предусмотрено **наименьшее отклонение длины общей нормали** – E_{Ws} ЗК (для внешнего зацепления) и **допуск на длину общей нормали** T_W (см. рис. 14, а) или **наименьшее отклонение средней длины общей нормали** E_{Wms} ЗК и соответствующий **допуск** T_{Wm} .

Действительную среднюю длину общей нормали W_{mr} определяют по формуле

$$W_{mr} = (W_1 + W_2 + \dots + W_n) / n, \quad (9)$$

где $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ – действительные длины общей нормали

в одном и том же ЗК (см. рис. 14, б); n – число длин общей нормали на ЗК.

Отклонение длины общей нормали ЗК E_{Wr} определяют как разность действительной W_r и номинальной W длины общей нормали (см. рис. 14, а). Аналогично, **отклонение средней длины общей нормали E_{Wmr}** определяют как разность действительной средней W_{mr} и номинальной W длины общей нормали.

Одним из показателей плавности работы ЗК (9–12) степеней точности является **отклонение шага f_{Ptr}** – дискретное значение кинематической погрешности ЗК при его повороте на один номинальный угловой шаг (см. рис. 6, б при $k = 1$). Взамен отклонения шага в качестве показателя плавности работы ЗК можно использовать, согласно ГОСТ 1643, **разность шагов f_{vPtr}** – разность между двумя отклонениями шагов в любых участках ЗК. В ГОСТ 1643 предусмотрен **допуск на разность шагов f_{vPt}** , который равен

$$f_{vPt} = 1,6 \cdot |f_{Pt}|, \quad (10)$$

где $\pm f_{Pt}$ – предельные отклонения шага ЗК.

В ЗК, получаемых методом обката, отклонение шага зависит главным образом от такой же погрешности режущего инструмента (червячной фрезы, долбяка, гребенки), которая переносится на обрабатываемое колесо. При нарезании зубьев по методу копирования отклонение шага зацепления в основном зависит от точности делительного механизма станка. При значительных отклонениях f_{Ptr} и f_{vPtr} вход зубьев в зацепление сопровождается ударами и, следовательно, повышенным шумом.

3.1.2. Устройство и принцип работы прибора ЗИП-1

Прибор предназначен для измерений прямым контактным методом радиального биения, колебаний и отклонений длины общей нормали, разности шагов цилиндрических ЗК с внешними зубьями в цеховых условиях машиностроительного предприятия.

Техническая характеристика прибора ЗИП-1

Модуль, мм	от 1 до 8
Диаметр делительной окружности ЗК при измерении:	
– радиального биения зубчатого венца, мм	от 20 до 260
– длины общей нормали и разности шагов, мм	от 20 до 320
Угол наклона зубьев измеряемых ЗК, град.	± 45
Скорость измерения, зуб/мин	от 10 до 30
Цена деления шкалы отсчетного устройства, мкм	
– индикатора многооборотного 1 МИГ ГОСТ 9696	1
– индикатора часового типа ИЧ10 ГОСТ 577	10
– системы измерительной электронной мод. 276-05	0,5 – 1; 2
Диапазон показаний отсчетного устройства, мм	
– индикатора 1 МИГ	от 0 до 1
– индикатора часового типа ИЧ10	от 0 до 10
– системы измерительной электронной	$\pm 0,015$; $\pm 0,030$; $\pm 0,060$.

Погрешности прибора не должны превышать величин, указанных в табл. 4.

4. Значения погрешностей прибора ЗИП-1 класса В

Измеряемый показатель		Диапазон измерений, мм	Предельная погрешность, мкм
Наименование	Условное обозначение		
Радиальное биение зубчатого венца	F_{rr}	до 100	6
		св. 100 до 250	8
Разность шагов ЗК	f_{vPtr}	до 50	5
		св. 50 до 200	10
Колебание длины общей нормали ЗК при номинальной длине до 50 мм св. 50 до 120	F_{Wmr}	до 50	6
		до 100	8
Отклонение длины общей нормали ЗК при номинальной длине до 50 мм св. 50 до 120	E_{vr}	до 100	7
	E_{Wmr}	до 100	10

Прибор смонтирован на жесткой литой станине 1 (рис. 15).

Измеряемое ЗК 5 непосредственно или на оправке устанавливаются в центрах прибора. Оправку закрепляют перемещением верхнего центра 7 с помощью рукоятки 6 с противовесом. В процессе измерения проверяемое ЗК автоматически поворачивается с помощью каретки 9 с собачкой, установленных на стойке 8. Вручную ЗК поворачивается маховичком 16. Настройку поворота на один угловой шаг осуществляют при помощи маховичка 2. Сменные измерительные наладки 10 крепят на измерительной каретке 11. В вертикальном направлении наладки перемещают при помощи маховичка 12.

Включение прибора, а также пуск и отключение электродвигателя производят соответствующими кнопками, расположенными на панели управления 15. Частоту вращения электродвигателя регулируют ручкой «Обороты» через тиристорный привод, расположенный внутри станины.

Счетчик 3 служит для установки определенного числа зубьев. По окончании процесса измерения счетчик при помощи микровыключателя отключает электродвигатель.

Наладка для измерения радиального биения зубчатого венца

Наладка смонтирована на кронштейне 1 (рис. 16, а), который по посадочному отверстию установлен на измерительной каретке 11 (см. рис. 15). На кронштейне 1 (см. рис. 16, а) закреплен корпус 2, в котором на шариках перемещается шток 9, несущий измерительный наконечник 3. Измерительные наконечники сменные и их подбирают в соответствии с модулем измеряемого ЗК. Крепление наконечника 3 осуществляют винтом 4. Шток 9 несет упорную планку 8, которая в процессе работы контактирует с пяткой измерительного прибора (индикатора часового типа или электронного преобразователя). Измерительный прибор 5 устанавливают в кронштейне 6, который, с целью создания определенного натяга на измерительном приборе, перемещается по направляющим 7.

Наладка для измерения длины общей нормали

Эта наладка смонтирована на кронштейне 1 (рис. 16, в), который устанавливают на измерительной каретке прибора аналогично другим наладкам. На кронштейне 1 по призматическим направляющим пере-

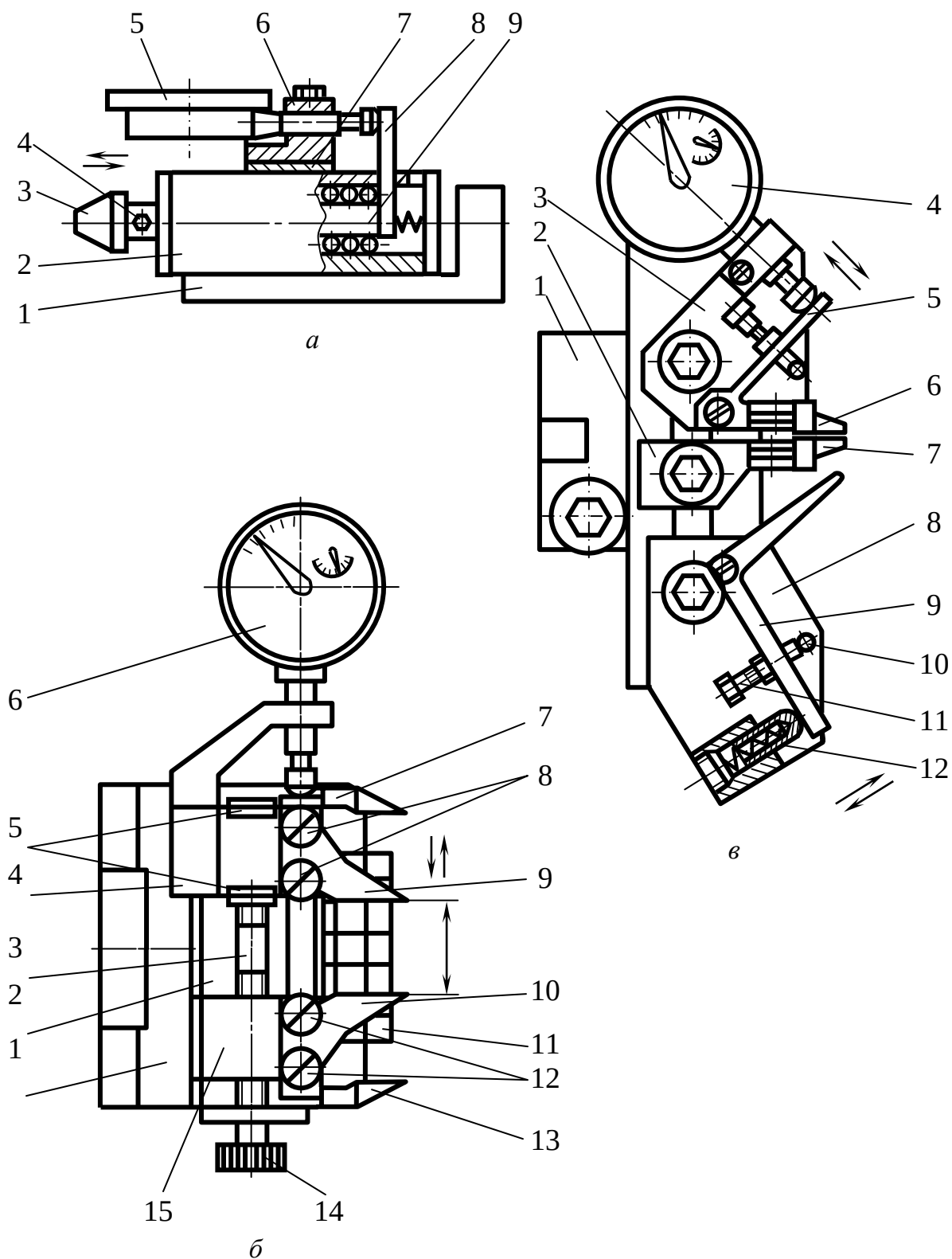


Рис. 16. Настройки к прибору ЗИП-1 для измерения:

a – радиального биения зубчатого венца; *б* – длины общей нормали;

в – разности шагов ЗК

мещается нижняя каретка 2, имеющая возможность совершать колебательное движение относительно своего среднего положения.

Нижняя каретка 2 несет две верхние каретки 4 и 15, перемещающиеся от ходового винта 3 с помощью маховичка 14. Каретка 15 несет сменные наконечники 10 и 13, которые выполняют роль упора и закреплены винтами 12. К каретке 4 на плоских пружинах 5 прикреплен подвес, несущий сменные измерительные наконечники 7 и 9. Наконечники 7 и 9 закреплены на подвесе винтами 8. Колебания наконечника 7 или 9 передаются на измерительный прибор 6 (индикатор часового типа или электронный преобразователь).

В наладке имеется быстросменный настроечный столик 11 для настройки кареток 4 и 15 с измерительными наконечниками 7 и 9 по блоку концевых мер длины на номинальное значение длины общей нормали W .

Наладка для измерения разности шагов

Наладка смонтирована на кронштейне 1 (рис. 16, в), который устанавливают на измерительной каретке прибора аналогично другим наладкам.

На кронштейне 1 установлены и закреплены винтами каретки 2, 3, 8. На каретке 8 смонтирован поджимной рычаг 9, который производит поджим зуба измеряемого ЗК к наконечнику 7 каретки 2 при помощи пружины 12. Ограничение хода рычага 9 осуществляется посредством винта 11 и упора 10. На каретке 2 закреплен упорный наконечник 7, выполняющий роль упора по отношению к измерительному наконечнику 6. Этот наконечник установлен на кронштейне 5, который смонтирован на каретке 3 и контактирует с пяткой измерительного прибора 4.

3.1.3. Порядок выполнения работы

- Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.
- Для указанного преподавателем ЗК в соответствии с его точностью назначают комплексы контролируемых показателей (см. табл. 2). Например, согласно ГОСТ 1643 для контроля ЗК (3–8) степеней точности рекомендуется использовать комплекс из двух показателей кинематической точности: F_{vWr} и F_{rr} ; для контроля ЗК (9–12) степеней точности – F_{rr} .
- Изучают методику измерения контролируемых показателей и конструкцию прибора ЗИП-1.
- Устанавливают непосредственно (например, вал-шестерню) или на оправке ЗК 5 (см. рис. 15) в центрах прибора ЗИП-1.
- Устанавливают и закрепляют на измерительной каретке 11 соответствующую наладку.

Измерение радиального биения

- В шток 9 наладки (см. рис. 16, а) вставляют измерительный наконечник 3, соответствующий модулю измеряемого колеса, и закрепляют винтом 4.
- Настраивают при помощи маховичка 2 (см. рис. 15) поворот ЗК на один угловой шаг.
- Перемещая измерительную каретку 11 (см. рис. 15) по направляющим при помощи маховичка 14, регулируют ввод измерительного наконечника, его поджим, а также запас хода во впадине зуба колеса.

– Устанавливают измерительный прибор в начальное положение с натягом $(0,5 \dots 1,0)$ мм.

– Устанавливают по счетчику 3 число зубьев $(z + 1)$, где z – число зубьев измеряемого ЗК. Для этого необходимо отвести рычаг счетчика «У» и при помощи кнопок набрать нужное число.

– Устанавливают на панели управления 15 удобное число оборотов двигателя (не более 10 зуб/мин).

– Производят ручную пробное измерение радиального биения, вращая ЗК маховиком 16. После пробного измерения маховичок 16 оттягивают на себя до щелчка микровыключателя, тем самым отключают ручное управление.

– Нажимают кнопку «Пуск» пульта управления 15 и производят измерение радиального биения ЗК, фиксируя показания измерительного прибора.

– Определяют действительное значение радиального биения как разность между наибольшим и наименьшим показаниями измерительного прибора.

– Результаты измерения заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 5.

– Дают заключение о годности измеряемого ЗК, для чего сравнивают действительное значение радиального биения F_{rr} с его допуском F_r по ГОСТ 1643 [2, 8].

5. Результаты измерения радиального биения ЗК (показатель кинематической точности)

№ зуба	Показания индикатора или измерительной системы	№ зуба	Показания индикатора или измерительной системы	№ зуба	Показания индикатора или измерительной системы	Радиальное биение, мкм	
						F_{rr}	F_r
1		7		13			
2		8		14			
3		9		15			
4		10		16			
5		11		17			
6		12		18			
Обозначение точности ЗК по ГОСТ 1643:							
Заключение о годности ЗК по показателю F_{rr} :							

Измерение длины общей нормали

– На настроечный столик 11 (см. рис. 16, б) устанавливают блок концевых мер, соответствующий размеру длины общей нормали измеряемого ЗК. Для прямозубых некорригированных ЗК с эвольвентным профилем длину общей нормали определяют по формуле (7), либо по упрощенной формуле

$$W = m [1,476 (2n - 1) + z \cdot 0,014], \quad (11)$$

где n – число зубьев, охватываемых, при измерении; z – число зубьев проверяемого ЗК.

Расчетное число зубьев на длине общей нормали определяют по формуле (8) или для прямозубых некорригированных колес с $\alpha = 20^\circ$ по табл. 3.

– Блок концевых мер вводят до соприкосновения с кромками наконечников 9 и 10 (или 7 и 13) и устанавливают измерительный прибор в начальное положение с натягом (0,5...1,0) мм.

– Снимают столик 11 вместе с блоком концевых мер. Настраивают при помощи маховичка 2 (см. рис. 15) поворот измеряемого ЗК на один угловой шаг.

– Вводят наконечники 9 и 10 (или 7 и 13) (см. рис. 16, б) поворотом маховика 16 (см. рис. 15) в контакт с измеряемым ЗК, как показано на схеме рис. 14, б.

– Устанавливают на счетчике 3 (см. рис. 15) соответствующее число измеряемых зубьев (число измеряемых длин общей нормали) плюс единица. Ручкой «Обороты» на пульте управления 15 устанавливают удобное число оборотов двигателя (не более 10 зуб/мин).

– Производят ручную пробное измерение длины общей нормали, вращая ЗК маховичком 16. После пробного измерения маховичок 16 оттягивают на себя до щелчка микровыключателя, тем самым отключают ручное управление.

– Нажимают кнопку «Пуск» пульта управления 15 и производят измерение длины общей нормали W_r ЗК, фиксируя показания измерительного прибора.

– Результаты измерения заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 6.

– Рассчитывают по формуле (9) действительную среднюю длину общей нормали W_{mr} и колебание длины общей нормали F_{vWr} (см. рис. 14), равное разности между наибольшей $W_{r\max}$ и наименьшей

$W_{r\ min}$ действительными длинами общей нормали для одного и того же ЗК. Результаты измерения и расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 6. Измеренное значение колебания длины общей нормали F_{vWr} должно быть меньше допустимого F_{vW} , найденного по ГОСТ 1643 [2, 8].

**6. Результаты измерения колебания длины общей нормали
(показатель кинематической точности)**

Обозначение точности ЗК по ГОСТ 1643	Длина общей нормали, мм				Колебания длины общей нормали, мкм	
	W_r	W_{mr}	$W_{r\ max}$	$W_{r\ min}$	F_{vWr}	F_{vW}
Заключение о годности ЗК по показателю F_{vWr}						

– Дают заключение о годности измеренного ЗК по нормам кинематической точности.

– Определяют по ГОСТ 1643 [2, 8] для заданной степени точности ЗК и вида бокового зазора наименьшее отклонение длины общей нормали $-E_{Ws}$ и допуск на длину общей нормали $-T_W$ или наименьшее отклонение средней длины общей нормали $-E_{Wms}$ и соответствующий допуск T_{Wm} . Наибольшее отклонение длины общей нормали можно рассчитывать по зависимости $E_{Wi} = |E_{Ws}| + T_W$ (см. рис. 14, а), наибольшее отклонение средней длины общей нормали –

$E_{Wmi} = |E_{Wms}| + T_{Wm}$. Измеренные отклонения E_{Wr} и E_{Wmr} должны находиться в пределах $E_{Ws} \leq E_{Wr} \leq E_{Wi}$ и $E_{Wms} \leq E_{Wmr} \leq E_{Wmi}$.

– Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 7.

**7. Результаты измерения отклонения длины общей нормали
(показатель бокового зазора)**

Обозначение точности ЗК по ГОСТ 1643	Номинальное значение длины общей нормали W , мм	Отклонения длины общей нормали и допуск, мкм			
		E_{Wr} (E_{Wmr})	$-E_{Ws}$ ($-E_{Wms}$)	$-E_{Wi}$ ($-E_{Wmi}$)	T_W (T_{Wm})
Заключение о годности ЗК по показателю E_{Wr} (E_{Wmr}):					

– Дают заключение о годности ЗК по показателям бокового зазора.

Измерение разности шагов

– В гнезда каретки 2 (см. рис. 16, в) и кронштейна 5 вставляют наконечники 7 и 6, их разворотом добиваются разновысотности рабочих поверхностей не более 0,5 мм. Наконечники закрепляют в этом положении. При измерении ЗК с модулем от 1 до 3 мм наконечник 7 устанавливают с компенсационным кольцом.

– При помощи маховичка 2 (см. рис. 15) настраивают прибор для поворота измеряемого ЗК на один угловой шаг.

– Устанавливают измерительный прибор 4 (см. рис. 16, б) в захват каретки 3. Перемещая измерительный прибор в осевом направ-

лении, добиваются в начальном положении натяга $(0,5 \dots 1,0)$ мм.

- Вручную при помощи маховичка 16 (см. рис. 15) проверяют надежность подвода каретки 11 с наладкой в измерительную позицию.

- Устанавливают на счетчике 3 число зубьев $(z + 1)$, где z – число зубьев измеряемого ЗК. Для этого необходимо отвести рычаг счетчика «У» и при помощи кнопок набрать нужное число.

- Устанавливают на панели управления прибора 15 ручкой «Обороты» удобное для оператора число оборотов двигателя (не более 10 зуб/мин).

- Маховичок 16 оттягивают на себя до щелчка микровыключателя, расположенного внутри станины. Ручное управление в данном случае будет отключено.

- Нажимают на кнопку «Пуск» пульта управления 15 и производят измерение ЗК. Разность шагов f_{vPtr} будет представлять собой разность между наибольшим и наименьшим показаниями измерительного прибора.

- Результаты измерения заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 8.

