

Нормирование точности зубчатых колес и передач

Буланова Екатерина
Александровна
Самарский университет

Назначение зубчатых передач

- Зубчатые передачи предназначены для передачи вращательного движения и момента силы с одного вала на другой с заданным отношением угловых скоростей (передаточное отношение), а также для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот

Классификация зубчатых передач

В зависимости от формы колес и взаимного расположения осей их валов зубчатые передачи подразделяются на:

- цилиндрические (оси параллельны) с внутренним и наружным зацеплением зубьев;
- конические (оси пересекаются);
- винтовые, гипоидные, червячные и др. (оси перекрещиваются)

Классификация зубчатых колес

В зависимости от расположения и формы зубьев зубчатые колеса подразделяются на:

- прямозубые;
- косозубые;
- шевронные;
- с криволинейными зубьями

В зависимости от профиля зубьев на:

- эвольвентные;
- циклоидальные;
- по дуге окружности и др.

Классификация зубчатых передач

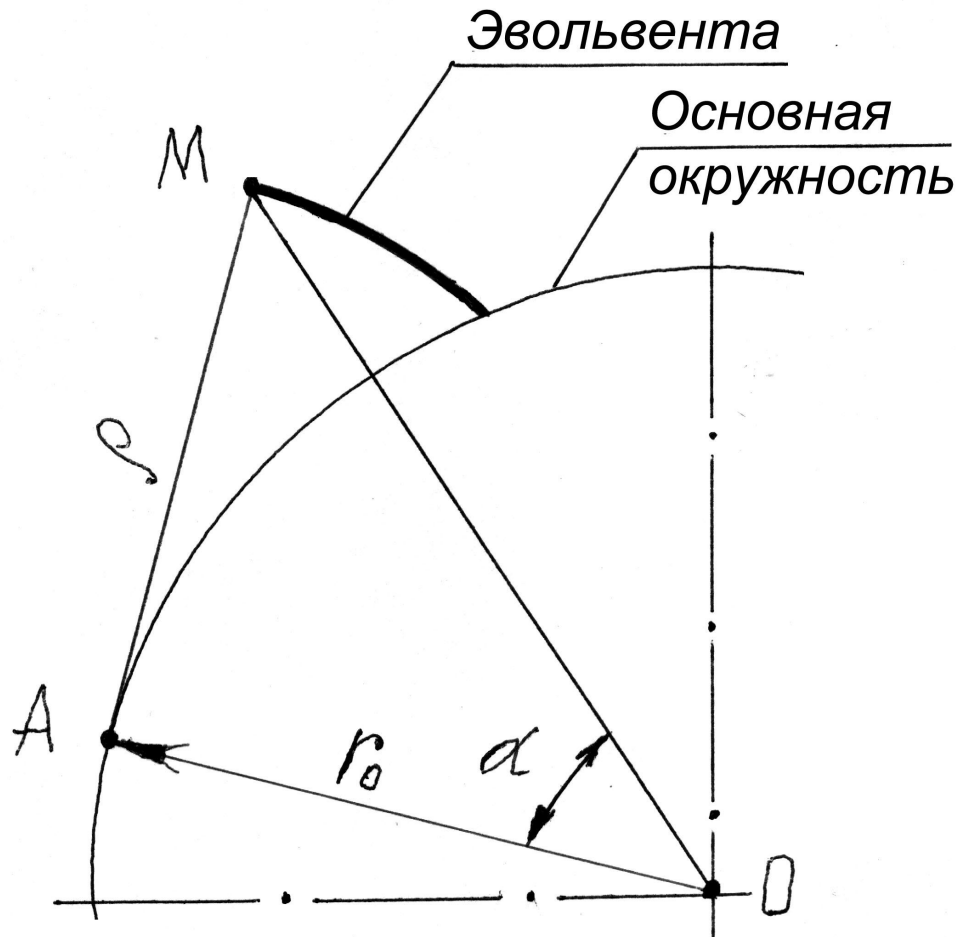
В зависимости от назначения ЗП подразделяются на:

- силовые, предназначены в основном для передачи крутящих моментов (редукторы, приводы, коробки передач и т.д.);
- кинематические (отсчетные), предназначенные для точной передачи движений с минимальными отклонениями передаточного отношения (измерительные головки, различные отсчетные устройства и т.п.).

Показатели работы зубчатой передачи зависят от окружных скоростей колес:

- тихоходные (обычно кинематические, точные и силовые передачи);
- среднескоростные (общего назначения);
- быстроходные с окружной скоростью до 120м/с