- По ГОСТ 1643 [2, 8] дают заключение о годности измеряемого ЗК по показателю f_{vPtr} . В стандарте допуск на разность любых шагов f_{vPt} задан в зависимости от допуска отклонения шага f_{Pt} , определяемый по формуле (10).

8. Результаты измерения разности шагов (показатель плавности)

Обозначение точности ЗК по ГОСТ 1643	Отклонение шагов f_{vPtr} , мкм	Допуск, мкм	
		f_{Pt}	f_{vPt}
Заклучение о годности ЗК по показателю f_{vPtr} :			

3.1.4. Контрольные вопросы

1. Сколько степеней точности ЗК установлены ГОСТ 1643 ?
2. Какие нормы точности ЗК и ЗП Вы знаете ?
3. Чем характеризуются нормы бокового зазора ЗП ?
4. Как обозначается точность ЗК в конструкторской документации ?
5. Назовите виды производственного контроля ЗК.
6. Какова цель приемочного контроля ЗК и ЗП ?
7. Для каких ЗП основными являются нормы кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев ?
8. Какие комплексы контролируемых параметров являются предпочтительными ?
9. В каких случаях целесообразно использовать поэлементные показатели точности ЗК ?
10. Какими погрешностями, измеренными на приборе ЗИП-1, характеризуются нормы кинематической точности, плавности работы и бокового зазора ?
11. Что понимают под радиальным биением зубчатого венца ?
12. Назовите основные причины возникновения радиального биения зубчатого венца.

13. Что понимают под колебанием длины общей нормали ЗК ?
14. Назовите основные причины возникновения колебания длины общей нормали ЗК.
15. Что понимают под разностью шагов ЗК ?
16. Назовите основные причины возникновения погрешностей шага ЗК.

3.1.5. Рекомендуемая литература

1. [2, с. 418 – 466]. 2. [5, с. 225 – 245]. 3. [6, с. 177 – 186]. 4. [8, с. 401 – 422].

3.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Измерение показателей точности зубчатых колес на универсальном приборе УЗП-400

Цель работы: изучение методики и техники измерения показателей точности ЗК на универсальном приборе УЗП-400.

Задание: измерить радиальное биение зубчатого венца и колебание длины общей нормали, отклонение шага зацепления, отклонение направления зуба и дать заключение о годности ЗК (по указанию преподавателя измеряют показатели точности, входящие в тот или иной комплекс).

Перечень приборов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: универсальный прибор УЗП-400 типоразмера S1 (ГОСТ 5368); наладки для измерения радиального биения зуб-

чатого венца, отклонения шага зацепления и длины общей нормали; индикатор многооборотный 1 МИГ (ГОСТ 9696) с ценой деления 0,001 мм и индикатор часового типа ИЧ10 (ГОСТ 577) с ценой деления 0,01 мм; плоскопараллельные концевые меры длины $H2$ класса точности 3 (ГОСТ 9038); объект измерения – ЗК (выдает преподаватель).

3.2.1. Контролируемые параметры

Определения основных понятий и причины возникновения радиального биения F_{rr} и колебания длины общей нормали F_{vWr} (показателей кинематической точности) приведены в лабораторной работе № 1 (см. п. 3.1).

Одним из показателей плавности ЗК (9–12) степеней точности является отклонение шага зацепления. **Отклонение шага зацепления** f_{pbr} – разность между действительным и номинальным шагами зацепления (рис. 17). Под **действительным шагом зацепления** P_b понимается кратчайшее расстояние между двумя параллельными плоскостями, касательными к двум одноименным активным боковым поверхностям соседних зубьев ЗК. В ГОСТ 1643 отклонение шага зацепления ограничивается **верхним** «+ f_{pb} » и **нижним** «– f_{pb} » **предельными отклонениями**. Причины возникновения отклонений шага зацепления f_{pbr} те же, что и отклонений шага ЗК f_{ptr} (см. лабораторную работу № 1, п. 3.1).

Износостойкость и долговечность цилиндрических ЗК во многом определяется полнотой контакта сопряженных боковых поверх-

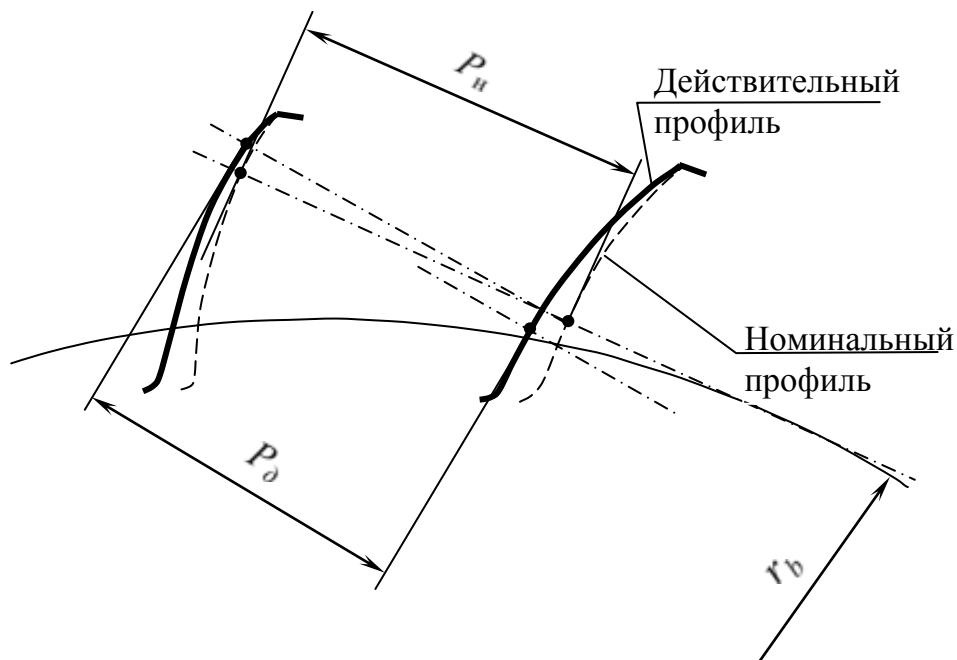


Рис. 17. Отклонение шага зацепления: P_n – номинальный шаг зацепления;
 P_d – действительный шаг зацепления

ностей зубьев колес. Полнота контакта зубьев, как правило, оценивается комплексными показателями – размерами и расположением суммарного или мгновенного пятна контакта зубьев колес в собранной передаче, однако возможна оценка контакта зубьев поэлементными показателями точности ЗК. Для (3–12) степеней точности полноту контакта зубьев оценивают путем измерения **погрешности** направления зуба ЗК (см. табл. 2). Согласно ГОСТ 1643 **погрешность направления зуба** $F_{\beta r}$ – это расстояние между двумя ближайшими друг к другу номинальными делительными линиями зуба в торцовом сечении (рис. 18), между которыми размещается действительная делительная линия зуба, соответствующая его рабочей ширине. Под действительной делительной линией зуба понимается линия пересечения действительной боковой поверхности зуба ЗК делительным цилиндром, ось которого совпадает с рабочей осью (см. п. 2.3).

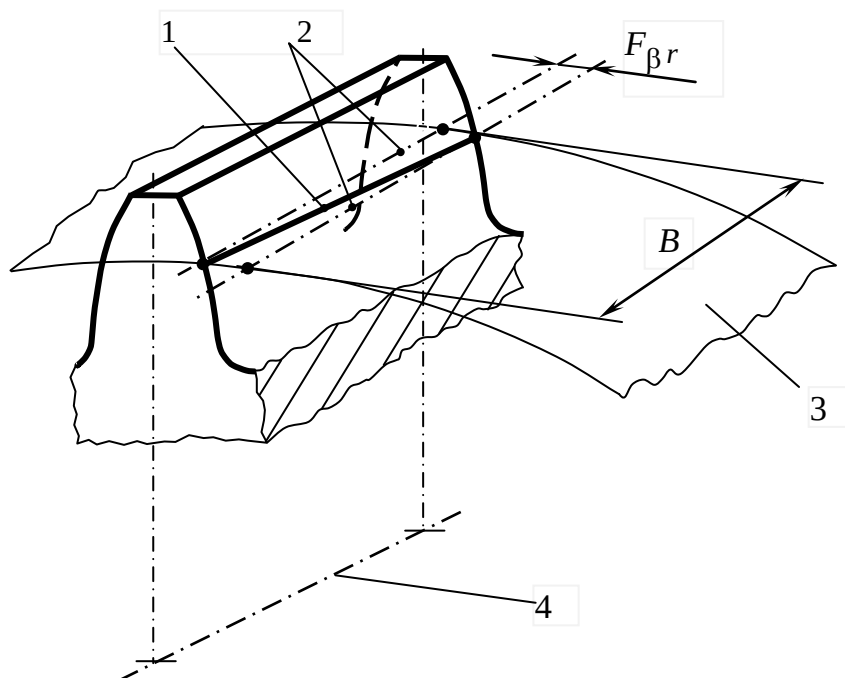


Рис. 18. Отклонение профиля зуба: 1 – действительная делительная линия зуба; 2 – номинальная делительная линия зуба; 3 – делительный цилиндр ЗК; 4 – рабочая ось ЗК; B – ширина зубчатого венца

Источником возникновения погрешностей направления зуба цилиндрических ЗК, нарезаемых методом обката на зубофрезерных или зубодолбежных станках, являются погрешности кинематической цепи станка, погрешности инструмента и его установки на станке, а также радиальное и торцовое биение заготовки ЗК на станке [3, 10].

Показатели F_{rr} , F_{vWr} , F_{pbr} и $F_{\beta r}$ на приборе УЗП-400 определяют прямым контактным методом.

3.2.2. Устройство и принцип работы прибора УЗП-400

Прибор предназначен для измерения погрешностей цилиндрических прямозубых и косозубых колес.

Техническая характеристика

Модуль, мм	от 1 до 10
Диаметр делительной окружности измеряемого ЗК, мм	от 120 до 400
Цена деления шкалы отсчетного устройства, мкм	
– индикатора многооборотного 2 МИГ ГОСТ 9696	2
– индикатора часового типа ИЧ10 ГОСТ 577	10
Диапазон показаний отсчетного устройства, мм	
– индикатора многооборотного 2 МИГ	от 0 до 2
– индикатора часового типа ИЧ10	от 0 до 10

Прибор состоит из станины 1 (рис. 19), по направляющим которой перемещаются бабки 2 и 6. В центрах бабок (крепится непосредственно на оправке) измеряемое ЗК. Центр 3 – неподвижный, центр 5 – подвижный и перемещается с помощью рукоятки 8. Передняя и задняя бабки соединены штоком, позволяющим производить их совместное перемещение.

По направляющим перемещается от руки измерительная бабка 14 и закрепляется в требуемом положении рукояткой 16. По шариковым направляющим бабки 14 перемещается перпендикулярно оси центров каретка 9.

Отвод каретки производят рукояткой 11. В требуемом положении каретка стопорится фиксатором 13. В отверстии каретки вращается валик, на одном конце которого закреплен рычаг 10, а на другом – державка 4. В требуемом положении валик крепят винтом 7. К каретке прикреплена планка 15, в винт 17 которой упирается наконечник измерительного прибора 18, смонтированного на корпусе

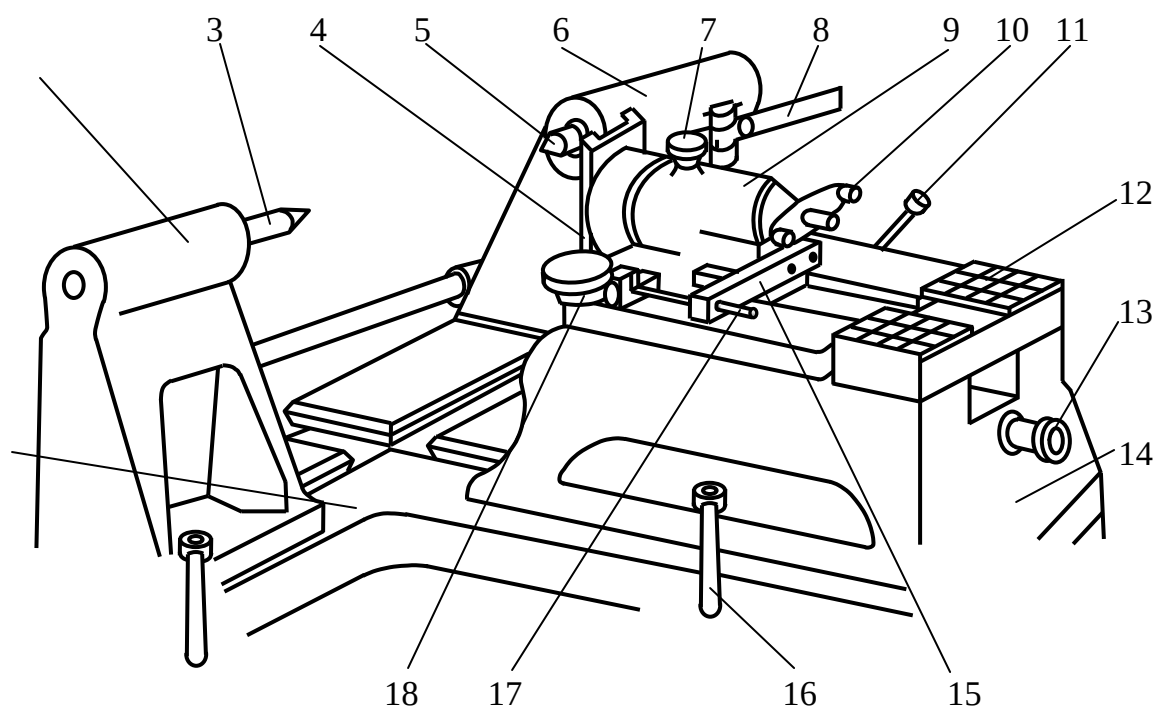


Рис. 19. Общий вид прибора УЗП-400: 1 – станина; 2 и 6 – бабка;

3 – неподвижный центр; 4 – державка; 5 – подвижный центр;
7, 13 и 17 – винт; 8 – рукоятка; 9 – каретка; 10 – рычаг; 12 – столик;
14 – измерительная бабка; 15 – планка; 18 – измерительный прибор

измерительной бабки. В державку вставляют требуемую наладку (измерительное устройство) и поворачивают на номинальный угол наклона зубьев (рис. 20). Прибор снабжен наладками для измерения радиального биения (рис. 21); для измерения отклонения шага зацепления и длины общей нормали (рис. 22); для измерения направления зуба (рис. 23).

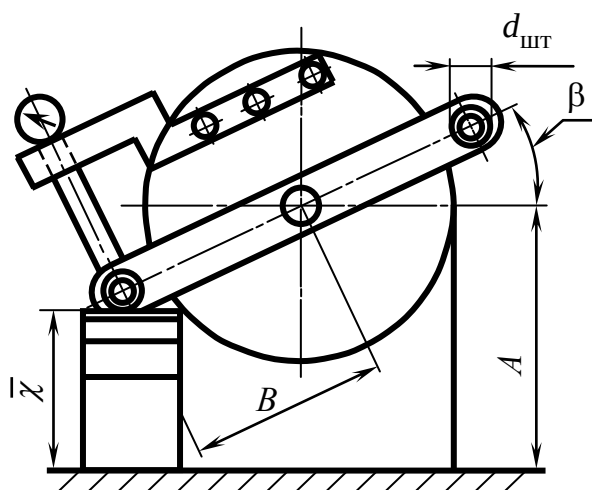


Рис. 20. Схема установки державки

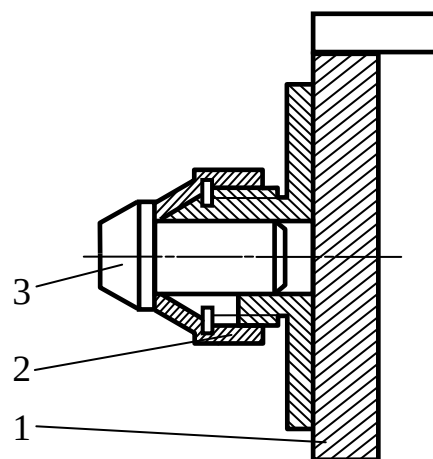


Рис. 21. Наладка к прибору
УЗП-400 для измерения
радиального биения:

1 – корпус наладки; 2 – цанговый
патрон; 3 – измерительный
наконечник

3.2.3. Порядок выполнения работы

- Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.
- Для указанного преподавателем ЗК в соответствии с его точностью назначают комплексы контролируемых показателей (см. табл. 2).
- Изучают методику измерения контролируемых показателей и конструкцию прибора УЗП-400.
- Устанавливают непосредственно (например, вал-шестерню) или на оправке ЗК в центрах 3 и 5 прибора УЗП-400 (см. рис. 19).
- Устанавливают и закрепляют в державке 4 измерительной бабки прибора соответствующую наладку.

Измерение радиального биения

– Поворачивают державку 4 (см. рис. 19) на номинальный угол наклона зубьев. Для этого рукояткой 11 каретку отводят в крайнее заднее положение и стопорят фиксатором 13. На специальный столик 12 устанавливают блок концевых мер, как это показано на рис. 20.

Размер блока подсчитывают по формуле (см. рис. 20)

$$\bar{x} = A - \left(\frac{d_{um}}{2} + B \cdot \sin \beta_0 \right), \quad (11)$$

где A – расстояние от базовой поверхности опорной планки до оси вращения поворотного валика (берется по паспорту прибора), $A = 45,68$ мм; d_{um} – диаметр измерительного штифта (16 мм); B – плечо рычага (берется по паспорту прибора); β_0 – угол наклона винтовой линии зуба колеса на основном цилиндре.

– Державку 4 (см. рис. 19) поворачивают таким образом, чтобы измерительный штифт соприкасался с блоком концевых мер, и закрепляют в этом положении фиксатором 7.

– В цанговом патроне 2 устройства для измерения радиального биения (см. рис. 21) закрепляют измерительный наконечник 3, соответствующий модулю измеряемого ЗК.

– Устанавливают измерительный прибор 18 (см. рис. 19) в начальное положение с натягом (0,5...1,0) мм.

– Вращая ЗК вручную, последовательно вводят наконечник во впадины зубьев с помощью рукоятки 11.

– Величину биения фиксируют по показаниям измерительного прибора 18. Действительное значение радиального биения определяют как разность между наибольшим и наименьшим показаниями

измерительного прибора. Результаты измерения и расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 9.

– Дают заключение о годности измеряемого ЗК, для чего сравнивают действительное значение радиального биения F_{rr} с его допуском F_r по ГОСТ 1643 [2, 8].

9. Результаты измерения радиального биения (показатель кинематической точности)

№ зуба	Показания измеритель- ного прибора	№ зуба	Показания измеритель- ного прибора	№ зуба	Показания измеритель- ного прибора	Радиальное биение, мкм	
						F_{rr}	F_r
1		7		13			
2		8		14			
3		9		15			
4		10		16			
5		11		17			
6		12		18			
Обозначение точности ЗК по ГОСТ 1643:							
Заключение о годности ЗК по показателю F_{rr} :							

Измерение колебания длины общей нормали

– Державку 4 (см. рис. 19) поворачивают на номинальный угол наклона зуба, как описано выше (см. с. 77).

– В призмах 1 и 3 (рис. 22, а) устанавливают измерительные наконечники для проверки длины общей нормали.

– По формуле (7) (см. лабораторную работу № 1) рассчитывают номинальное значение длины общей нормали W .

– Устанавливают измерительный прибор 5 в начальное положение с натягом $(2,0 \dots 3,0)$ мм.

– В призмах 1 и 3 (рис. 22, а) наладки для измерения отклонения шага зацепления и длины общей нормали винтами 8 закрепляют измерительные наконечники для измерения длины общей нормали. Наконечники выбирают в соответствии с модулем измеряемого ЗК и настраивают на размер по блоку концевых мер с помощью винта 7 так, чтобы расстояние между ними было равно длине общей нормали W (см. рис. 22, в). Затем призмы стопорят рукояткой 9.