Основные параметры эвольвентной зубчатой передачи

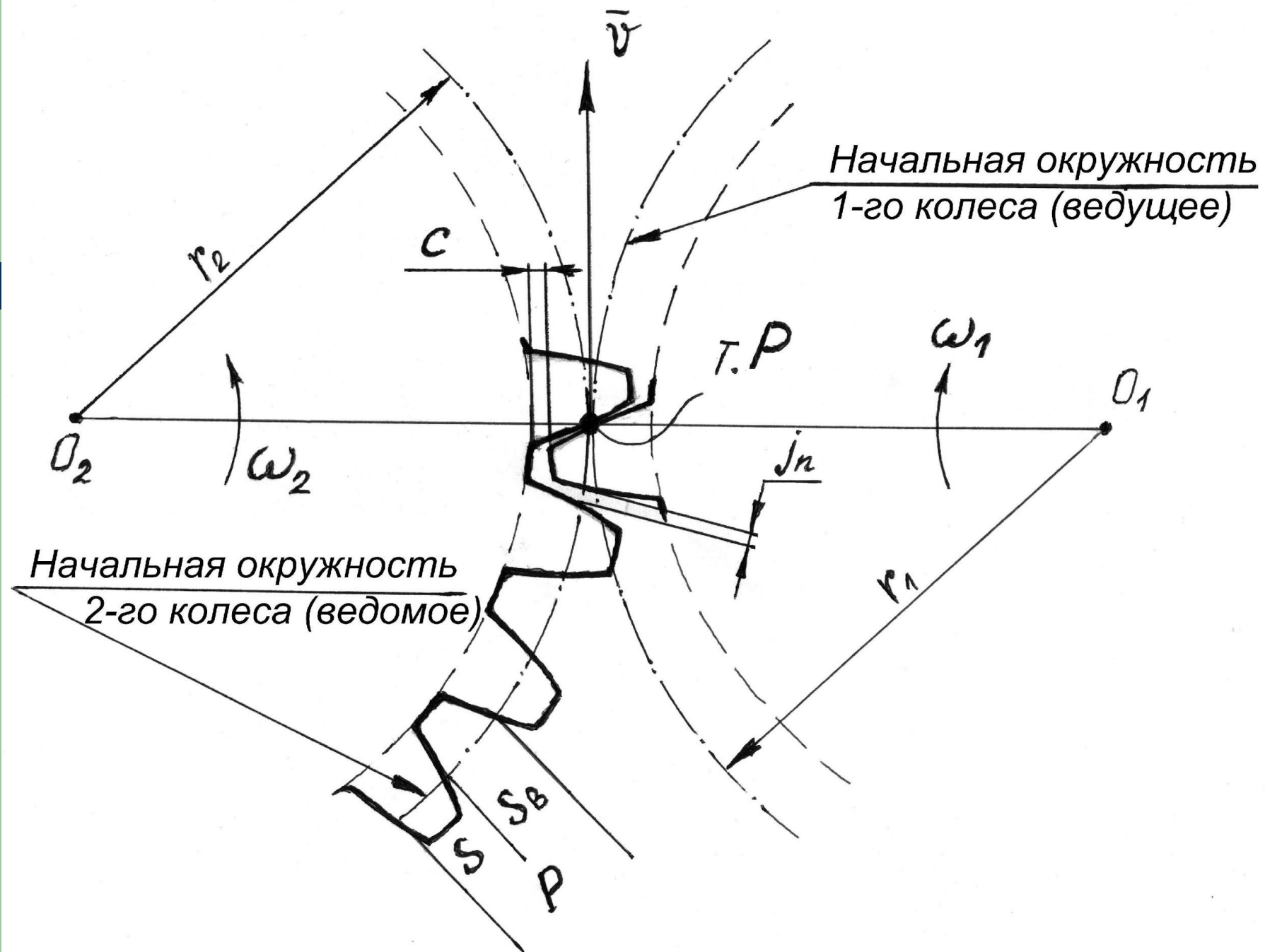


- **Эвольвентой** называется кривая, которую описывает любая точка прямой, касательной к окружности, перекатывающейся по этой окружности без скольжения. Окружность, по которой перекатывается касательная прямая, называется **основной**, а сама прямая **производящей**

Основные параметры зубчатой передачи

Основными параметрами зубчатой передачи являются:

-  шаг зубьев (P),
-  передаточное отношение (i),
-  модуль (m),
-  диаметры делительных окружностей ведущего и ведомого зубчатых колес (d_e)



Шаг зубьев

- **Шаг зубчатого колеса (P)** – это расстояние между двумя одноименными профилями (правыми или левыми) соседних зубьев, измеренное по дуге окружности. Причем

$$P = S + S_e ,$$

где S – толщина зуба, а S_e – ширина впадины между зубьями, измеренные по дуге той же окружности

Если число зубьев зубчатого колеса – z , тогда

$$2\pi \cdot r = z \cdot P ,$$

отсюда

$$P = \frac{2\pi r}{z}$$

Передаточное отношение

Окружности, по которым колеса в зубчатой передаче катятся без скольжения называются *начальными*

Точка касания этих окружностей т.Р называется ***полюсом зацепления***

Шаги по начальным окружностям сопрягаемых колес должны быть равны, т.е.

$$P_{H1} = P_{H2}$$

отсюда ,

$$r_2/r_1 = z_2/z_1$$

Линейная скорость зубчатых колес (**v**) в т.Р одинакова
т.е. **$v = \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$** отсюда ,

$$i_{12} = \omega_1/\omega_2 = r_2/r_1 = z_2/z_1$$

Делительная окружность

При увеличении радиуса одного из колес до бесконечности это зубчатое колесо превращается в так называемую рейку, так как его начальная окружность и эвольвента профиля зубьев вырождаются в прямые

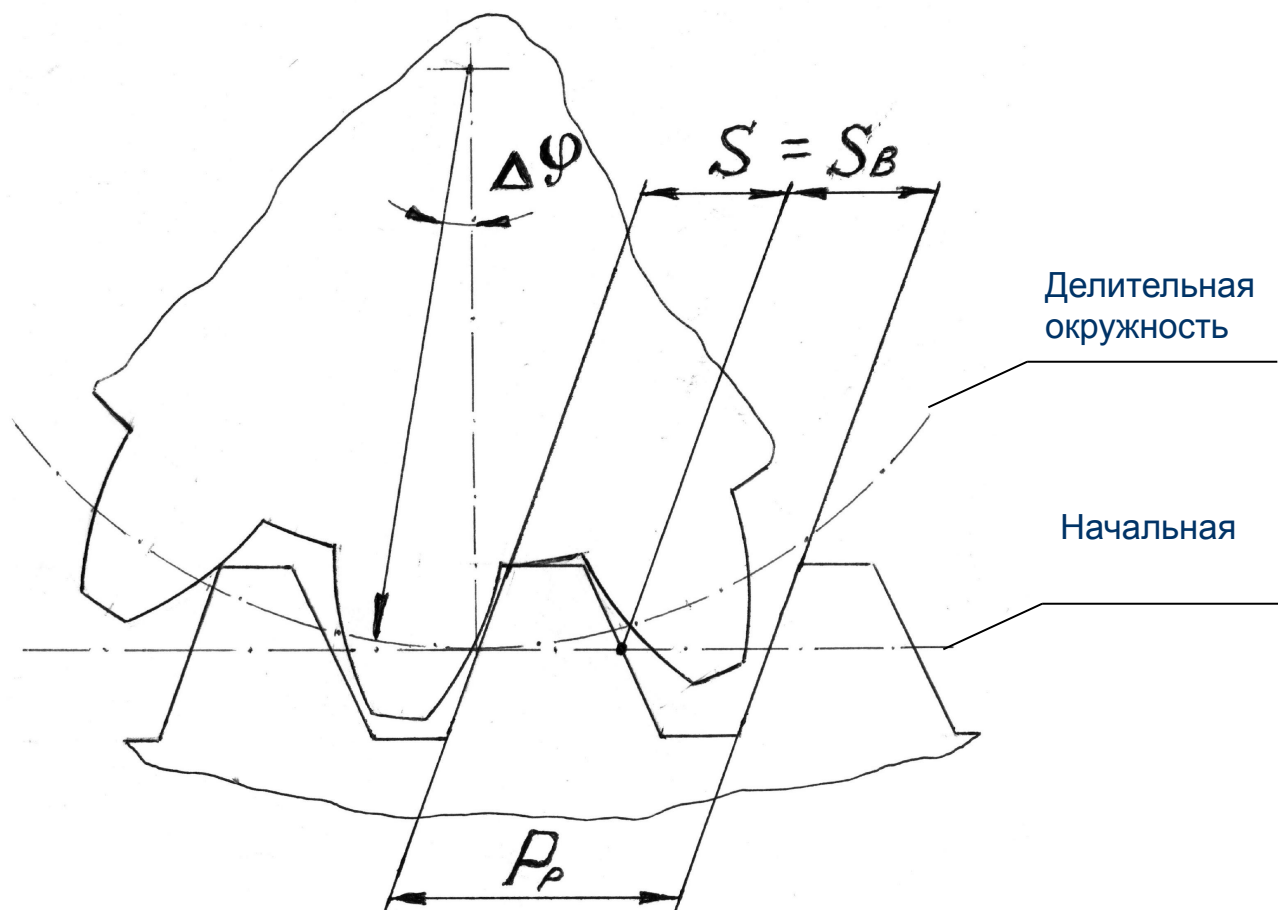
В такой рейке профиль зуба прямолинейный и следовательно шаг зубьев рейки « **P_p** » не зависит от того, по какой осевой прямой он измерен, т.е. **$P_p = \text{const}$**

В этом случае начальная окружность другого колеса, на которой шаг между зубьями равен шагу зубьев рейки, т.е. **$P_k = P_p$** называется *делительной окружностью*.

Если заточить зубья рейки определенным образом и перемещать её в осевом направлении относительно колеса, одновременно поворачивая его на некоторый угол вокруг своей оси, можно нарезать колесо с зубьями, имеющими эвольвентный профиль.

Рейка, предназначенная для нарезания зубчатых колес, называется *производящей*

Реечное зацепление



Модуль зацепления

Для того, чтобы производящая рейка нарезала колесо с заданным числом зубьев, необходимо, чтобы начальная прямая рейки катилась без скольжения по делительной окружности нарезаемого колеса, на которой шаг зубьев колеса равен шагу зубьев рейки

Однако значение шага – число иррациональное, для устранения этого неудобства был введен другой основной размерный параметр зубчатых зацеплений – модуль «***m***», равный отношению диаметра делительной окружности зубчатого колеса «***d_e***» к числу его зубьев «***z***», т.е.