– Перемещая каретку рукояткой 11 (см. рис. 19), вводят наконечники в зацепление с зубьями проверяемого колеса до тех пор, пока измерительные плоскости наконечников не расположатся по касательным к соответствующим (разноименным) профилям. При этом положении каретку фиксируют упором 13, благодаря чему в последующих измерениях каретка устанавливается в первоначальное положение. Отклонения длины общей нормали фиксируют по измерительному прибору 5 (см. рис. 22, а).

– Результаты измерения заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 10.

– По формуле (7) (см. лабораторную работу № 1, п.3.1) рассчитывают номинальное значение длины общей нормали W .

– Дают заключение о годности измеряемого ЗК, для чего сравнивают действительное значение колебания длины общей нормали F_{vWr} с допуском F_{vW} .

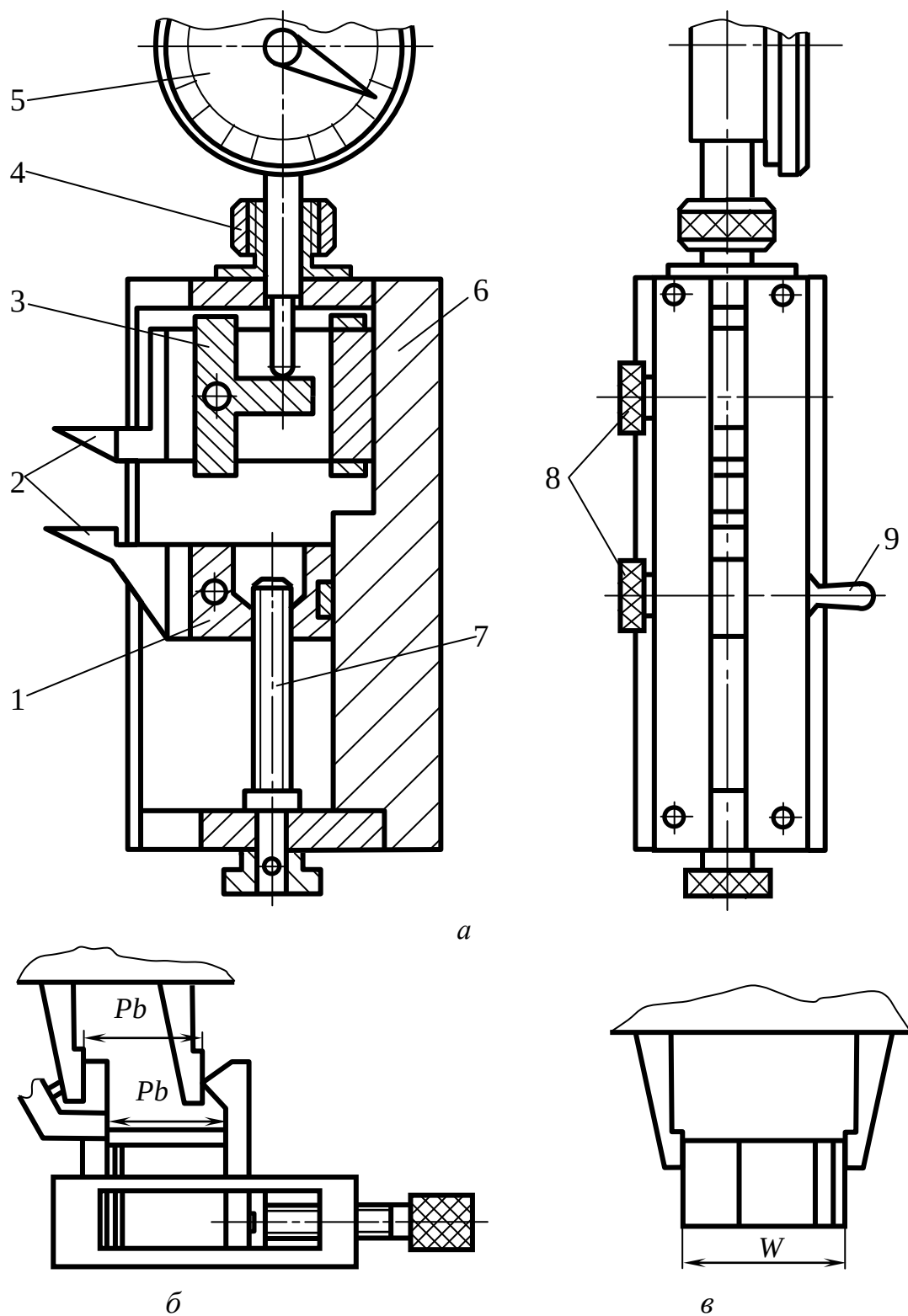


Рис. 22. Наладки к прибору УЗП-400 для измерения отклонений шага и длины общей нормали (а) и схема настройки измерительных наконечников для измерения шага зацепления (б) и отклонения длины общей нормали (в):

1, 3 – призмы; 2 – измерительные наконечники; 4 – гайка; 5 – средство измерения; 6 – корпус наладки; 7 – винт; 8 – стопорные винты; 9 – рукоятка

10. Результаты измерения длины общей нормали
(показатель кинематической точности)

Длина общей нормали, мм			Колебания длины общей нормали, мкм	
W_r	$W_{r\max}$	$W_{r\min}$	F_{vWr}	F_{vW}
Обозначение точности ЗК по ГОСТ 1643:				
Заключение о годности ЗК по показателю F_{vWr} :				

Измерение отклонения шага зацепления

– Державку 4 (см. рис. 19) поворачивают на номинальный угол наклона зуба, как описано выше (см. с. 77).

– В призмах 1 и 3 (см. рис. 22, а) наладки для измерения отклонения шага зацепления и длины общей нормали измерительные наконечники закрепляют винтами 8 для контроля шага зацепления 2. Наконечники выбирают в соответствии с модулем проверяемого колеса и настраивают на размер шага зацепления по струбцине (при $m = (2...4)$ мм), в которую закладывают блок концевых мер (рис. 22, б), или по блоку концевых мер, закладываемому непосредственно между наконечниками (при $m = (5...10)$ мм).

– При настройке по струбцине величина блока концевых мер должна соответствовать шагу зацепления P_b , подсчитываемому по формуле

$$P_b = \pi m_n \cos \alpha_{он}, \quad (12)$$

где P_b – шаг зацепления в нормальном сечении, мм; m_n – модуль в нормальном сечении, мм; $\alpha_{он}$ – угол профиля исходной рейки в нормальном сечении, град.

– При настройке непосредственно по блоку концевых мер величину блока определяют по формуле

$$K = P_b - P, \quad (13)$$

где P – толщина губки наконечника (маркируется на наконечнике).

– Для установки на требуемый размер призму 1 (см. рис. 22, а) перемещают до соприкосновения с блоком концевых мер винтом 7 и стопорят рукояткой 9. Блок убирают, устройство устанавливают в державке 4 (см. рис. 19). Перемещая измерительную каретку при помощи рукоятки 11, вводят наконечник в зацепление с зубьями ЗК таким образом, чтобы их измерительные плоскости располагались по касательным к одноименным профилям. Перемещение каретки ограничивают фиксатором 13, благодаря чему при последующих измерениях каретка устанавливается в первоначальное положение.

– Поворачивая колесо и вводя измерительные наконечники в зацепление с последующими зубьями, по показаниям измерительного прибора 5 (см. рис. 22, а) находят отклонение шага зацепления.

– Измеряют отклонение шага зацепления для трех пар зубьев по правым и левым сторонам профиля. Результаты измерения заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 11.

– Дают заключение о годности измеренного ЗК, для чего сравнивают действительное значение отклонения шага зацепления f_{pbr} с его допуском f_{pb} по ГОСТ 1643 [2, 8].

11. Результаты измерения отклонений шага зацепления (показатель плавности)

Отклонение шага зацепления, мкм					
Профиль зуба 1		Профиль зуба 2		Профиль зуба 3	
Правый	Левый	Правый	Левый	Правый	Левый
Обозначение точности ЗК по ГОСТ 1643					
Отклонение шага зацепления $f_{pbr}(\pm) = \dots$ мкм.					
Заключение о годности ЗК:					

Измерение отклонений направления зуба

– Державку 4 (см. рис. 19) поворачивают на номинальный угол наклона зуба, как описано выше (см. с. 77).

– Перемещая каретку рукояткой 11, вводят измерительный наконечник 7 (см. рис. 23) наладки во впадину зубьев колеса на 2/3 ее глубины. Поворотом проверяемого колеса боковую поверхность зуба вводят в соприкосновение с наконечником.

– Устанавливают измерительный прибор 1 в начальное положение с натягом (2,0...3,0) мм.

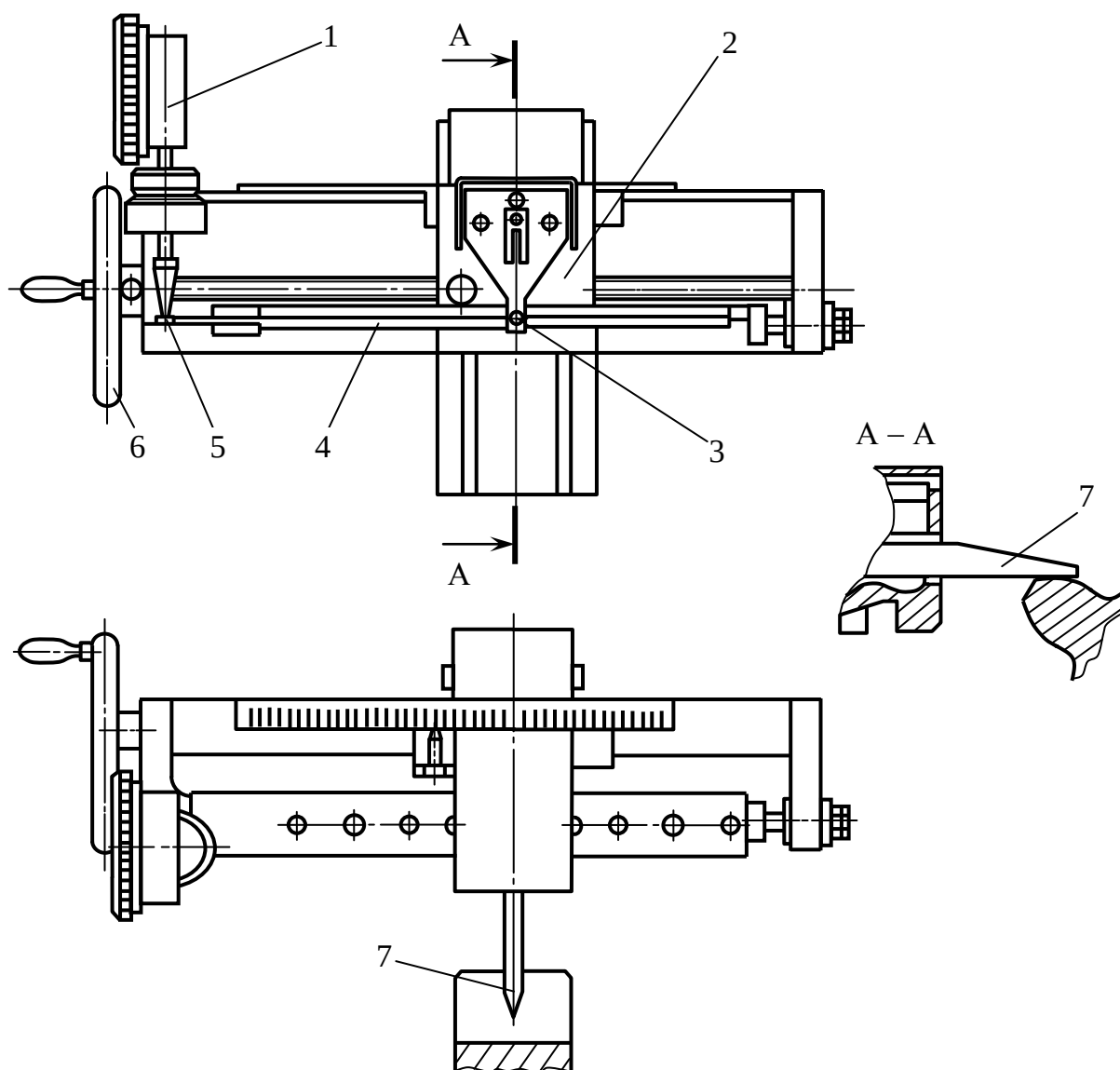


Рис. 23. Наладка к прибору УЗП-400 для измерения отклонения направления зуба: 1 – измерительный прибор (индикатор часового типа); 2 – каретка; 3 – толкатель; 4 – рычаг; 5 – упор; 6 – маховичок; 7 – измерительный наконечник

– Каретку 2 с измерительным наконечником перемещают вдоль зуба вращением маховичка 6. Все колебания измерительного наконечника передаются через толкатель 3 на рычаг 4 и затем через упор 5

на измерительный прибор 1. Равномерно увеличивающиеся или уменьшающиеся показания свидетельствуют об отклонении направления зуба колеса от заданного, колебание же стрелки около начального положения указывает на отклонение от прямолинейности контактной линии.

– Результаты измерений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 12.

– Дают заключение о годности измеряемого ЗК, для чего сравнивают действительное значение отклонения направления зуба $F_{\beta r}$ с его допуском F_{β} по ГОСТ 1643 [2, 8].

12. Результаты измерения отклонений направления зубьев (показатель точности зубьев)

№ зуба	Отсчет по измерительному прибору							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Обозначение точности ЗК по ГОСТ 1643:								
Наибольшее отклонение направления зуба $F_{\beta r} = \dots$								
Заключение о годности ЗК:								

3.2.4. Контрольные вопросы

1 – 9. См. контрольные вопросы № 1 – 9 к лабораторной работе № 1 (см. п. 3.1.4).

10. Какие погрешности ЗК можно измерить на приборе УЗП-400 ?

11. Что понимают под радиальным биением зубчатого венца ?

12. Назовите основные причины возникновения радиального биения зубчатого венца.

13. Что понимают под колебанием длины общей нормали ЗК ?

14. Назовите основные причины возникновения колебаний длины общей нормали ЗК.

15. Что понимают под шагом зацепления ЗК ?

16. Назовите основные причины возникновения погрешностей шага зацепления ЗК.

17. Что понимают под отклонением направления зуба ЗК ?

18. Назовите основные причины возникновения отклонений направления зуба ЗК.

3.2.5. Рекомендуемая литература

1. [2, с. 418 – 466]. 2. [5, с. 225 – 245]. 3. [6, с. 177 – 186]. 4. [8, с. 401 – 422].

3.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Измерение колебания измерительного межосевого расстояния зубчатых колес на межосемере МЦ-160М2

Цель работы: изучение методики и техники измерения колебания измерительного межосевого расстояния ЗК на межосемере МЦ-160М2.

Задание: измерить колебание измерительного межосевого расстояния ЗК за оборот колеса и на одном зубе и дать заключение о годности ЗК.

Перечень приборов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: межосемер мод. МЦ-160М2 типоразмера $S1$, класса точности B (ГОСТ 5368); система измерительная электронная с индуктивным преобразователем; индикатор многооборотный типа 1МИГ (ГОСТ 9696); плоскопараллельные концевые меры длины $H2$ класса точности 3 (ГОСТ 9038); объект измерения – ЗК (выдает пре-подаватель).

3.3.1. Контролируемые показатели

В соответствии с ГОСТ 1643 под **колебанием измерительного межосевого расстояния ЗК за оборот колеса F_{ir}'' и на одном зубе f_{ir}''** понимают разность между наибольшим и наименьшим действительными межосевыми расстояниями a'' при двухпрофильном зацеплении измерительного ЗК с измеряемым колесом при повороте последнего на полный оборот или соответственно на один угловой шаг

(рис. 24). F_{ir}'' – является показателем кинематической точности, а f_{ir}'' – показателем плавности работы ЗК. Указанные погрешности ограничиваются **допусками**, обозначаемыми соответственно F_i'' и f_i'' .

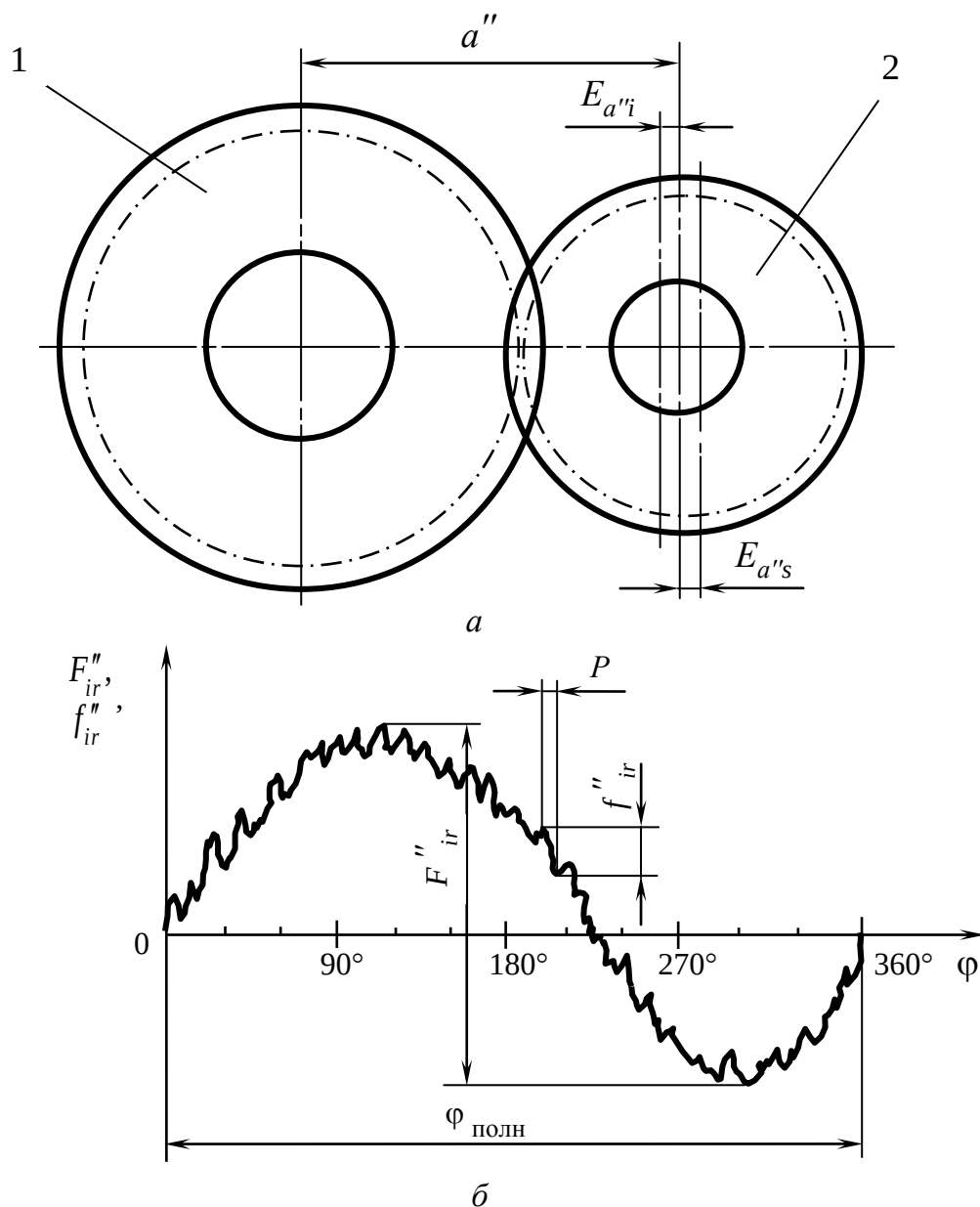


Рис. 24. Схема определения измерительного межосевого расстояния (*a*) и кривая колебаний его (*b*) за оборот колеса F_{ir}'' и на одном зубе f_{ir}'' : 1 и 2 – соответственно измеряемое и измерительное ЗК; $E_{a''i}$ и $E_{a''s}$ – соответственно нижнее и верхнее предельные отклонения межосевого расстояния a'' ; P – один угловой шаг шага ЗК; $\varphi_{\text{полн}}$ – полный оборот измеряемого ЗК

Максимальная циклическая погрешность и, соответственно, f_{ir}'' выявляются при проверке в том случае, когда соблюдается условие:

$$\alpha_{tWm} - \alpha_{tWo} = 360^\circ / 4z_{ДК}, \quad (14)$$

где α_{tWm} – угол зацепления при измерении, градус; α_{tWo} – угол зацепления при механической обработке ЗК, градус; $z_{ДК}$ – число зубьев делительного колеса зубообрабатывающего станка.

В том случае, когда определить углы зацепления при обработке и измерении, а затем сравнить их не представляется возможным, необходимо полученные при измерении значения колебаний за оборот и на одном зубе сравнивать с соответствующими допусками, увеличенными на $0,25 f_{ir}''$.

В соответствии с ГОСТ 9178 под **верхним $E_{a''s}$ и нижним $E_{a''i}$ отклонениями измерительного межосевого расстояния** ЗК понимают разность между наибольшим или соответственно наименьшим измерительным и номинальным межосевыми расстояниями. $E_{a''s}$ и $E_{a''i}$ являются показателями бокового зазора в передаче.

Значения предельных отклонений измерительного межосевого расстояния согласно ГОСТ 1643 для ЗК с внешним зацеплением определяются следующим образом (рис. 25):

$$E_{a''s} = +f_i''; \quad (15)$$

$$E_{a''i} = -T_n, \quad (16)$$

где T_n – допуск на дополнительное смещение исходного контура ЗК.

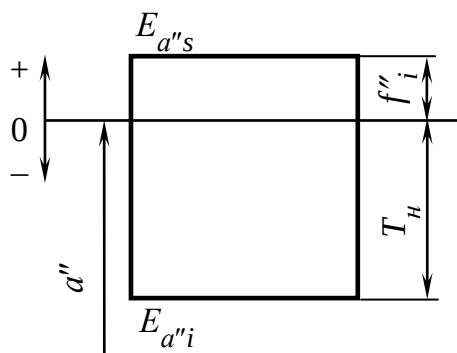


Рис. 25. Схема расположения предельных отклонений измерительного межосевого расстояния a'' :
верхнее — $E_{a''s}$ и нижнее — $E_{a''i}$

Показатели F_{ir}'' , f_{ir}'' , а также отклонения межосевого расстояния f_{ar} на приборе МЦ-160М2 определяются прямым абсолютным контактным методом.

Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот колеса является комплексным показателем кинематической точности и применяется для контроля ЗК (9–12) степеней точности (см. табл. 2). Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот ЗК, изготовленного методом обката, вызывается радиальным биением шпинделя зуборезного станка, неточностью зуборезного инструмента, погрешностью его установки и другими причинами.

Показатель f_{ir}'' — колебание измерительного межосевого расстояния ЗК на одном зубе используют для контроля плавности работы ЗК (5–8) степеней точности. Измерительное межосевое расстояние на одном зубе может изменяться вследствие колебаний положения зуборезного инструмента относительно оси ЗК, колебания шага зацепления сопрягаемых ЗК, погрешностей направления зубьев колес и т. д.

3.3.2. Устройство и принцип работы межосемера МЦ-160М2

Межосемер МЦ-160М2 (рис. 26) предназначен для измерения колебания измерительного межосевого расстояния за оборот колеса и на одном зубе в цеховых условиях на предприятиях машиностроения.

Техническая характеристика межосемера МЦ-160М2

При измерении ЗК внешнего зацепления:

- | | |
|---|-----------------|
| – модуль ЗК, мм | от 0,15 до 1,0; |
| – диаметр делительной окружности ЗК, мм | от 5 до 200; |
| – межосевое расстояние, мм | от 10 до 165. |

При измерении ЗК внутреннего зацепления:

- | | |
|---|----------------|
| – модуль ЗК мм | от 0,3 до 1,0; |
| – диаметр делительной окружности ЗК, мм | от 15 до 150; |
| – максимальный наружный диаметр ЗК, мм | 180. |

При измерении червячных колес:

- | | |
|--|----------------|
| – модуль, мм | от 0,3 до 1,0; |
| – максимальный диаметр червячного колеса, мм | 160. |

Цена деления отсчетного устройства индикатора

многооборотного (1МИГ), мм	0,001.
----------------------------	--------

Диапазон показаний шкалы отсчетного

устройства, мм	от 0 до 1,0.
----------------	--------------

Частота вращения ЗК, об/мин	от 0,6 до 6,0.
-----------------------------	----------------

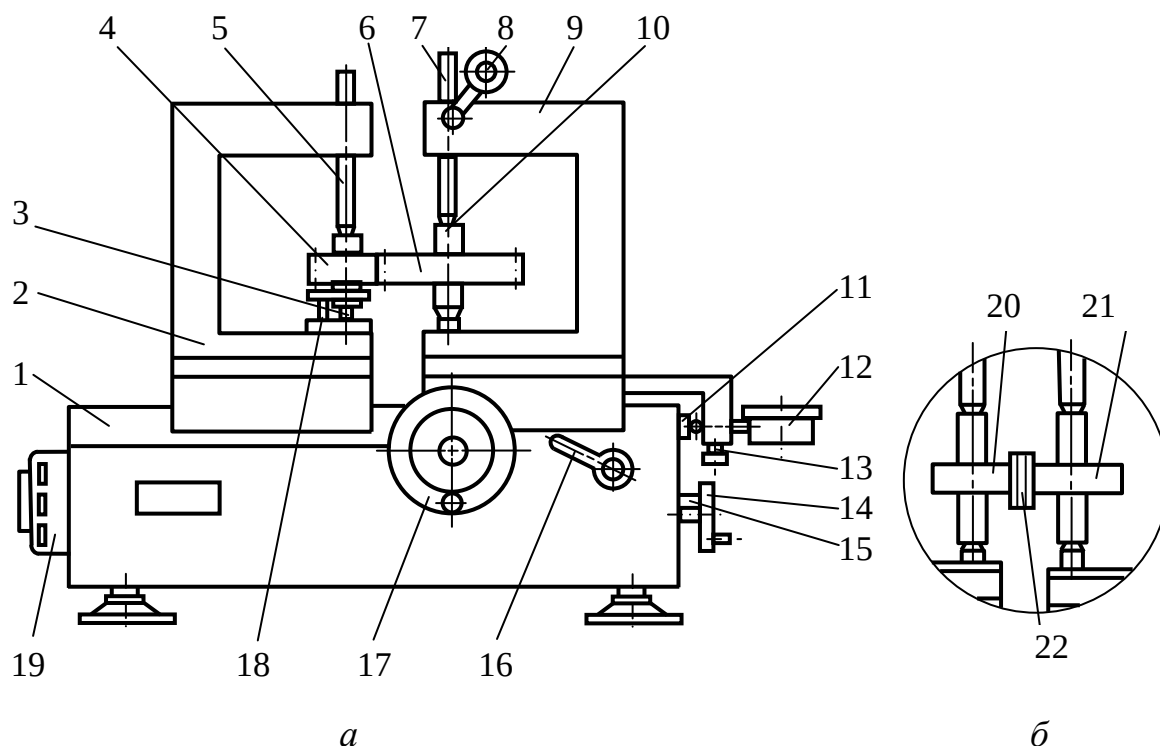


Рис. 26. Общий вид межосемера МЦ - 160М2 (а) и схема настройки прибора по блоку концевых мер (б): 1 – станина; 2 – установочная каретка; 3 – неподвижный центр; 4 – измерительное ЗК; 5, 7, 10 – центры; 6 – измеряемое ЗК; 8, 14, 17 – маховичок; 9 – измерительная каретка; 11, 15 – винт; 12 – измерительный прибор; 13 – кронштейн; 16 – рукоятка; 18 – поводок; 19 – электродвигатель; 20, 21 – аттестованные оправки; 22 – блок концевых мер

Прибор смонтирован на жесткой литой станине 1. Слева на станине расположена установочная каретка 2 с неподвижным 3 и подвижным 5 центрами. Центры 3 и 5 предназначены для установки измерительного ЗК 4. Установочная каретка 2 может перемещаться по направляющим станины с помощью маховичка 17. Передача вращения на оправку с измерительным ЗК 4 осуществляется при помощи поводка 18, который приводится во вращение электродвигателем 19.

Справа на станине на роликовых направляющих установлена измерительная каретка 9, в подвижном 7 и неподвижном 10 центрах

которой устанавливается измеряемое ЗК 6. Перемещение верхнего подвижного центра 7 при установке ЗК 6 осуществляют при помощи маховичка 8. Для обеспечения плавного безззорного зацепления измеряемого 6 и измерительного 4 ЗК каретка 9 перемещается по роликовым направляющим и поджимается рессорой. Усилие поджима регулируется при помощи маховичка 14. Маховичок 13 фиксируется в определенном положении винтом 15.

Для смены измеряемых ЗК при неизменном межосевом расстоянии выполнен механизм арретирования измерительной каретки. Арретирование производится при помощи кулачка поворотом рукоятки 15 на 180° .

Колебания измерительной каретки 9 в процессе работы регистрируют измерительным прибором (индикатором 1МИГ 12 или индуктивным преобразователем), закрепленным в кронштейне 13.

Для настройки измерительной электронной системы с преобразователем установлен винт 11.

3.3.3. Порядок выполнения работы

- Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.
- Изучают методику измерения колебания измерительного межосевого расстояния и конструкцию прибора МЦ-160М2.
- Для измерения отклонений измерительного межосевого расстояния ЗК устанавливают его номинальное значение. Для прямоугольных ЗК межосевое расстояние можно определить по формуле

$$a'' = \frac{(z_k - z_u) \cdot m}{2}, \quad (17)$$

где m – модуль, мм; z_k и z_u – соответственно число зубьев измеряемого и измерительного ЗК.

Установку номинального межосевого расстояния производят по блоку плоскопараллельных концевых мер длины (рис. 26, б), размер h которого равен:

$$h = a'' - \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (18)$$

где d_1 и d_2 – аттестованные диаметры оправок, установленных на приборе вместо измеряемого и измерительного ЗК, мм.

– Зная число зубьев измерительного и контролируемого ЗК, их модуль, а также диаметры аттестованных оправок, определяют по формулам 17 и 18 номинальное межосевое расстояние и величину блока концевых мер.

– В центрах прибора устанавливают аттестованные оправки 20 и 21 (см. рис. 26, б). Установочную каретку 2 (см. рис. 26, а) отводят при помощи маховичка 17 на расстояние, большее, чем размер блока плоскопараллельных концевых мер длины. Устанавливают набранный блок концевых мер 22 между оправками 20 и 21. Подводят установочную каретку 2 таким образом, чтобы при номинальном межосевом расстоянии натяг на измерительной каретке 9 был (0,4–0,6) мм. Величину натяга устанавливают по измерительному прибору 12. Маховичком 14 создают необходимый натяг рессоры (примерно (2–3) мм). Устанавливают стрелку отсчетного устройства 12 в начальное положение.

– Отводят рукояткой 16 измерительную каретку 2 и вынимают блок концевых мер 22 (см. рис. 26, б).

– Вместо оправок устанавливают измеряемое 6 и измерительное 4 ЗК (см. рис. 26, а), рукояткой 16 подводят измерительную каретку 9 в рабочую позицию и производят обкат. Обкат производят с помощью механического привода 19, который включают нажатием кнопки «Пуск» пульта управления. Оптимальную частоту вращения устанавливают с помощью соответствующей ручки на пульте управления.

– По показаниям измерительного прибора определяют колебание измерительного межосевого расстояния за оборот колеса F_{ir}'' и при повороте его на один зуб f_i'' . Обкат и снятие показаний необходимо повторить три раза. Определяют верхнее $E_{a''s}$ и нижнее $E_{a''i}$ отклонения измерительного межосевого расстояния – разность между соответственно наибольшим и наименьшим измерительным межосевым расстоянием при повороте ЗК на один зуб и его номинальным значением. Результаты измерений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 13.

– По ГОСТ 1643 [2, 8] для заданной степени точности измеряемого ЗК определяют допуски f_i'' и T_n и дают заключение о годности ЗК по показателям $F_{ir}'', f_{ir}'', E_{a''s}$ и $E_{a''i}$.

– Результаты измерений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 13.

13. Результаты измерений

Показатель	F_{ir}''	f_{ir}''	$E_{a''s}$ + f_i''	$E_{a''i}$ - T_n
Измеряемое значение, мм			—	—
Допуск или предельные отклонения, мм	—	—		
Степень точности по ГОСТ 1643:				
Заключение о годности ЗК по показателям F_{ir}'' , f_{ir}'' , $E_{a''s}$ и $E_{a''i}$:				

3.3.4. Контрольные вопросы

1— 9. См. контрольные вопросы № 1–9 к лабораторной работе № 1 (см. п. 3.1.4).

10. Какие погрешности ЗК можно измерить на приборе МЦ-160М2 ?

11. К каким кормам точности откосятся колебаний измерительного межосевого расстояния за оборот колеса и на одном зубе ?

12. Как определяют предельные отклонения измерительного межосевого расстояния ?

13. Что понимают под колебанием измерительного межосевого расстояния за оборот колеса и на одном зубе ?

14. Как устанавливают на приборе МЦ-160М2 номинальное межосевое расстояние ?

15. Каким образом реализуется двухпрофильное зацепление на приборе МЦ-160М2 ?

16. Назовите основные причины возникновения колебаний межосевого расстояния за оборот колеса.

17. Назовите основные причины возникновения колебаний межосевого расстояния на одном зубе.

3.3.5. Рекомендуемая литература

1. [2, с. 418 – 443]. 2. [5, с. 225 – 240]. 3. [6, с. 177 – 186]. 4. [8, с. 401 – 422].

3.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Определение бокового зазора зубчатой передачи косвенным методом

Цель работы: ознакомление с методикой расчета гарантированного бокового зазора и привитие навыков определения бокового зазора зубчатой передачи косвенным методом с помощью межосемера МЦ-160М2.

Задание: рассчитать гарантированный боковой зазор зубчатой передачи, определить фактическую величину бокового зазора с помощью межосемера МЦ-160М2 и дать заключение о годности ЗК.

Перечень приборов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: межосемер мод. МЦ-160М2 типоразмера $S1$, класса точности B (ГОСТ 5368); система измерительная электронная с индуктивным преобразователем; индикатор многооборотный 1МИГ (ГОСТ 9696); плоскопараллельные концевые меры длины $H2$ класса точности 3 (ГОСТ 9038); объект измерения – ЗК (выдает преподаватель).

3.4.1. Расчет гарантированного бокового зазора

Для ЗП с регулируемым расположением осей основной нормой бокового зазора передачи является *гарантированный боковой зазор* j_{nmin} . Боковой зазор в передачах, как правило, создается за счет некоторого уменьшения толщины зубьев сопрягаемых колес. Гарантированный, т. е. наименьший из возможных в передаче, боковой зазор между нерабочими профилями зубьев при контакте рабочих профилей должен компенсировать возможное изменение размеров колес, возникающее вследствие нагрева передачи в процессе эксплуатации, обеспечить нормальные условия смазки зубьев, а также компенсировать погрешности изготовления и монтажа. Исходя из изложенного, методика расчета гарантированного бокового зазора и назначения вида сопряжения сводится к следующему [2, 8].

1. Часть бокового зазора, предназначенную для температурной компенсации, определяют по формуле

$$j_{n1} = a (\alpha_1 \Delta t_1 - \alpha_2 \Delta t_2) \cdot 2 \sin \alpha, \quad (19)$$

где a – межосевое расстояние в передаче, мм; α_1 и α_2 – коэффициенты линейного расширения материала ЗК и корпуса соответственно, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; Δt_1 и Δt_2 – отклонение температуры t_1 и t_2 соответственно ЗК и корпуса от нормальной (20°C), $\Delta t_1 = t_1 - 20^{\circ}$; $\Delta t_2 = t_2 - 20^{\circ}$; α – угол профиля зуба, для эвольвентного зацепления равный 20° .

2. Величину бокового зазора, обеспечивающую нормальные условия смазки, можно определить по формуле

$$j_{n2} = (0,01 \dots 0,03) m, \quad (20)$$

где m – нормальный модуль, мм. Ориентировочно значение $0,01m$ относится к тихоходным, а $0,03m$ — к особо высокоскоростным зубчатым передачам.

3. По ГОСТ 1643 [2, 8] следует выбрать вид сопряжения, обеспечивающий гарантированный боковой зазор, равный или несколько больший суммы найденных частей:

$$j_{nmin} \geq (j_{n1} + j_{n2}). \quad (21)$$

Для кинематических передач высокой точности определяют свободный угловой поворот ЗК (в секундах) в пределах бокового зазора, причем в этих случаях следует определить величину наибольшего бокового зазора j_{nmax} .

Наибольший свободный угловой поворот колеса

$$\Delta \varphi_{max} = \frac{2 j_{nmax}}{m \cdot z \cdot \cos \alpha}. \quad (22)$$

Наибольший боковой зазор государственным стандартом не нормируется. Он может быть подсчитан по приближенной формуле

$$j_{nmax} = j_{nmin} + (T_{H1} + T_{H2} + 2 f_a) 2 \sin \alpha, \quad (23)$$

где T_{H1} и T_{H2} – допуск на дополнительное смещение исходного контура контактирующие ЗК, мм; f_a – половина полного допуска на межосевое расстояние у корпуса передачи, мм.

3.4.2. Порядок выполнения работы

– Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.

– Изучают конструкцию прибора (см. лабораторную работу № 3, п. 3.3.2).

– Используя исходные данные, выданные преподавателем, по формулам (19) и (20) рассчитывают составляющие бокового зазора, необходимые для температурной компенсации j_{n1} и для размещения слоя смазки в передаче j_{n2} . По ГОСТ 1643 [2, 8] выбирают вид сопряжения и соответствующий ему гарантированный боковой зазор j_{nmin} . При этом должно быть выполнено условие (21).

– По формуле (23) рассчитывают наибольший боковой зазор j_{nmax} .

– Используя методику, изложенную в лабораторной работе № 3 (см. п. 3.1), определяют верхнее отклонение измерительного межосевого расстояния $E_{a''s}$ – разность между наибольшим измерительным межосевым расстоянием и его номинальным значением, равным первоначальному межосевому расстоянию между измеряемым и измерительным ЗК. Действительные значения бокового зазора рассчитывают по формуле (рис. 27)

$$j_n = 2 E_{a''s} \cdot \sin \alpha. \quad (24)$$

– Результаты расчетов и измерений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 14.

– Дают заключение о годности измеренного ЗК по показателю j_n .

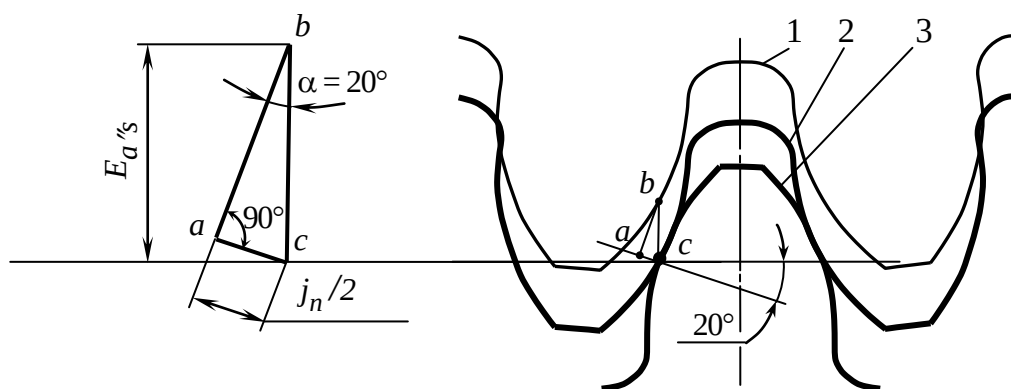


Рис. 27. Боковой зазор j_n в передаче: 1– номинальное положение измеряемого ЗК; 2 – действительное положение измеряемого ЗК; 3 – действительное положение измерительного ЗК

14. Результаты расчетов и измерений

Показатель	$E_{a's}$	j_n	T_n	j_{nmin}	j_{nmax}
Расчетное значение, мм	—	—			
Значение по ГОСТ 1643, мм	—			—	
Действительное значение, мм		—		—	
Заключение о годности ЗК по показателю j_n :					

3.4.3. Контрольные вопросы

1–9. См. контрольные вопросы № 1–9 к лабораторной работе № 1 (см. п. 3.1.4).