$$m = \frac{d_e}{z}$$

Диаметры делительных окружностей сопрягаемых зубчатых колес будут определяться по формулам:

$$d_{e1} = mz_1 \quad \text{и} \quad d_{e2} = mz_2$$

Погрешности зубчатых колес

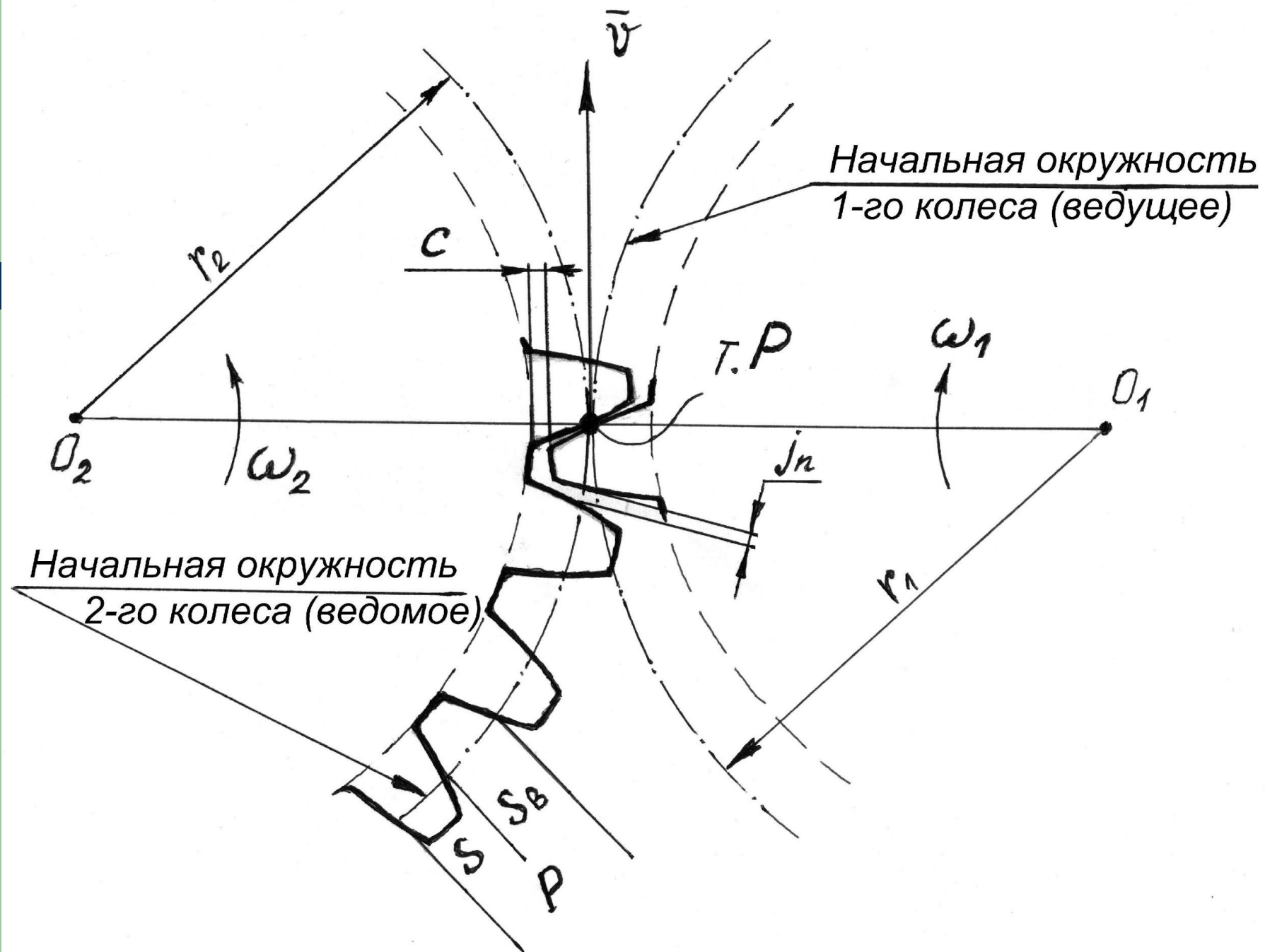
- неточность профиля зуборезного инструмента;
- неточность установки на станке как инструмента, так и заготовки;
- отклонение формы и размеров заготовки

Параметры зубчатой передачи, оказывающие наибольшее влияние на её работу

- делительное межосевое расстояние $a_w = O_1O_2$, причем

$$a_w = 0,5(d_{e1} + d_{e2});$$

- радиальный зазор «с» - наименьшее расстояние по межосевой линии между поверхностями вершин зубьев одного колеса и поверхностями впадин другого;
- боковой зазор « j_n » - минимальное расстояние между несоприкасающимися нерабочими профилями зубьев находящимися в зацеплении



Погрешности изготовления зубчатых колес

- кинематические, влияющие на точность передачи вращения от одного колеса к другому;
- погрешности плавности работы, из-за которых возникают высокие динамические нагрузки на зубьях, особенно в скоростных передачах;
- погрешности полноты контакта зубьев, имеют важное значение для силовых передач;
- погрешности, приводящие к изменению бокового зазора

Норма кинематической точности

предусматривает четыре комплексных показателя и пять комплексов по два поэлементных показателя точности

Показатель точности или комплекс	Степень точности									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
F'_{ir}	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
F_{Pr} и F_{Pkr}	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
F_{Pr}	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
F_{cr} и F_{rr}	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
F_{vWr} и F_{rr}	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
F_{vWr} и F''_{ir}	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
F_{cr} и F''_{ir}	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-
F''_{ir}	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
F_{rr}	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+

Норма плавности работы

предусматривает семь комплексных и два комплекса по два
поэлементных показателя точности