10. Для чего необходим в ЗП гарантированный боковой зазор ?

11. Нормируется ли ГОСТ 1643 наибольший боковой зазор ?

12. Как определяют с помощью межосемера МЦ-160М2 гарантированный боковой зазор ?

13. Как рассчитывают гарантированный боковой зазор ?

14. Для каких передач в качестве показателя используется гарантированный боковой зазор ?

15. Можно ли измерить боковой зазор в собранной ЗП ?

3.4.4. Рекомендуемая литература

1. [2, с. 449 – 466]. 2. [5, с. 225 – 240]. 3. [6, с. 177 – 186]. 4. [8, с. 432 – 447].

3.5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Измерение отклонения профиля зуба на индивидуально-дисковом эвольвентомере

Цель работы: изучение методики и техники измерения отклонения профиля зуба с помощью индивидуально-дискового эвольвентомера.

Задание: измерить отклонение профиля зуба цилиндрического ЗК и дать заключение о его годности.

Перечень приборов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: индивидуально-дисковый эвольвентомер завода МИЗ типоразмера S1 (ГОСТ 5368); индикатор часового типа ИЧ10 (ГОСТ 577); диск-шаблон; диск обката; плоскопараллельные концевые меры длины $H2$ класса точности 3 (ГОСТ 9038); объект измерения – ЗК (выдает преподаватель).

3.5.1. Описание метода измерения

Погрешность профиля зуба f_{fr} используется для оценки плавности работы ЗК совместно с отклонением шага зацепления f_{pbr} , f_{fr} и f_{pbr} образуют третий комплекс контролируемых показателей (см. табл. 2).

Погрешность профиля зуба f_{fr} – это расстояние по нормали между двумя ближайшими друг к другу номинальными торцовыми профилями зуба (рис. 28, *а*), между которыми размещается действительный торцовый активный профиль зуба ЗК. Активным называется тот участок профиля, на котором происходит фактическое соприкосновение сопрягаемых зубьев.

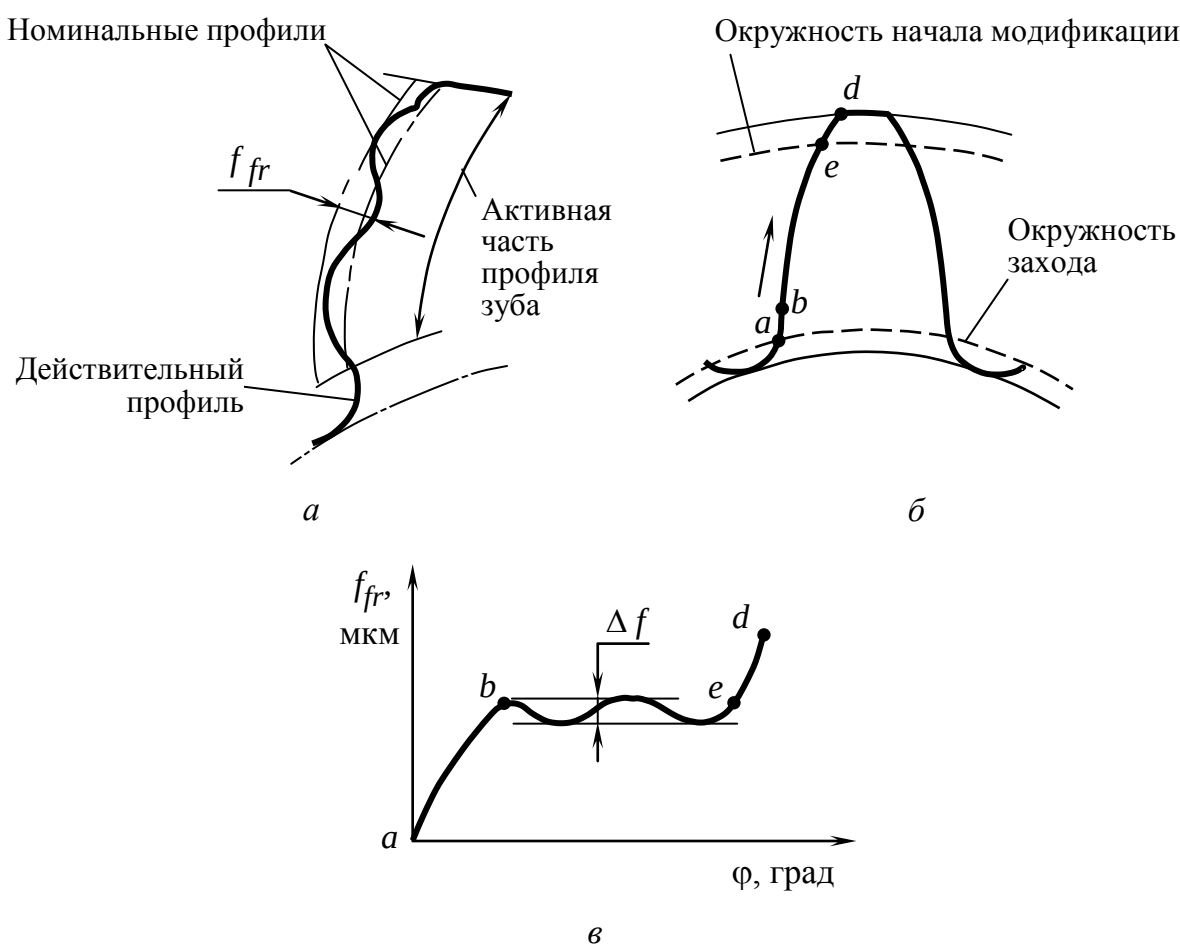


Рис. 28. Схемы к определению погрешности профиля зуба:

а – нормальное сечение зуба; *б* – активный участок профиля зуба, подлежащий контролю на эвольвентомере; *в* – график отклонений профиля зуба

Профиль зуба на эвольвентомере следует измерять на протяжении активного участка *ae* профиля (рис, 28, *б*) от ножки зуба к его

головке, т. е. от окружности захода до окружности начала модификации головки зуба – фланкирования (участок ed). Окружность захода – это окружность, ограничивающая наибольшую глубину захода зубьев парного колеса во впадину проверяемого колеса. Если у основания имеется переходная кривая ab , утолщающая зуб, то начало эвольвентного участка соответствует точке b . Следовательно, оценку погрешности профиля зуба следует вести на участке be .

Анализ результатов измерений наиболее удобно производить по графику отклонений профиля (рис. 28, в): по оси абсцисс в выбранном масштабе откладывают углы развернутости, соответствующие перемещению наконечника прибора по измеряемому профилю зуба колеса, а по оси ординат, также в выбранном масштабе, откладывают отклонения профиля от теоретической эвольвенты Δf .

Погрешности профиля зуба вызывают неравномерность движения ЗК, дополнительные динамические нагрузки, а также уменьшают поверхность контакта зубьев.

При нарезании ЗК методом обката погрешности профиля зуба зависят от точности кинематической цепи станка, точности изготовления инструмента и радиального биения инструмента и заготовки.

3.5.2. Устройство и принцип работы индивидуального дискового эвольвентомера

Индивидуально-дисковый эвольвентомер завода МИЗ предназначен для измерения отклонений действительного профиля зуба от теоретического эвольвентного профиля.

Техническая характеристика индивидуально-дискового
эвольвентомера

Диаметр измеряемых ЗК, мм	60–240.
Направление зубьев ЗК	прямое и косое.
Предельная погрешность прибора, мм	$\pm 0,003$.

Прибор (рис. 29) смонтирован на станине 11, по взаимно перпендикулярным направляющим которой перемещаются каретки – продольная 14 и поперечная 17. Продольная каретка несет на себе вращающуюся в шариковых подшипниках оправку 7, на которую насаживается диск обката 10 (диаметр которого равен диаметру основной окружности проверяемого колеса), и измеряемое ЗК, посаженное на переходную втулку с коническим отверстием.

На поперечной каретке помещена линейка обката 15, которая может перемещаться параллельно направляющим каретки с помощью винта 16. В вертикальных центрах поперечной каретки вращается ось, на которой укрепляются в требуемом положении измерительные рычаги 3. Верхний рычаг имеет на конце кромочный измерительный наконечник 5, нижний рычаг соприкасается с измерительным прибором 2, укрепленным на поперечной каретке.

Если измерительный наконечник установить в плоскости рабочей поверхности линейки обката, диск прижать к линейке, а затем в направлении, касательном к диаметру диска, перемещать поперечную каретку, возникающая между линейкой и диском сила трения заставит диск вместе с изделием вращаться вокруг своей оси. Контактная точка измерительного наконечника будет перемещаться относительно диска по эвольвенте окружности, диаметр которой равен наружному диаметру диска обката.

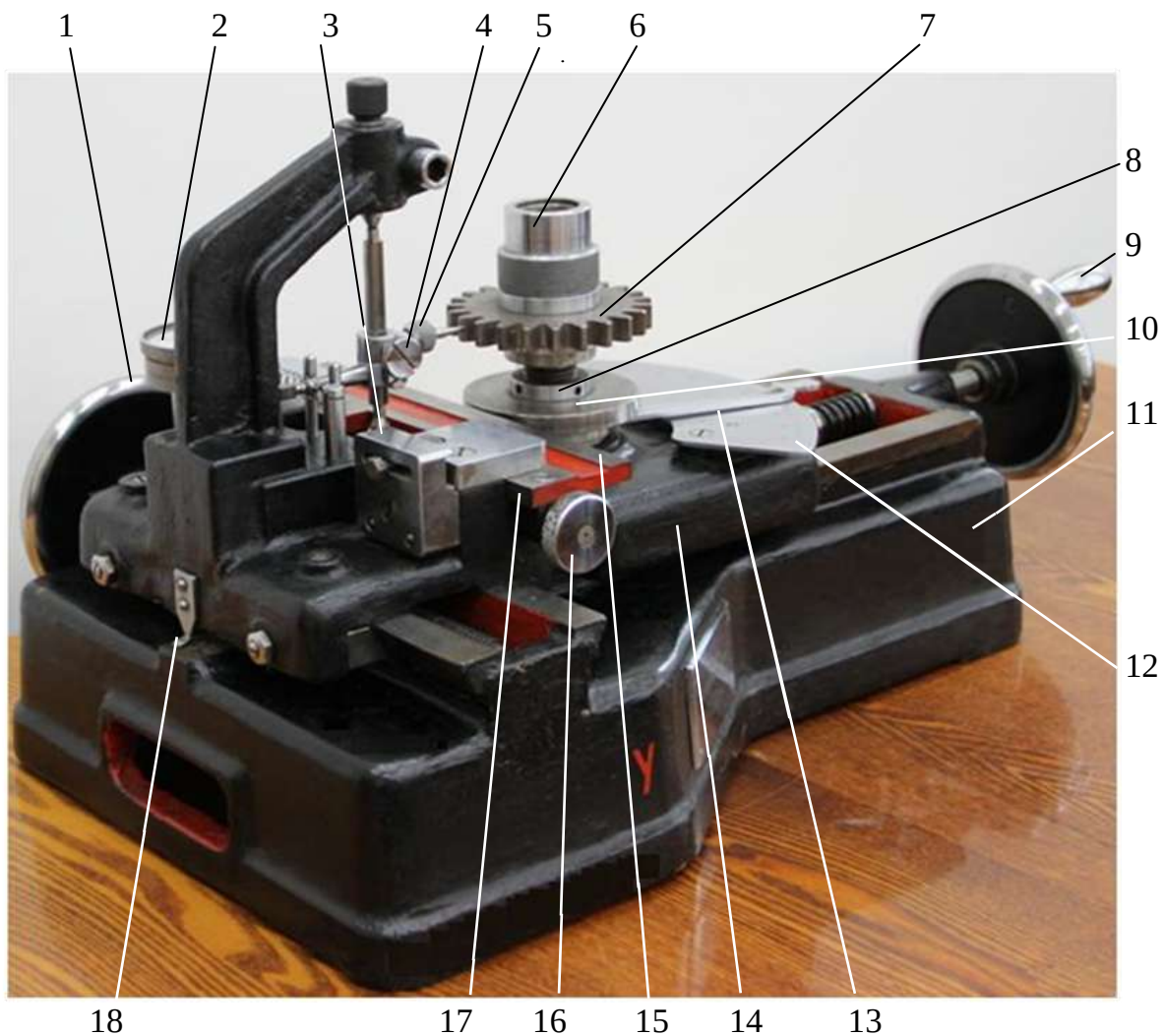


Рис. 29. Общий вид индивидуально-дискового эвольвентомера:

1 и 9 – маховичок; 2 – измерительный прибор; 3 – измерительный рычаг;
 4 – державка; 5 – измерительный наконечник; 6 – гайка; 7 – измеряемое ЗК;
 8 – оправка; 10 – диск обката; 11 – станина; 12 – шкала; 13 – указатель
 углов развернутости; 14 – продольная каретка; 15 – линейка обката;
 16 – винт; 17 – поперечная каретка; 18 – стрелка

Таким образом, при измерении отклонений профиля ЗК следует применять диск, диаметр которого равен диаметру основной окружности проверяемого ЗК. Это является недостатком прибора, так как требует наличия большого количества дисков для измерения разных по характеристикам ЗК.

Поэтому применение описываемого эвольвентомера наиболее целесообразно в серийном и крупносерийном производстве.

Наличие секторной шкалы 12 с указателем на продольной каретке дает возможность отсчета угла развернутости контролируемого профиля и, следовательно, построения диаграммы отклонения профиля.

Каретка 17 устанавливается маховичком 1 примерно в среднее положение по стрелке 18. На оправку 8 насаживается диск обката, выполненный по диаметру основной окружности ЗК.

3.5.3. Порядок выполнения работы

- Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.
- Изучают методику измерения отклонения профиля зуба и конструкцию индивидуально-дискового эвольвентомера.
- На прибор устанавливают соответствующий проверяемому ЗК диск обката. Диаметр диска обката

$$d_0 = m \cdot z \cdot \cos \alpha, \quad (25)$$

где m – модуль ЗК, мм; z – число зубьев; α – угол профиля, град.

- Выбирают измерительный наконечник, соответствующий модулю измеряемого колеса, и устанавливают в державке 4 (см. рис. 29)

таким образом, чтобы его острие находилось точно на уровне линейки обката 15. Для этого между рабочей плоскостью линейки 15 (рис. 30, *а*) и наружной поверхностью диска обката 10 слегка зажимают концевую меру 19 или лекальную линейку прямоугольного сечения. Зажатие производят перемещением каретки 14 маховичком 9 (см. рис. 29). Наконечник устанавливают так, чтобы его острие касалось боковой стороны линейки или концевой меры длины.

При необходимости отсчетов углов развернутости эвольвенты от ее начала на основной окружности устанавливают, кроме того, острие наконечника в плоскости, перпендикулярной к рабочей плоскости линейки и проходящей через ось изделия (оправки). Для этого на оправку 8 надевают при помощи переходной втулки специальный срезанный диск-шаблон 19 (рис. 30, *б*) и закрепляют его гайкой 6. Срез на шаблоне сделан по плоскости, проходящей через ось диска, и при установке на оправку плоскость среза проходит через ось оправки.

– Указатель углов развернутости 13 (см. рис. 29) закрепляют неподвижно на шкале 12 с помощью трубки. При этом оправку 8 закрепляют неподвижно относительно каретки 14.

– Перемещая маховичком 9 каретку 14, подводят срез диска до соприкосновения с острием наконечника и, перемещая соответствующий измерительный прибор 2 в продольном направлении, сообщают ему некоторый натяг и закрепляют его.

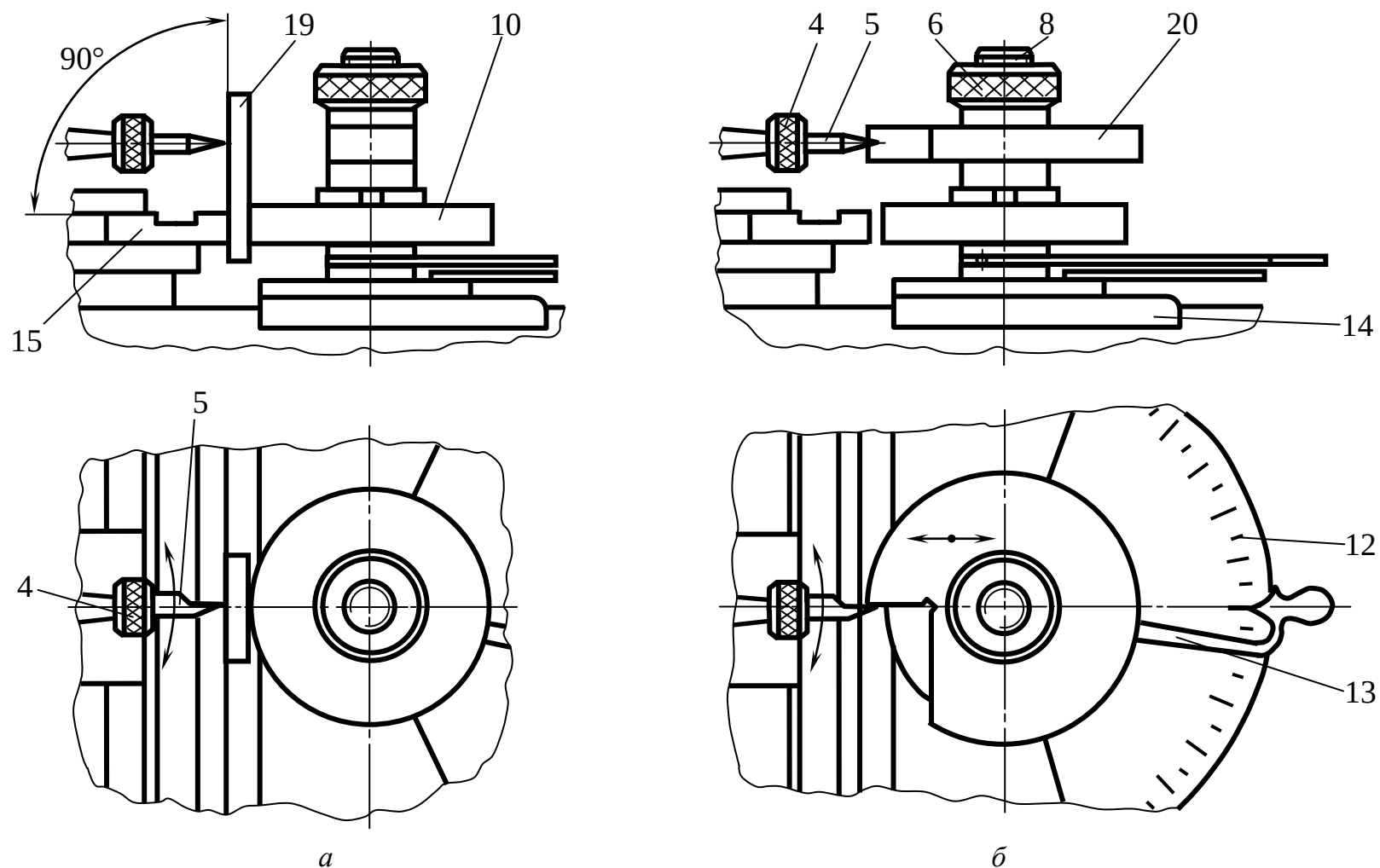


Рис. 30. Схема установки измерительного наконечника: *а* – в плоскости линейки обката; *б* – в плоскости, проходящей через ось изделия; 4 – державка; 5 – измерительный наконечник; 6 – гайка; 8 – оправка; 10 – диск обката; 12 – шкала; 13 – указатель углов развернутости; 14 – каретка; 15 – линейка обката; 19 – концевая мера длины; 20 – диск-шаблон

– Продолжая подавать каретку в параллельном направлении, наблюдают за стрелкой измерительного прибора. Если стрелка колеблется, то, поворачивая диск на втулке, ставят его в такое положение, когда при продвижении продольной каретки по направляющим стрелка измерительного прибора будет стоять неподвижно, замечают соответствующий натяг измерительного прибора и поворотом ободка ставят шкалу в начальное положение. Такой же натяг следует затем создать и при измерении ЗК. Затем каретку 14 отводят от линейки, шаблон снимают. На оправку 7 с переходной втулкой устанавливают измеряемое ЗК и закрепляют гайкой 6. Указатель 13 освобождают от зажима струбциной.