Показатель точности или комплекс	Степень точности									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
f_{zkr}	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
f'_{ir}	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
f_{Pbr} и f_{fr}	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
f_{Pbr} и f_{Ptr}	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
f_{zzr}	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
f''_{ir}	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
f_{Ptr}	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
f_{Pbr}	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
f_{vPtr}	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-

Норма кинематической точности

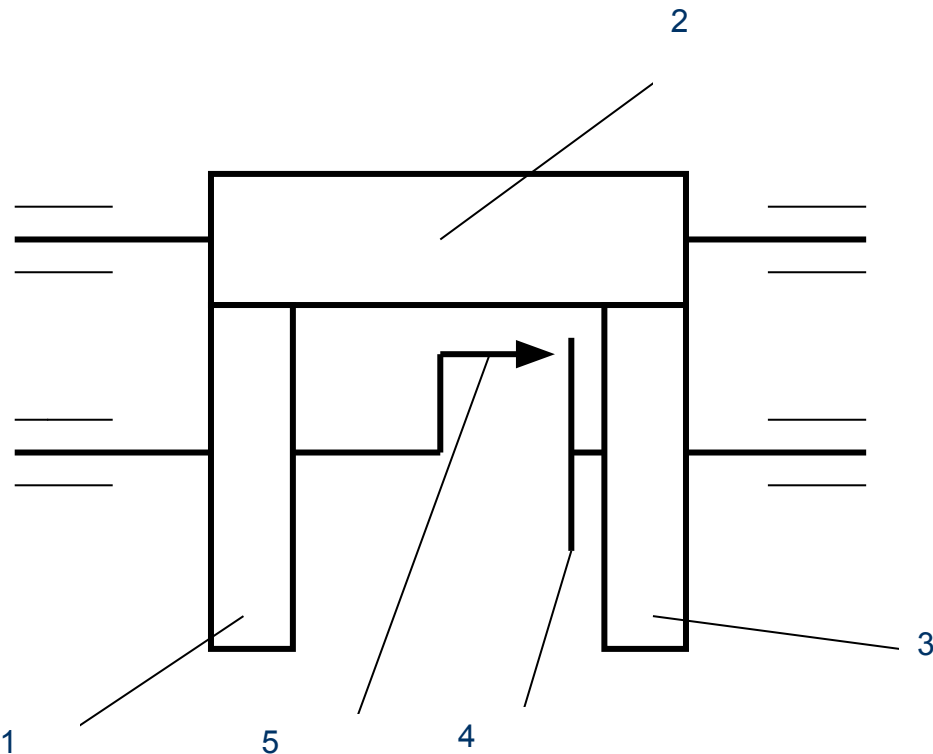
Контроль точности зубчатого колеса по нормам кинематической точности и плавности работы может производиться с использованием эталонных колес или с использованием специальных измерительных средств

При контроле с помощью эталонных колес контролируемое колесо вводится в зацепление с эталонным и проворачивается на один оборот, при этом фиксируется величина отклонения угла поворота контролируемого колеса по градусной шкале от угла поворота эталонного, т.е. величина ***кинематической погрешности колеса***:

$$F_{к.п.к.} = \varphi_r - \varphi_n,$$

где φ_r – действительный угол поворота контролируемого колеса; φ_n – угол поворота эталонного колеса

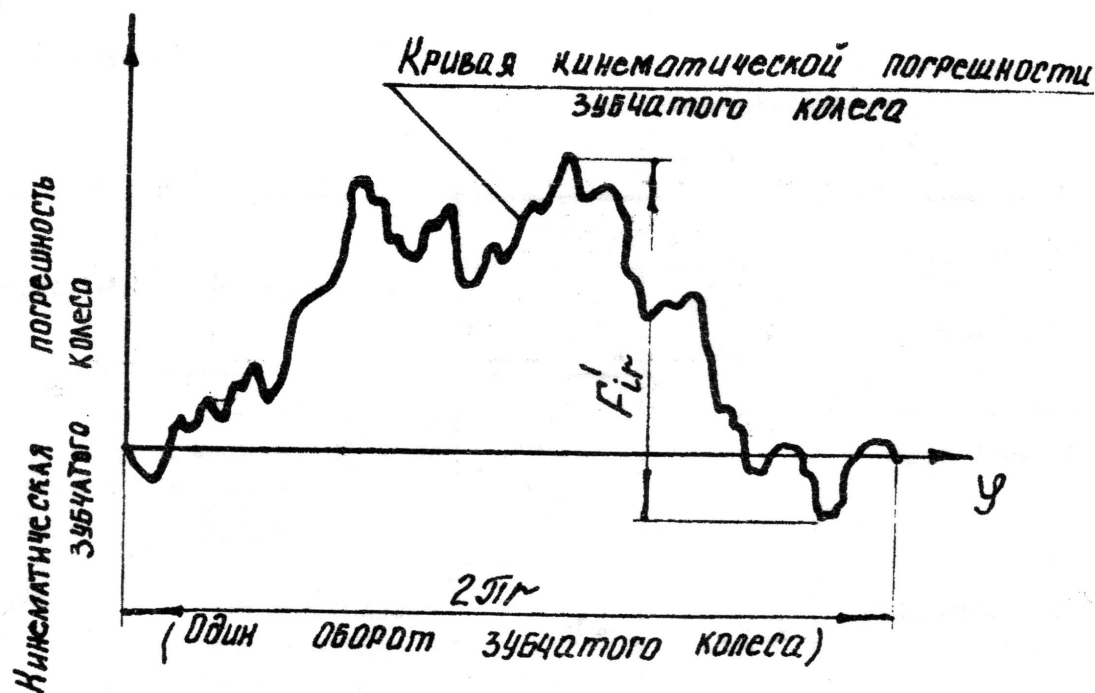
Прибор Тайца



- 1- контролируемое колесо;
- 2,3 -эталонные колеса;
- 4 - диск с градусной шкалой;
- 5 - стрелка