– Каретку 14 подводят вращением маховичка 9 к линейке 15, причем вращение маховичка продолжают, пока имеющаяся в корпусе прибора пружина не окажется почти полностью в сжатом состоянии.

– При подведении колеса к наконечнику необходимо следить, чтобы наконечник расположился между зубьями, а не уперся в дно впадины. Это достигается поворотом ЗК от руки и подачей каретки 17 с помощью маховичка 9.

– Микроподачу наконечника до плотного соприкосновения его с профилем (нулевое положение стрелки измерительного прибора при соответствующем натяге) производят винтом 16.

– Указатель угла развернутости 13 ставят на «ноль» шкалы 12. Вращая маховичок 9, производят обкатку профиля зуба острием наконечника, причем регистрируют отклонения профиля зуба по измерительному прибору при повороте ЗК на каждые 2 градуса по шкале 12.

– Для контроля профиля другой стороны зуба колесо на оправке переворачивают, если зубья нарезаны симметрично, или же производят перенастройку прибора, переставив наконечник рабочей стороной в сторону проверяемого профиля.

– Результаты измерений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 15.

– Строят график отклонения профиля зуба f_{fr} в зависимости от угла развернутости φ (см. рис. 28, в).

– По графику определяют погрешность профиля зуба f_{fr} .

– По ГОСТ 1643 [2, 8] по заданной точности ЗК находят значения допуска на погрешность профиля зуба, заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 15, и дают заключение о годности измеренного ЗК.

15. Результаты измерения отклонения профиля зубьев

№ зуба		Угол развернутости в градусах										
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
		Отклонения по измерительному прибору										
Зуб № 1	лев. проф.											
	прав. проф.											
Зуб № 2	лев. проф.											
	прав. проф.											
Действительная погрешность профиля зуба: $f_{fr} = \dots$												
Допуск погрешности профиля зуба по ГОСТ 1643: $f_f = \dots$												
Заключение о годности ЗК:												

3.5.4. Контрольные вопросы

1–9. См. контрольные вопросы № 1–9 к лабораторной работе № 1 (см. п. 3.1.4).

10. Для чего служит индивидуально-дисковый эвольвентомер ?

11. Какая норма точности характеризуется погрешностью профиля зуба ?

12. Что называется погрешностью профиля зуба ?

13. Чему равен наружный диаметр диска обката ?

14. Для чего служит срезанный диск-шаблон ?

15. Назовите основные причины возникновения погрешностей профиля зуба.

16. Что подразумевается под активным участком профиля зуба ?

17. Как строится график отклонений профиля зуба ?

18. В условиях какого по масштабу производства целесообразно использование индивидуально-дискового эвольвентомера ?

3.5.5. Рекомендуемая литература

1. [2, с. 234 – 243]. 2. [5, с. 225 – 240]. 3. [6, с. 177 – 186].
4. [8, с. 401 – 422].

3.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

Измерение показателей бокового зазора зубчатых колес накладными инструментами

Цель работы: изучение устройства и метрологических возможностей накладных измерительных инструментов для контроля показателей бокового зазора ЗК и получение навыков измерений с их помощью.

Задание: измерить смещение исходного контура, длину общей нормали прямозубого цилиндрического ЗК, толщину зуба, отклонение шага и дать заключение о годности ЗК.

Перечень накладных инструментов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: зубомер смещения; нормалемер индикаторный или зубомерный микрометр типа МЗ (ГОСТ 6507); штангензубомер типа ШЗ-18 (ТУ 2-034-773); штангенциркуль ШЦ-II (ГОСТ 166); плоскопараллельные концевые меры длины *H2* класса точности 3 (ГОСТ 9038); объект измерения – ЗК (выдает преподаватель).

3.6.1. Показатели, обеспечивающие гарантированный зазор в зубчатой передаче

Боковой зазор в ЗП обеспечивают путем радиального смещения исходного контура зуборезного инструмента от его номинального положения «в тело» заготовки колеса. Под **номинальным положением исходного контура** понимают положение исходного контура на ЗК,

лишенном погрешностей, при котором номинальная толщина зуба соответствует плотному двухпрофильному зацеплению [2].

Показателями точности ЗК, обеспечивающими гарантированный боковой зазор в ЗП внешнего зацепления, являются:

- *наименьшее дополнительное смещение исходного контура* E_{Hs} с соответствующим *допуском* T_H ;
- *наименьшее отклонение средней длины общей нормали* E_{Wms} или *отклонение длины общей нормали* E_{Ws} с *допуском* T_{Wm} или T_W (см. лабораторную работу № 1, п. 3.1, рис. 14, а);
- *наименьшее отклонение толщины зуба* E_{cs} с *допуском на толщину зуба по постоянной хорде* T_c .

Смещение исходного контура ЗК от его номинального положения в тело зубчатого колеса, осуществляемое с целью обеспечения в передаче гарантированного бокового зазора, называется *дополнительным смещением исходного контура* E_{Hr} (рис. 31).

Наименьшее дополнительное смещение исходного контура назначают в зависимости от степени точности по нормам плавности и видам сопряжений: для ЗК с внешним зацеплением « $-E_{Hs}$ », а для ЗК с внутренним зацеплением – « $+E_{Hi}$ ». Допуск T_H на дополнительное смещение исходного контура назначают в зависимости от допуска на радиальное биение F_r и вида сопряжения, причем величина допуска $T_H > F_r$ [8].

Приведенные в ГОСТ 1643 показатели точности ЗК нормируются относительно рабочей оси вращения колес в собранной передаче.

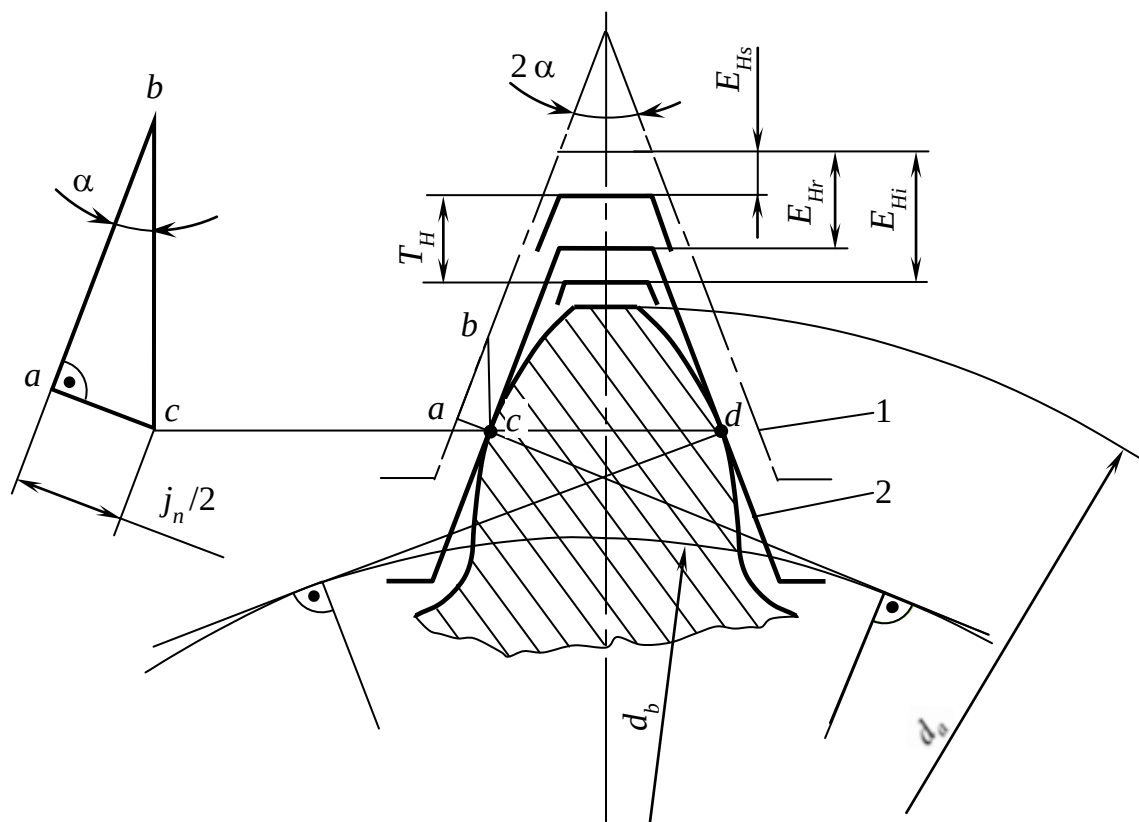


Рис. 31. Смещение исходного контура: 1 – номинальное положение исходного контура; 2 – действительное положение исходного контура

Однако при контроле смещения исходного контура и толщины зуба накладными инструментами в качестве измерительной базы используют цилиндрическую поверхность вершин зубьев. Допуски и отклонения, в которых учтены погрешности размеров и расположения цилиндрической поверхности вершин зубьев относительно рабочей оси зубчатого колеса, называют производственными [5].

Производственные допуски можно определить на основании расчета размерных цепей, составляющими звеньями которых являются радиус поверхности вершин зубьев $d_a/2$, биение поверхности вершин зубьев F_{da} , дополнительное смещение исходного контура E_{Hr} (см. рис. 31).

Рассчитать производственный допуск T_{Hnp} (рис. 32) на смещение исходного контура и производственное наименьшее дополнительное смещение исходного контура зуба E_{Hsnp} можно по формулам [8]:

$$T_{Hnp} = T_H - 0,5T_{da} - 0,7F_{da}; \quad (26)$$

$$E_{Hsnp} = |E_{Hs}| + 0,35F_{da}, \quad (27)$$

где T_{da} – допуск на диаметр окружности вершин зубьев, мкм;
 T_H – табличное значение допуска на смещение исходного контура (по ГОСТ 1643 [2, 8]), мкм; E_{Hs} – табличное значение наименьшего дополнительного смещения исходного контура, мкм (по ГОСТ 1643 [2, 8]).

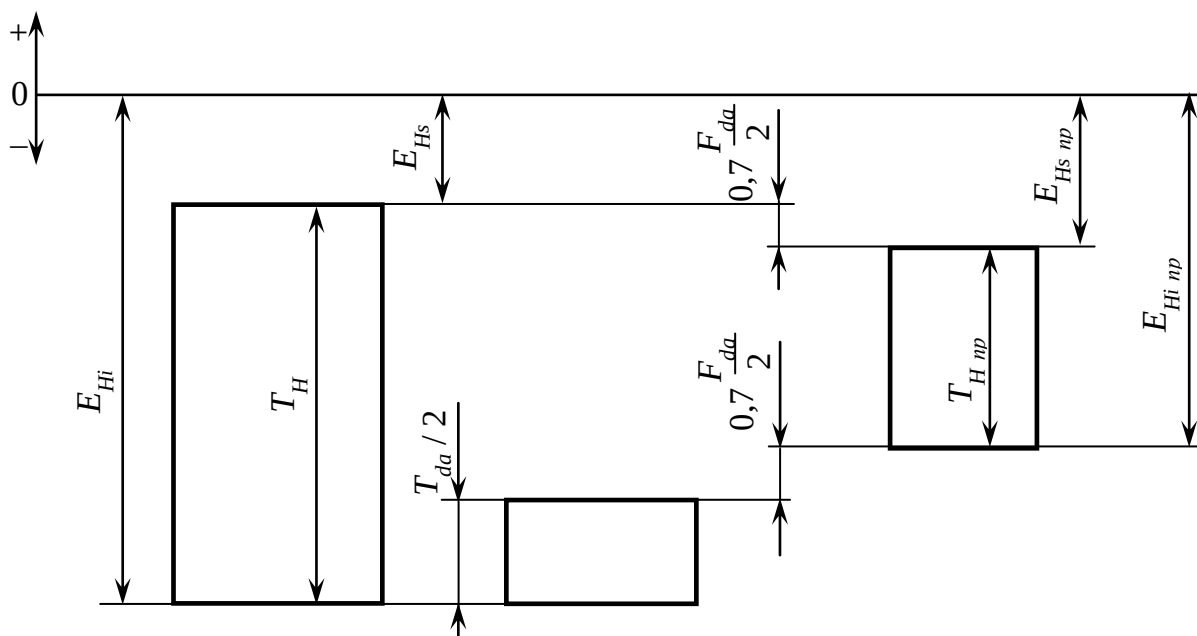


Рис. 32. Схема расположения табличных и производственных допусков на смещение исходного контура

Допуски на радиальное биение поверхности вершин зубьев (относительно оси посадочной поверхности) и ее диаметр T_{da} определяют из соотношений

$$F_{da} = 0,6 F_r; \quad (28)$$

$$T_{da} = 0,5 T_H, \quad (29)$$

где F_r – допуск на радиальное биение зубчатого венца по ГОСТ 1643 [2, 8], мкм.

Наименьшее дополнительное смещение исходного контура геометрически связано с толщиной зуба ЗК [2]. Поэтому в качестве показателя бокового зазора можно использовать отклонение E_{cr} толщины зуба и допуск на толщину зуба T_c (рис. 33).

Отклонение толщины зуба E_{cr} – это разность между действительной и номинальной толщинами зуба по постоянной хорде. За наименьшую толщину зуба по постоянной хорде $\bar{S}_c$ принимают толщину зуба по постоянной хорде, отнесенной к нормальному сечению, соответствующему номинальному положению исходного контура.

Наименьшее отклонение толщины зуба E_{cs} – это наименьшее предписанное уменьшение постоянной хорды, осуществляемое с целью обеспечения в передаче гарантированного бокового зазора.

Наименьшее отклонение толщины зуба E_{cs} (см. рис. 33) и допуск на толщину зуба T_c согласно ГОСТ 1643 [2, 8] связаны с наименьшим дополнительным смещением исходного контура E_{Hs} и допуском на этот показатель T_H следующими зависимостями:

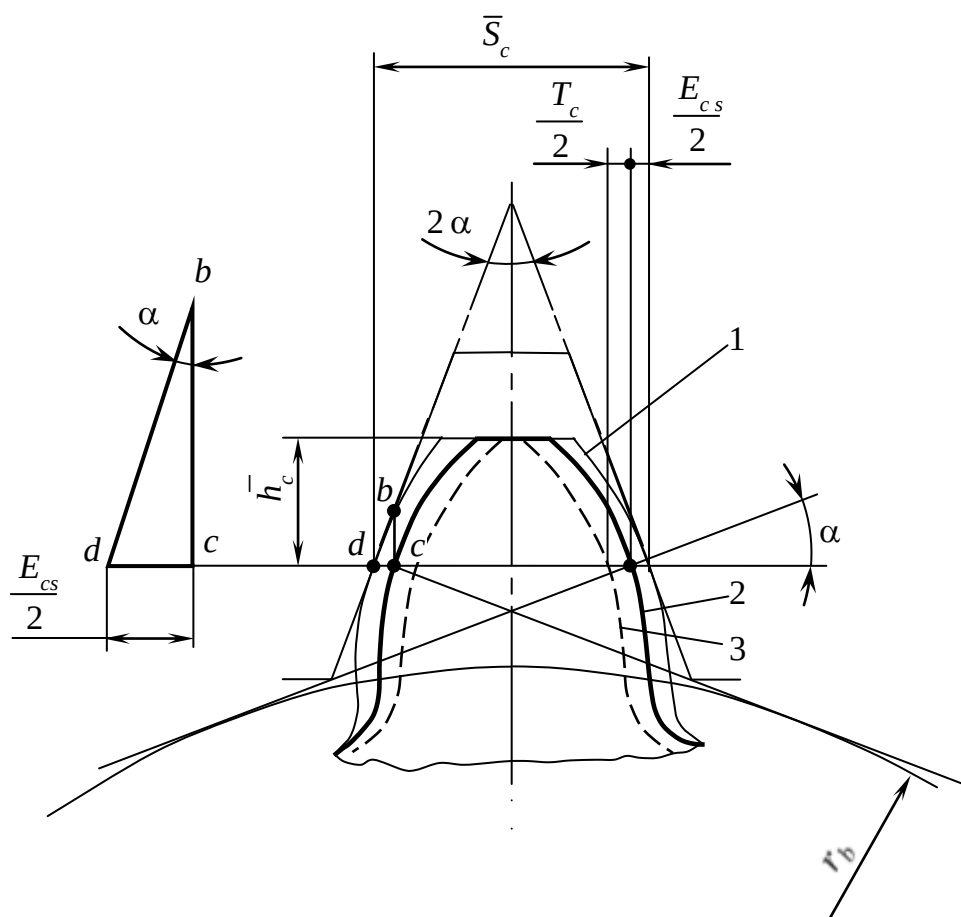


Рис. 33. Отклонение толщины зуба по постоянной хорде:
 1 – номинальный профиль зуба; 2 и 3 – профили, соответственно,
 с наибольшей и наименьшей толщиной зуба

$$E_{cs} = E_{Hs} \cdot 2 \operatorname{tg} \alpha; \quad (30)$$

$$T_c = T_H \cdot 2 \operatorname{tg} \alpha. \quad (31)$$

Таким образом, для эвольвентного зацепления ($\alpha = 20^\circ$)

$$E_{csnp} = 0,73 E_{Hsnp}; \quad (32)$$

$$T_{cnp} = 0,73 E_{Hnp}. \quad (33)$$

Основными причинами возникновения погрешностей положения исходного контура и толщины зуба при нарезании ЗК методом

обката являются радиальное биение заготовки и неточность направляющих суппорта металлорежущего станка.

3.6.2. Измерение смещения исходного контура ЗК

Устройство зубомера смещения

Зубомер смещения (тангенциальный зубомер) служит для измерения величины смещения исходного контура ЗК. Зубомеры выпускают четырех типоразмеров: М1 – для ЗК с модулем (2...10) мм; М2 – (4...16) мм; М3 – (10...28) мм и М4 – (22...50) мм.

Техническая характеристика зубомера смещения М1 (модель 23500)

Диапазон измерений ЗК по модулю, мм	2–10
Диапазон показаний при использовании в качестве отсчетного устройства индикатора часового типа ИЧ10 (ГОСТ 577), мм	1–10
Цена деления отсчетного устройства, мм	0,01
Погрешность измерения, мкм	9
Класс точности зубомера смещения по ГОСТ 5368	АВ

Зубомер смещения (рис. 34, а) имеет корпус 6 с симметрично расположенными измерительными губками 1 и 8. Губка 1 неподвижно закреплена на корпусе 6. Губка 8 перемещается вдоль корпуса 6 микровинтом 7. Измерительные грани губок образуют угол, равный углу зацепления. В требуемом положении губка 8 и корпус микровинта 7 закрепляются при помощи винтов 4 и 5.

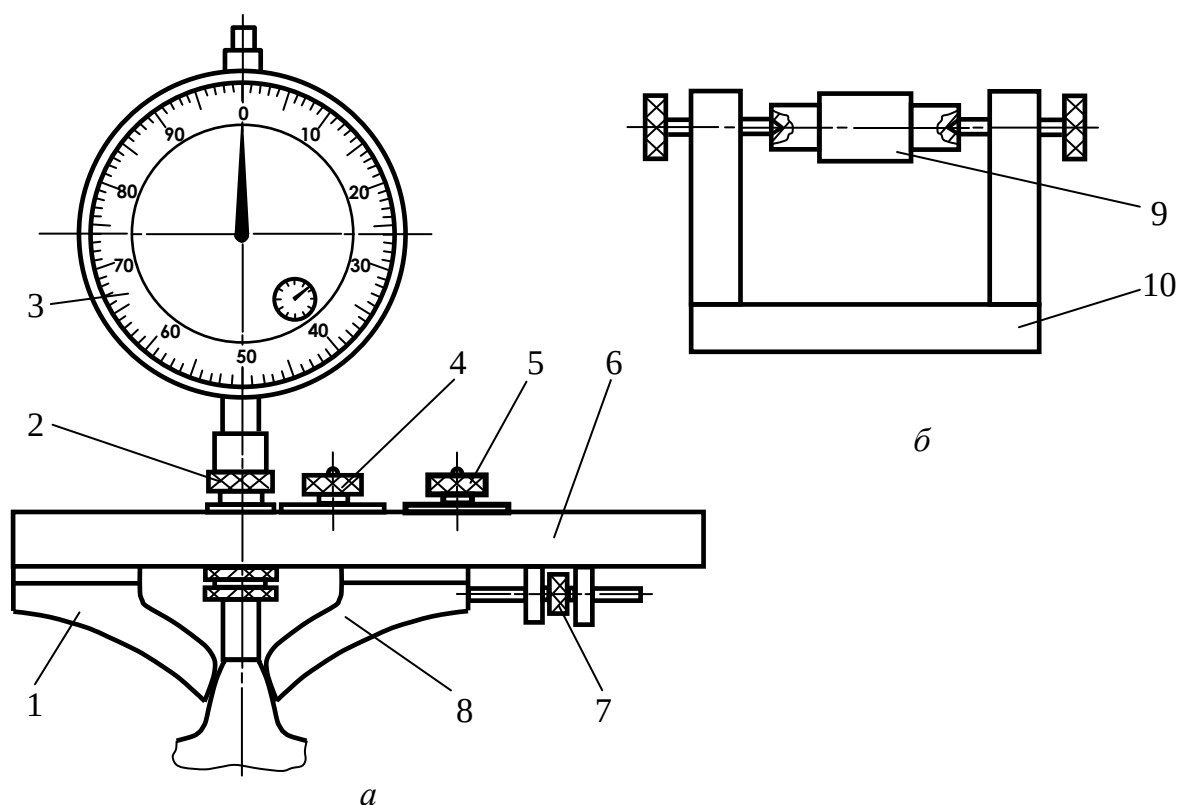


Рис. 34. Измерение смещения исходного контура ЗК с помощью тангенциального зубомера: а – тангенциальный зубомер; б – ролик для настройки прибора; 1, 8 – измерительные губки; 2 – гайка; 3 – индикатор часового типа; 4, 5 – винт; 6 – корпус; 7 – микровинт; 9 – цилиндрический ролик; 10 – стойка

По биссектрисе угла, создаваемого губками, в корпусе 6 закреплен измерительный прибор, например, индикатор 3 с удлиненным измерительным стержнем. Установку измерительных губок в требуемом номинальном положении производят по специальным цилиндрическим роликам 9, диаметр которых соответствует определенному модулю ЗК (рис. 34, б). Установочный ролик 9 закрепляется в центрах стойки 10.

При наложении тангенциального зубомера на зуб ЗК (см. рис. 34, а) измерительные губки касаются боковых сторон зуба

в точках c и d (см. рис. 31), расположенных на постоянной хорде зуба, а измерительный стержень индикатора упирается в наружный цилиндр ЗК.

Порядок выполнения измерений

– Зубомер смещения настраивают с помощью установочного ролика, соответствующего модулю измеряемого колеса. Для этого отпускают винты 4 и 5 и перемещают винтом 7 измерительную губку 8 (рис. 34, *a*) таким образом, чтобы касание с установочным роликом 9 было примерно посередине губок 1 и 8. В этом положении губку 8 закрепляют винтом 5 и подводят измерительный стержень индикатора к ролику таким образом, чтобы дать ему натяг (примерно 1 мм).

– Настроенный прибор переносят на контролируемый зуб и, покачивая его, определяют направление и наибольшую величину отклонения стрелки от начального положения. Результаты измерений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 16. Смещение исходного контура в тело колеса (в «минус») соответствует отклонениям стрелки в плюс. Измеряют смещение исходного контура $E_{Hr1}, \dots, E_{Hr3}$ для трех зубьев.

– Результаты измерений заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 16.

Так как результаты измерений зависят от отклонения диаметра поверхности вершин зубьев da от номинального значения (диаметр поверхности вершин зубьев используется в качестве измерительной базы), то при определении действительного смещения исходного

контура следует учитывать как биение наружного цилиндра относительно оси колеса F_{da} , так и отклонение диаметра da от номинального (расчетного) значения.

– По формуле (27) рассчитывают наименьшее производственное смещение исходного контура ЗК.

– По формуле (26) рассчитывают производственный допуск на смещение исходного контура ЗК.

– Рассчитывают наибольшее производственное смещение исходного контура ЗК

$$E_{Hi\,np} = |E_{Hs\,np}| + T_{H\,np}. \quad (34)$$

– Определяют годность измеряемого ЗК по параметру E_H . Для годного колеса смещение исходного контура E_H должно лежать в пределах от $E_{Hs\,np}$ до $E_{Hi\,np}$.

– Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 16.

16. Результаты измерений и расчетов отклонения смещения исходного контура, мкм

E_{Hs}	T_H	F_r	F_{da}	T_{da}	$T_{H\,np}$	$E_{Hs\,np}$	$E_{Hi\,np}$	E_{Hr1}	E_{Hr2}	E_{Hr3}	E_{Hr}
Заключение о годности ЗК по параметру E_H :											

3.6.3. Измерение длины общей нормали

Устройство нормалемера индикаторного

Нормалемер индикаторный предназначен для измерения длины общей нормали, а также для определения колебания длины общей нормали цилиндрических ЗК внешнего зацепления.

Нормалемеры выпускаются пяти типоразмеров. Нормалемер М01 применяют для измерения длины общей нормали от 0 до 25 мм; М02 – от 25 до 50 мм; М1 – от 0 до 120 мм; М2 – от 50 до 300 мм и М3 – от 150 до 300 мм.

Техническая характеристика нормалемера М1 (БВ-5045)

Диапазон измерений, мм

– модуль ЗК	от 1
– длина общей нормали	от 0 до 120

Диапазон показаний при использовании в качестве
отсчетного устройства индикатора часового типа ИЧ-10

(ГОСТ 577), мм	10
----------------	----

Цена деления индикатора часового типа, мкм	0,01
--	------

Погрешность измерения колебания длины общей нормали, мкм	6
---	---

Класс точности нормалемера	<i>AB</i>
----------------------------	-----------

Для измерения длины общей нормали можно использовать также микрометрические нормалемеры (зубомеры микрометрические), которые выпускают для четырех диапазонов длин общей нормали: 0–25; 25–50; 50–75; 75–100 мм.

Техническая характеристика зубомерного микрометра МЗ 50 (ГОСТ 6507)

Диапазон измерений, мм	25–50
Цена деления, мкм	0,01
Погрешность измерения, мкм	
класс точности 1	± 4
класс точности 2	± 5

Базовой деталью нормалемера индикаторного является круглая штанга 4 (рис. 35), на которой помещается разрезная втулка 3 с неподвижной (в процессе измерения) измерительной губкой 6.

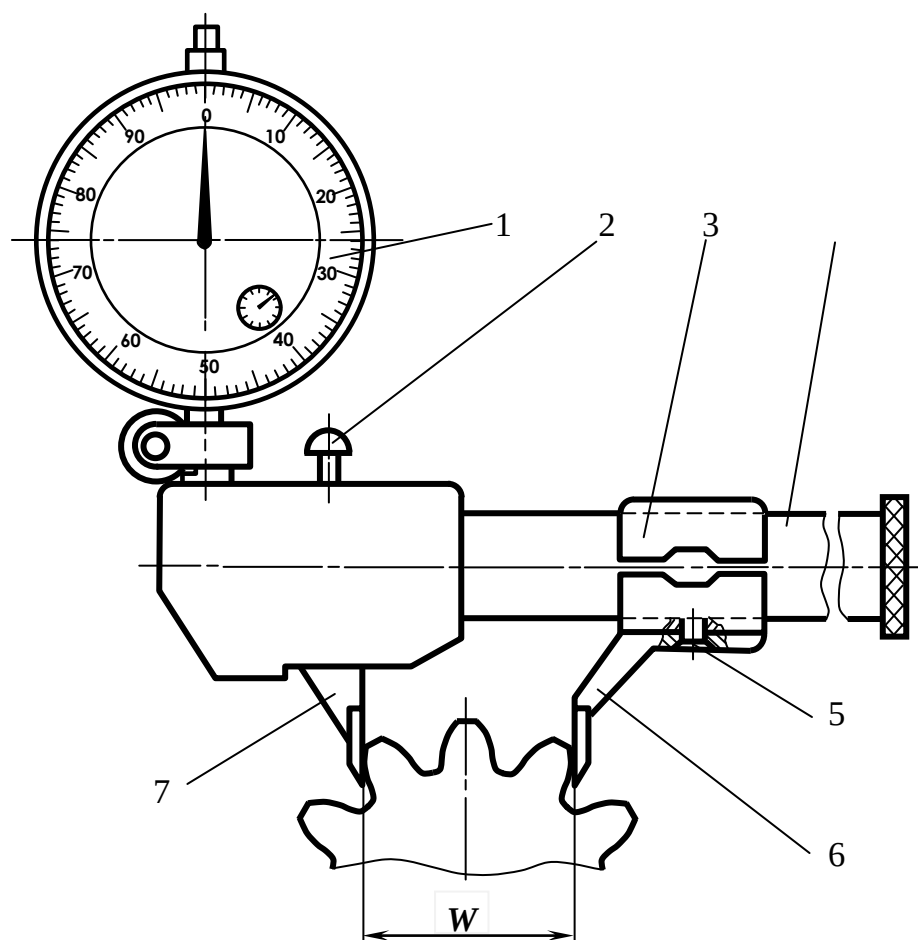


Рис. 35. Измерение длины общей нормали с помощью нормалемера индикаторного: 1 – индикатор часового типа; 2 – кнопка арретира; 3 – разрезная втулка; 4 – штанга; 5 – винт; 6 и 7 – измерительные губки

Подвижная измерительная губка 7 подвешена на пружинном параллелограмме, что обеспечивает параллельность измерительных плоскостей губок 7 и 6. Перемещение подвижной губки 7 передается через угловой рычаг с отношением плеч 1 : 2 индикатору часового типа 1. Отвод чувствительной губки осуществляется нажимом на кнопку арретира 2.

Конструкция зубомерного микрометра та же, что и микрометра гладкого (см. лабораторную работу № 5 в учебном пособии «Измерение и контроль геометрических параметров деталей машин и приборов» [7]).

Порядок выполнения измерений

- Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.
- Подсчитывают число зубьев измеряемого колеса z .
- По табл. 3 (см. лабораторную работу № 1, п. 3.1) выбирают число охватываемых при измерении зубьев n .
- Замеряют штангенциркулем диаметр ЗК по вершинам зубьев d_a и определяют модуль измеряемого колеса

$$m = d_a / (z + 2). \quad (35)$$

- По формуле (7) рассчитывают длину общей нормали W .
- Блок концевых мер, соответствующий рассчитанному размеру длины общей нормали W измеренного ЗК, помещают между губками 6 и 7 нормалемера индикаторного (см. рис. 35). Закрепление губки 6 на установке нормалемера на заданный размер производят с помощью стопорного винта 5. Индикатору 1 сообщают натяг (примерно 1 мм).

Нажав на кнопку арретира 2, вынимают блок концевых мер и переносят нормалемер на измеряемое колесо.

– Настроенный нормалемер слегка покачивают, обкатывая губки по профилям зубьев. За отклонение длины общей нормали следует принять наибольшую величину отклонения стрелки индикатора от установленной по концевым мерам длины начального положения.

– Измеряют отклонение E_{Wr} длины общей нормали на трех группах зубьев по ЗК.

– Определяют по ГОСТ 1643 [2, 8] для заданной степени точности ЗК и вида бокового зазора наименьшее отклонение длины общей нормали E_{Ws} и допуск на ее длину T_W . Подсчитывают наибольшее отклонение длины общей нормали $E_{Wi} = |E_{Ws}| + T_W$. Измеренные отклонения длины общей нормали должны находиться в пределах: $E_{Ws} < E_{Wr} < E_{Wi}$.

– Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 17.

– Дают заключение о годности измеряемого ЗК по параметру E_{Wr} .

17. Результаты расчетов и измерения отклонений длины общей нормали, мм

z	n	d_a	m	W	E_{Wr1}	E_{Wr2}	E_{Wr3}	E_{Wr}	$-E_{Ws}$	$-E_{Wi}$	T_W
Заключение о годности ЗК по параметру E_{Wr} :											

3.6.4. Измерение толщины зуба по постоянной хорде

Устройство штангензубомера

Штангензубомеры предназначены для измерения толщины зуба по постоянной хорде S_c цилиндрических прямозубых и косозубых колес внешнего зацепления 11 и 12-й степеней точности. Выпускают штангензубомеры двух типоразмеров: ШЗ-18 для измерения зубчатых колес с модулем (1–18) мм и ШЗ-36 – с модулем (5–36) мм.

Техническая характеристика штангензубомера типа ШЗ-18

Диапазон измерений ЗК по модулю, мм	1–18
Диапазон измерений, мм	
– по горизонтальной шкале	0–33
– по вертикальной шкале	0–23
Цена деления нониуса, мм	0,05

Штангензубомер (рис. 36) представляет собой сдвоенный штангенциркуль, состоящий из корпуса 2, высотной линейки 3 с упором 6 и подвижной рамки 8. Штангензубомер имеет две взаимно перпендикулярные шкалы: вертикальную на высотной линейке для определения высоты $\bar{h}_c$, а горизонтальную – на горизонтальной штанге корпуса для измерения толщины зуба S_c . Перед измерением упор 6 устанавливают по вертикальной шкале нониуса 4 на размер, равный высоте $\bar{h}_c$, на которой следует измерять толщину зуба S_c , и закрепляют высотную линейку 3 в этом положении винтом 5. Измерительные губки 1 и 10 после установки штангензубомера упором 6 на окружность выступов измеряемого ЗК сдвигают до соприкосновения с

боковыми поверхностями зуба. Толщину зуба S_c отсчитывают по горизонтальной шкале нониусом 9.

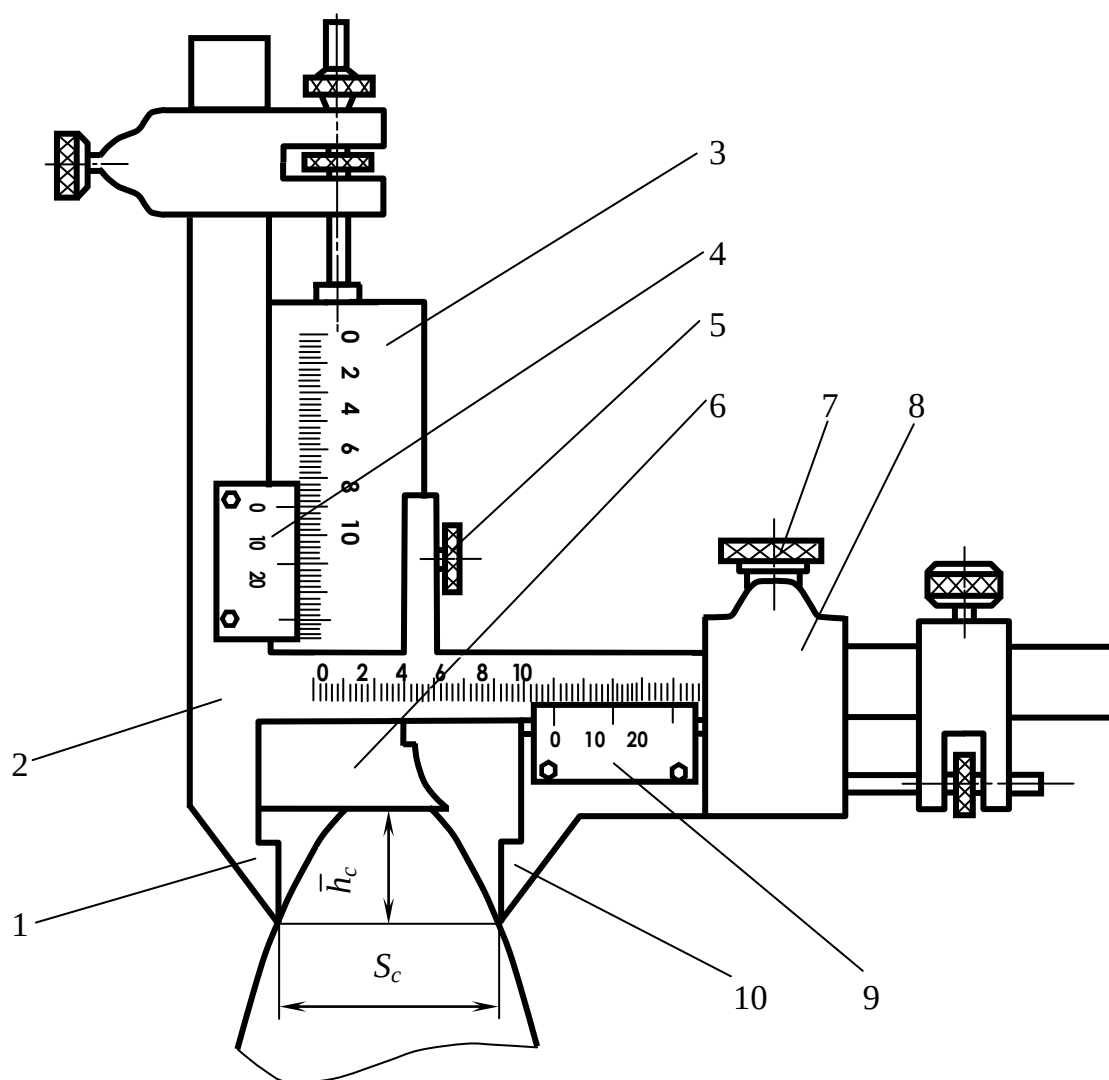


Рис. 36. Измерение толщины зуба штангензубомером:

- 1, 10 – измерительные губки; 2 – основание; 3 – высотная линейка;
4, 9 – нониус; 5, 7 – гайка; 6 – упор; 8 – подвижная рамка

Порядок выполнения измерений

– Рассчитывают высоту головки зуба $\bar{h}_c$ (см. рис. 36) измеряемого колеса по формуле (мм)

$$\bar{h}_c = 0,7476 \cdot m. \quad (36)$$

– Устанавливают высотную линейку 3 по нониусу 4 на величину $\bar{h}_c$.

– Прибор переносят на зуб измеряемого колеса, торец высотной линейки совмещают с головкой зуба, губку 10 перемещают таким образом, чтобы обе губки встали без просвета по боковым поверхностям зуба, и по горизонтальной шкале и нониусу 9 считывают фактическую величину S_c измеряемого зуба. Величину S_c измеряют три раза S_{c1} , S_{c2} и S_{c3} .

– Определяют номинальную толщину зуба (мм)

$$\bar{S}_c = 1,387 \cdot m. \quad (37)$$

– По формуле (32) определяют верхнее отклонение толщины зуба по постоянной хорде $E_{cs\ np}$.

– По формуле (33) определяют допуск на толщину зуба по постоянной хорде $T_{c\ np}$.

– Подсчитывают нижнее отклонение толщины зуба по постоянной хорде

$$E_{ci\ np} = 0,73 \cdot E_{Hi\ np}. \quad (38)$$

– Величины $E_{Hs\ np}$ и $T_{H\ np}$ находят по формулам (27) и (26), $E_{Hi\ np}$ – по формуле (35).

– Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 18.

**18. Результаты измерений и расчетов отклонения смещения
исходного контура и измерения толщины зуба по постоянной хорде, мм**

$\bar{h}_c$	T_c	$E_{cs\ np}$	$T_{c\ np}$	$E_{ci\ np}$	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_c	$\bar{S}_c - E_{cs\ np}$	$\bar{S}_c - E_{ci\ np}$
Заключение о годности ЗК по параметру S_c :										

– Определяют годность измеренного ЗК по параметру S_c . При этом величина S_c должна лежать в пределах от $(\bar{S}_c - E_{cs\ np})$ до $(\bar{S}_c - E_{ci\ np})$.

3.6.5. Контрольные вопросы

1–9. См. контрольные вопросы № 1–9 к лабораторной работе № 1 (см. п. 3.1.4).