График зависимости кинематической погрешности контролируемого ($F_{к.п.к}$) колеса от угла его поворота

F'_{ir} – наибольшая кинематическая погрешность зубчатого колеса



Накопленная погрешность шага

Накопленная погрешность шага зубчатого колеса F_{Pr} и накопленная погрешность на « k » шагах F_{Pkr} определяется по кривой накопленных отклонений шага

Накопленная погрешность на « k » шагах может быть рассчитана по формуле:

$$F_{Pkr} = \frac{(\varphi_r - k) \cdot 2\pi}{Z} \cdot r_e$$

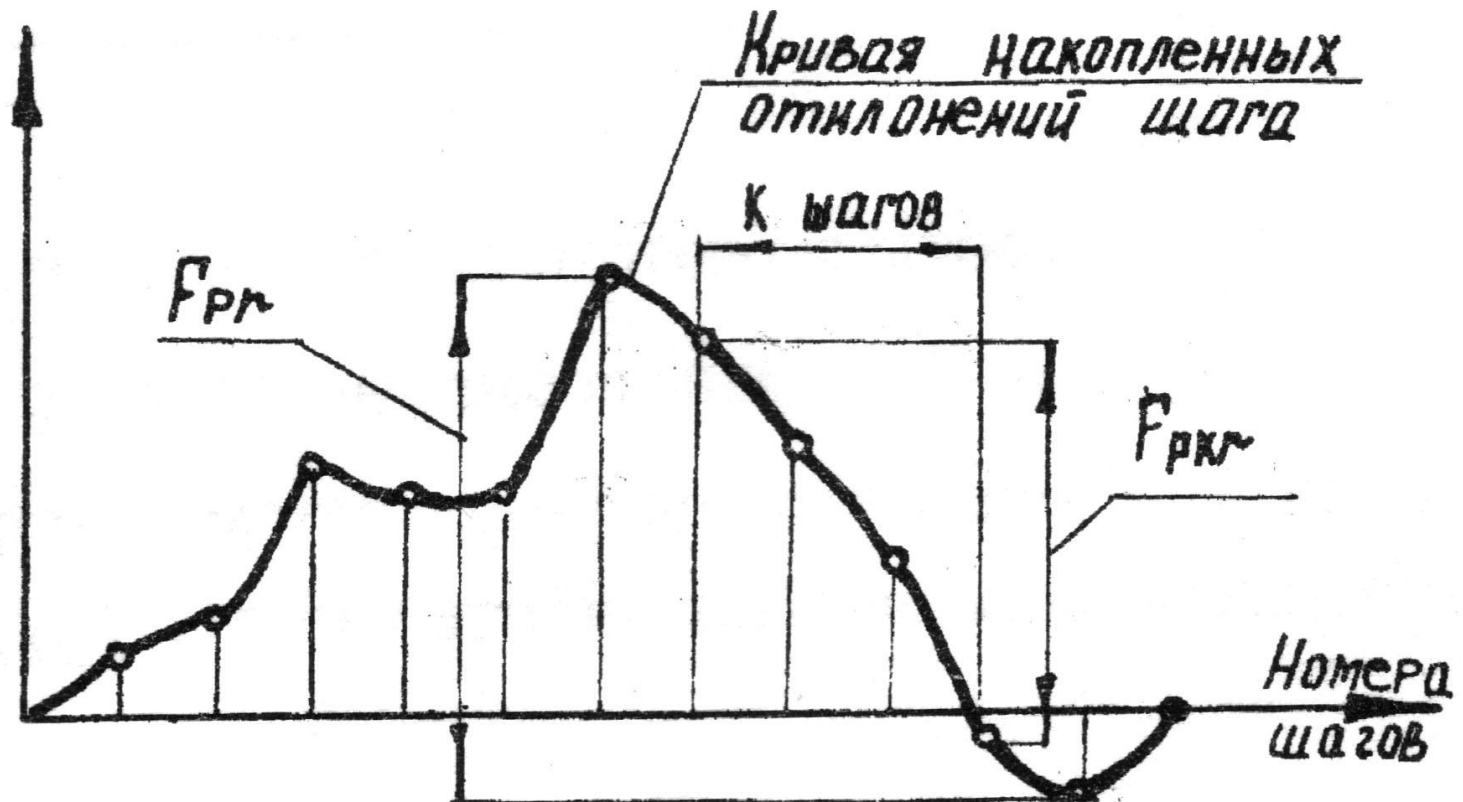
где φ_r - действительный угол поворота колеса;

Z - число зубьев колеса;

k - число целых угловых шагов начиная от $k > 2$

r_e - радиус делительной окружности колеса

График накопленной погрешности шага



φ_r - действительный угол поворота колеса; z - число зубьев колеса; k - число целых угловых шагов начиная от $k > 2$; r - радиус делительной окружности колеса