10. Для чего необходим в зубчатой передаче гарантированный боковой зазор ?

11. Назовите показатели, обеспечивающие боковой зазор в передаче.

12. Какие допуски называются производственными ?

13. Назовите составляющие элементы производственного допуска на смещения исходного контура ЗК.

14. Назовите основные причины возникновения погрешностей положения исходного контура ЗК.

15. Каким образом связаны между собой допуск на толщину зуба и наименьшее дополнительное смещение исходного контура ЗК ?

16. Что понимают под колебанием длины общей нормали ЗК ?

17. Назовите основные причины возникновения колебания длины общей нормали ЗК.

3.6.6. Рекомендуемая литература

1. [2, с. 449 – 466].
2. [5, с. 225 –240].
3. [6, с. 177 – 186].
4. [8, с. 432 –447].

3.7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

Измерение показателей бокового зазора для зубчатых колес методом двух роликов

Цель работы: изучение методики и техники измерения показателей бокового зазора ЗК универсальными измерительными средствами с помощью двух роликов.

Задание: у прямозубого цилиндрического ЗК измерить отклонение размера по роликам и дать заключение о годности ЗК.

Перечень инструментов и принадлежностей, необходимых для выполнения работы: микрометр МК 50-2 (ГОСТ 6507) [9, 11]; калиброванные ролики или проволоочки; объект измерения – ЗК (выдает преподаватель).

3.7.1. Методика измерения показателей бокового зазора ЗК методом двух роликов

В две диаметрально противоположные впадины измеряемого ЗК помещают калиброванные ролики и измеряют расстояние между крайними точками цилиндрических поверхностей роликов гладким микрометром. На основании выполненных измерений можно рассчитать смещение исходного контура и толщину зуба ЗК.

Этот метод не требует специальных СИ. К его преимуществам можно отнести также снижение погрешности измерения по сравнению с измерением накладными измерительными инструментами, так как на точности измерений не сказываются погрешности цилиндрической поверхности вершин зубьев измеряемого ЗК, поскольку эта поверхность не является измерительной базой.

Однако методу двух роликов присущи и недостатки:

- сложность вычислений, связанных с определением искомой величины;
- результат измерения представляет собой усредненное значение толщины двух диаметрально противоположных зубьев.

Для прямозубых цилиндрических колес внешнего зацепления теоретическое значение расстояния M_T между образующими цилиндрических поверхностей роликов (рис. 37)

$$M_T = 2r_D - D, \quad (39)$$

где r_D – расстояние от центра ролика до оси колеса, мм; D – диаметр ролика, мм.

Эта формула справедлива при условии, что измеряемое ЗК имеет четное число зубьев. Если же число зубьев измеряемого ЗК нечетное, то один из роликов будет смещен по отношению к другому на угловую величину, равную половине шага. В этом случае

$$M_T = 2 \cdot \left(r_D \cos \frac{90^\circ}{z} + \frac{D}{2} \right), \quad (40)$$

где z – число зубьев проверяемого зубчатого колеса.

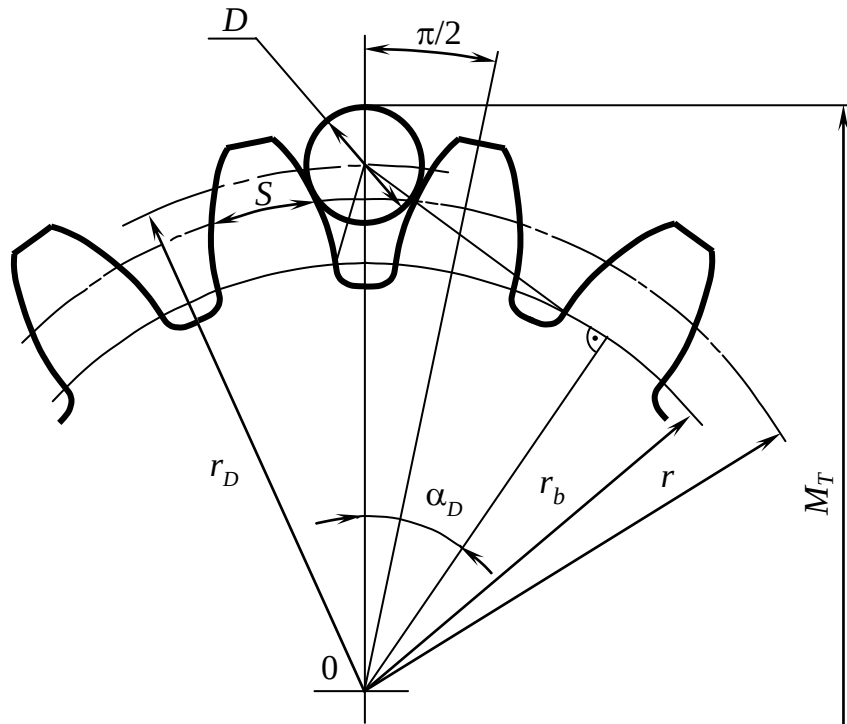


Рис. 37. Схема измерения показателей бокового зазора ЗК методом двух роликов

Если через центр ролика, установленного во впадину проверяемого колеса, провести эвольвенту, имеющую ту же основную окружность, что и ЗК, то расстояние r_D между центрами ЗК и ролика

$$r_D = r_b / \cos \alpha_D, \quad (41)$$

где r_b – радиус основной окружности, мм; α_D – угол, заключенный между радиус-вектором и нормалью к эвольвенте.

Если в зависимости (41) радиус основной окружности r_b выразить через радиус делительной окружности r , то

$$r_D = r \cos \alpha / \cos \alpha_D, \quad (42)$$

где α – угол зацепления.

Теоретическое значение угла α_D можно определить из эвольвентной функции

$$\operatorname{inv} \alpha_D = \operatorname{inv} \alpha + D/(d \cos \alpha) - \pi/(2z) - 2x \operatorname{tg} \alpha / z, \quad (43)$$

где d – диаметр делительной окружности, мм; x – коэффициент смещения исходного контура.

Значения эвольвентной функции можно определить по табл. П.2 приложения.

Для измерения мелко модульных ЗК обычно используют калиброванные проволочки, которые изготавливают для измерения среднего диаметра резьбы. Диаметр роликов или проволочек, пригодных для измерения ЗК

$$D \approx m \cdot \pi / (2 \cos \alpha) \quad (44)$$

или при $\alpha = 20^\circ$

$$D \approx 1,68 m. \quad (45)$$

В этом случае образующая ролика (проволочки) будет касаться боковых сторон зубьев примерно у делительной окружности колеса.

Стандартом ГОСТ 1643 установлены **наименьшее отклонение размера по роликам E_{Ms}** и **допуск на это отклонение T_M** (см. рис. 38).

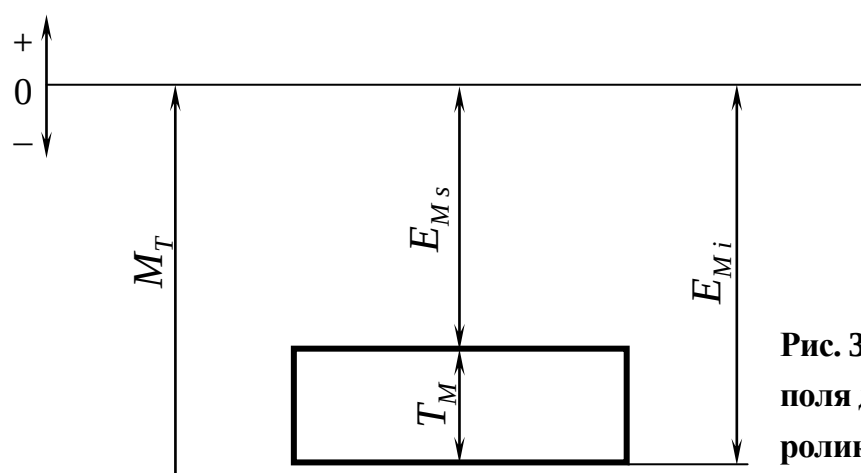


Рис. 38. Схема расположения поля допуска размера по роликам

Наименьшее отклонение размера по роликам и допуск на это отклонение для прямозубых ЗК можно определить по формулам

$$E_{Ms} = \frac{(E_{Hs} + 0,35 F_r) \cdot 2 \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha_D}; \quad (46)$$

$$T_M = \frac{(T_H + 0,7 F_r) \cdot 2 \cdot \sin \alpha}{\sin \alpha_D}, \quad (47)$$

где E_{Hs} – наименьшее смещение исходного контура, мкм; T_H – допуск на смещение исходного контура, мкм; F_r – допуск радиального биения зубчатого венца, мкм.

3.7.2. Порядок выполнения работы

– Изучают инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ.

– Изучают методику измерения показателей бокового зазора для ЗК методом двух роликов.

– По формуле (45) определяют диаметр калиброванных роликов и из набора выбирают ролики, диаметр которых наиболее близок к расчетному.

– Размещают ролики во впадинах ЗК и с помощью микрометра измеряют величину M , т. е. размер по роликам. Измерения выполняют $M_1, \dots, M_3$ для трех зубьев (впадин).

– По формуле (39) или (40) определяют теоретическое значение размера по роликам M_T .

– Определяют действительное отклонение размера по роликам

$$E_M = M - M_T. \quad (48)$$

– По формулам (46) и (47), с использованием ГОСТ 1643 [2, 8] находят наименьшее отклонение размера по роликам E_{Ms} и допуск T_M .

- Строят схему расположения поля допуска размера по роликам (см. рис. 38) и показывают действительное отклонение размера E_M .
- Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу, выполненную по форме табл. 19.
- Дают заключение о годности измеряемого ЗК по параметру E_M .

**19. Результаты измерений и расчетов показаний
бокового зазора ЗК методом двух роликов, мкм**

E_{Hs}	T_{Hs}	F_r	E_{Ms}	E_{Mi}	T_M	D	M_T	M_i	M	E_M
Заключение о годности ЗК по параметру E_M :										

3.7.3. Контрольные вопросы

1–11. См. контрольные вопросы № 1–9 к лабораторной работе № 1 (см. п. 3.1.4) и вопросы 10, 11 к лабораторной работе № 6 (см. п. 3.6.5).

12. Назовите основные преимущества и недостатки измерения показателей бокового зазора ЗК методом двух роликов.

13. Назовите составляющие элементы наименьшего отклонения размера по роликам.

14. Назовите составляющие элементы допуска на отклонение размера по роликам.

3.7.4. Рекомендуемая литература

1. [2, с. 449 – 466].
2. [5, с. 225 – 240].
3. [6, с. 177 – 186].
4. [8, с. 432 – 447].

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ

1. ГОСТ 166-89. Штангенциркули. Технические условия.
2. ГОСТ 577-68. Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Технические условия.
3. ГОСТ 1643-81. ОНВ. Передатки зубчатые цилиндрические. Допуски.
4. ГОСТ 5368-81. Приборы для измерения цилиндрических зубчатых колес. Типы и основные параметры. Нормы точности.
5. ГОСТ 6507-90. Микрометры. Технические условия.
6. ГОСТ 9038-90. Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия.
7. 9178-81. ОНВ. Передатки зубчатые цилиндрические мелко-модульные. Допуски.
8. ГОСТ 9696-82. Индикаторы многооборотные с ценой деления 0,001 и 0,002 мм. Технические условия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агапов, С.И. Прибор для оценки кинематической погрешности зуборезного оборудования в производственных условиях / С.И. Агапов // СТИН. – 2006. – № 2. – С. 26–29.

2. Белкин, И.М. Допуски и посадки (основные нормы взаимозаменяемости) : учебное пособие / И.М. Белкин. – М. : Машиностроение, 1992. – 528 с.

3. Калашинков, А.С. Технология изготовления зубчатых колес / А.С. Калашников. – М. : Машиностроение, 2004. – 480 с.

4. Локтев, Д.А. Современные методы контроля качества цилиндрических зубчатых колес / Д.А. Локтев // Оборудование и инструмент. – 2009. – № 4. – С. 6–11.

5. Марков, Н.Н., Нормирование точности в машиностроении : учебник для машиностроительных спец. вузов / Н.Н. Марков, В.В. Осипов, М.Б. Шабалина; под ред. Ю.М. Соломенцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа; Издательский центр «Академия», 2001. – 335 с.

6. Муслина, Г.Р. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник / Г.Р. Муслина, Ю.М. Правиков; под ред. д-ра техн. наук, проф. Л.В. Худобина. – М. : КНОРУС, 2017. – 400 с.

7. Муслина, Г.Р. Измерение и контроль геометрических параметров деталей машин и приборов : учебное пособие / Г.Р. Муслина, Ю.М. Правиков; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Л.В. Худобина. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 220 с.

8. Палей М.А. Допуски и посадки: справочник: в 2 ч. /

М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 8-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2001. – Ч. 1. – 576 с.; Ч. 2. – 608 с.

9. Правиков Ю.М. Метрологическое обеспечение производства / Ю.М. Правиков, Г.Р. Муслина. – М. : КНОРУС, 2012. – 420 с.

10. Производство зубчатых колес : справочник / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Коган и др.; под общ. ред. Б.А. Тайца. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 464 с.

11. Средства контроля, управления и измерения линейных и угловых размеров в машиностроении : каталог / ОАО «ВНИИТЭМР», ИКФ Каталог. – М. : Каталог, 2004. – 128 с.

12. Сурков, И.В. Автоматизация контроля параметров зубчатых колес и передач / И.В. Сурков // Станкоинструмент. – 2016. – № 1. – С. 80–87.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

П.1. Средства измерения цилиндрических зубчатых колес [3, 4, 11]

№ комплекса контролируемых показателей (по табл. 2)	Измеряемый параметр и его обозначение	Средства измерения	
		специальные и универсальные для измерения ЗК	универсальные
1	2	3	4
Нормы кинематической точности			
1, 10	Кинематическая погрешность ЗК F'_{ir} и ЗП F'_{ior}	Приборы для комплексного однопрофильного контроля, кинематомеры	—
2, 3	Накопленная погрешность шага F_{pr}	Многошаговые и угловые шагомеры; приборы для автоматического измерения шага ЗК	Теодолиты; делительные диски и оптические делительные головки, оснащенные измерительными головками или индикаторами
6, 7, 8	Колебание измерительного межосевого расстояния за оборот колеса F''_{ir}	Приборы для комплексного двухпрофильного измерения ЗК, межосемеры	—
4, 5, 9	Радиальное биение зубчатого венца F_{rr}	Биениемеры, универсальные приборы для измерения ЗК, зубоизмерительные машины	Оптическая делительная головка, оснащенная измерительными головками или индикаторами, КИМ
5, 6	Колебание длины общей нормали F_{vwr}	Зубомерные микрометры, нормалемеры, универсальные приборы для измерения ЗК, зубоизмерительные машины	Микрометры или рычажные скобы с тарельчатыми измерительными наконечниками, КИМ

Продолжение прил. П.1

1	2	3	4
4, 7	Погрешность обката F_{cr}	Кинематомеры	Теодолиты с автоколламаторами
Нормы плавности работы			
1, 2, 8, 9 10, 11	Циклическая погрешность ЗК F_{zkr} , ЗП F_{zk0r} , циклическая погрешность зубцовой частоты ЗК f_{zkr} и ЗП f_{zkr} , местная кинематическая погрешность ЗК f'_{ir} и ЗП f'_{ior}	Приборы для комплексного измерения кинематической погрешности ЗК, кинематомеры	—
3, 4, 6	Отклонение шага зацепления f_{pbr}	Шагомеры для измерения шага зацепления и разности шагов, универсальные приборы для измерения ЗК, зубоизмерительные машины	Универсальные измерительные средства: штангенциркуль, микрометрический нормалемер в сочетании с концевыми мерами длины; КИМ
3	Погрешность профиля f_{fr}	Эвольвентомеры универсальный и индивидуально-дисковый, зубоизмерительные машины	Проекторы, большой инструментальный микроскоп, КИМ
5	Колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе f''_{ir}	Приборы для комплексного двухпрофильного измерения ЗК, межосемеры	—
4, 7	Отклонение шага f_{ptr}	Накладные шагомеры, универсальные приборы для измерения ЗК, зубоизмерительные машины	КИМ

Продолжение прил. П.1

1	2	3	4
Нормы контакта			
1	Погрешность направления зуба $F_{\beta r}$	Ходомеры, универсальные приборы для измерения ЗК, зубоизмерительные машины	КИМ
2	Суммарная погрешность контактной линии F_{kr}	Приборы для измерения погрешности формы и расположения контактной линии и направления зуба, контактомер универсальный	КИМ
3, 4	Отклонение осевого шага $F_{P_{xnr}}$	Осевые шагомеры, контактомеры универсальные	КИМ
6, 7	Мгновенное и суммарное пятна контакта	Контрольно-обкатной стенд (по следам приработки или краски)	В собранной передаче по следам краски
Нормы бокового зазора			
1	Дополнительное смещение исходного контура E_{Hr} и допуск на дополнительное смещение исходного контура T_H	Зубомеры смещения, предельные шаблоны	Проекторы, универсальные измерительные средства (микрометры или индикаторные скобы) в сочетании с калиброванными роликами, КИМ
2	Предельные отклонения измерительного межосевого расстояния $E_{a''s}, E_{a''i}$	Приборы для комплексного двухпрофильного измерения ЗК, межосемеры	—
3, 4	Отклонение средней длины общей нормали E_{Wmr} , допуск на нее T_{Wm} , отклонение длины общей нормали E_{Wr} , допуск на нее T_W	Нормалемеры, универсальные приборы для измерения ЗК, зубоизмерительные машины	Микрометры с тарельчатыми измерительными наконечниками, КИМ

Окончание прил. П.1

1	2	3	4
5	Отклонение толщины зуба E_{cr} и допуск на него T_c	Зубомер индикаторный и микрометрический, штангензубомеры, зубоизмерительные машины	КИМ
—	Размер по роликам E_M и допуск на него T_M	—	Универсальные измерительные средства (микрометры, скобы индикаторные и др.), оснащенные калиброванными роликами
6	Гарантированный боковой зазор j_{nmin}	Приборы для комплексного двухпрофильного зацепления, межосемеры (косвенное измерение)	В собранной передаче с помощью набора щупов, свинцовой проволочки или методом люфтования
7	Предельные отклонения межосевого расстояния f_a	Приборы для комплексного двухпрофильного зацепления, межосемеры	—

Приложение 2

П.2. Таблица значений эвольвентной функции $\theta = \text{inv } \alpha$ для углов α от 15° до 25°

α , град	По- рядок	Значения эвольвентной функции θ											
		0'	5'	10'	15'	20'	25'	30'	35'	40'	45'	50'	55'
15	0,00	61498	62548	63611	64686	65773	66873	67985	69110	70248	71398	72561	73738
16	0,0	07493	07613	07735	07857	07982	08107	08234	08362	08492	08623	08756	08889
17	0,0	09025	09161	09299	09439	09580	09722	09866	10012	10158	10307	10456	10608
18	0,0	10760	10915	11071	11228	11387	11547	11709	11873	12038	1205	12373	12543
19	0,0	12715	12888	13063	13240	13418	13598	13779	13963	14148	14334	14523	14713
20	0,0	14904	15098	15293	15490	15689	15890	16092	16296	16502	16710	16920	17132
21	0,0	17345	17560	17777	17996	18217	18440	18665	18891	19120	19350	19583	19817
22	0,0	20054	20292	20533	20775	21019	21266	21514	21765	22018	22272	22529	22788
23	0,0	23049	23312	23577	23845	24114	24386	24660	24936	25214	25495	25778	26062
24	0,0	26350	26639	26931	27225	27521	27820	28121	28424	28729	29037	29348	29660
25	0,0	29975	30293	30613	30935	31260	31587	31917	32249	32583	32920	33260	33602

Учебное издание

ПРАВИКОВ Юрий Михайлович

МУСЛИНА Галина Рафаиловна

ИЗМЕРЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Учебное пособие

Редактор Н.А.Евдокимова

Подписано в печать 31.10.2018. Формат 60 x 84/16.

Усл. печ. л. 8,37. Тираж 75 экз. Заказ

Ульяновский государственный технический университет,

432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.