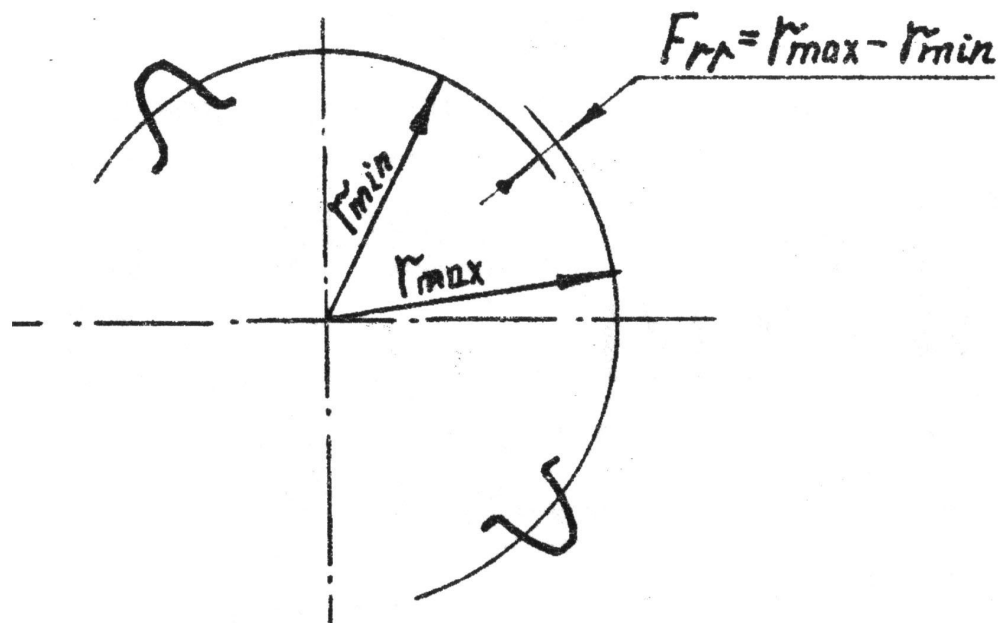
Радиальное биение зубчатого колеса

Показатель F_{rr} – радиальное биение зубчатого колеса

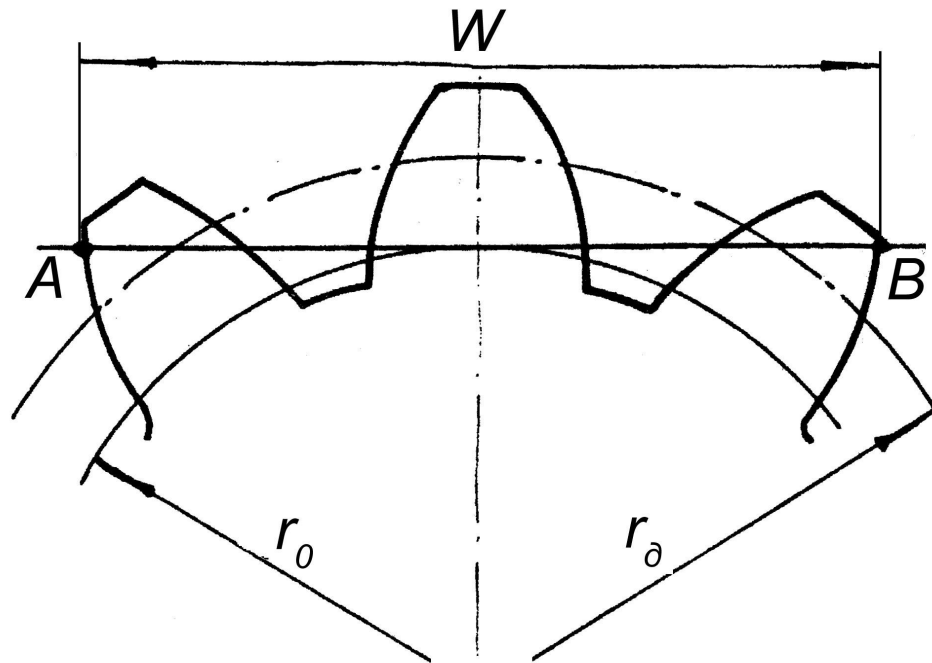
r_{max} и r_{min} – соответственно максимальный и минимальный радиусы делительной окружности зубчатого колеса.

$$F_{rr} = r_{max} - r_{min}$$

Биение зубчатого колеса может быть измерено на специальном приборе, который называется биениемер

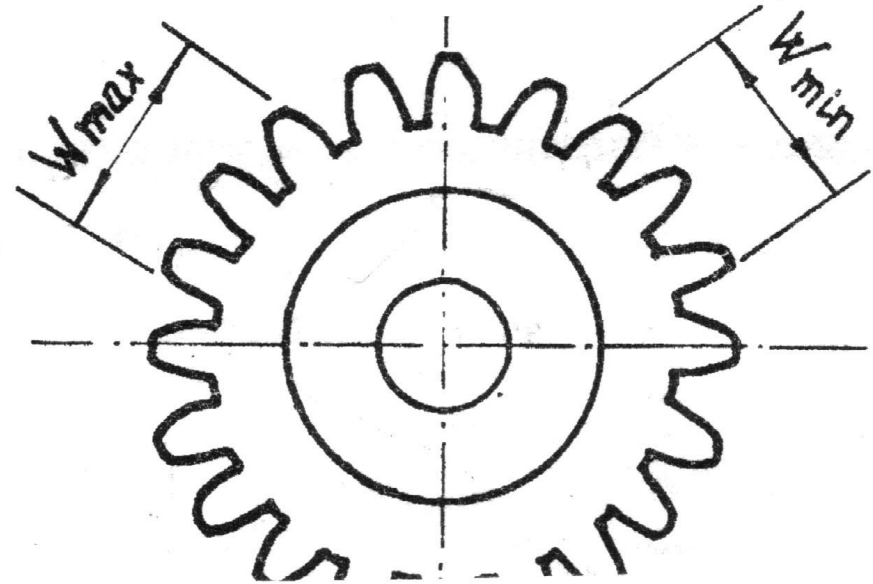


Длина общей нормали - это расстояние между точками «А» и «В» на разноименных профилях зубьев по прямой, проходящей касательно к основной окружности зубчатого колеса



W – длина общей нормали; **r_0** – радиус основной окружности; **r_a** – радиус делительной окружности зубчатого колеса

Колебание длины общей нормали



Показатель F_{vwr} – колебание длины общей нормали

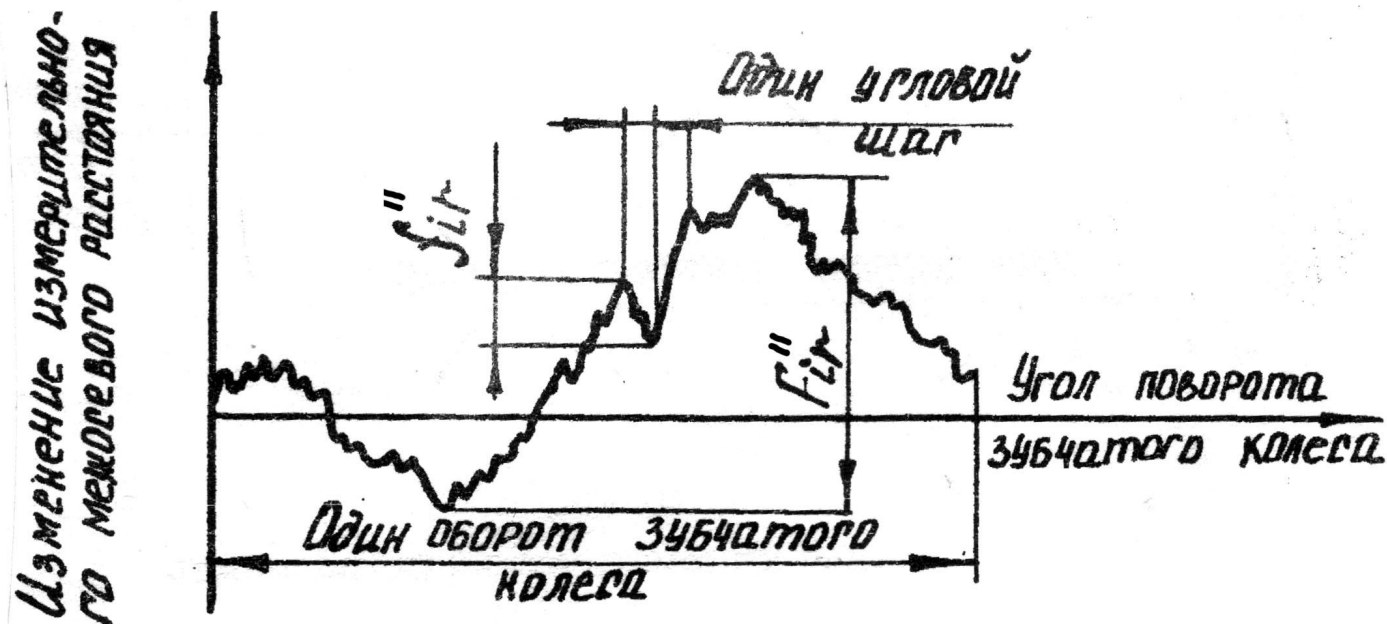
Номинальное значение общей нормали определяется по формуле

$$W = m \cos \alpha_d [0,5\pi(2n-1) + z \cdot \text{inv } \alpha_d],$$

где m - модуль зубчатого колеса; z – число зубьев колеса; $\text{inv } \alpha_d$ - инвалюта угла исходного контура; $\alpha_d = 20^\circ$ – угол исходного контура (угол зацепления); $n = 0,111z + 0,5$ – число зубьев, охватываемых при измерении (округляется до целого)

Изменение измерительного межосевого расстояния по углу поворота колеса

Показатель F''_{ir} – колебание измерительного межосевого расстояния за один оборот зубчатого колеса, т.е. разность между наибольшим и наименьшим действительными межосевыми расстояниями в зацеплении эталонного и контролируемого зубчатых колес при повороте контролируемого колеса на полный оборот. F''_{ir} – колебание измерительного межосевого расстояния за один оборот зубчатого колеса, f''_{ir} – на одном зубе



Норма плавности работы зубчатого колеса

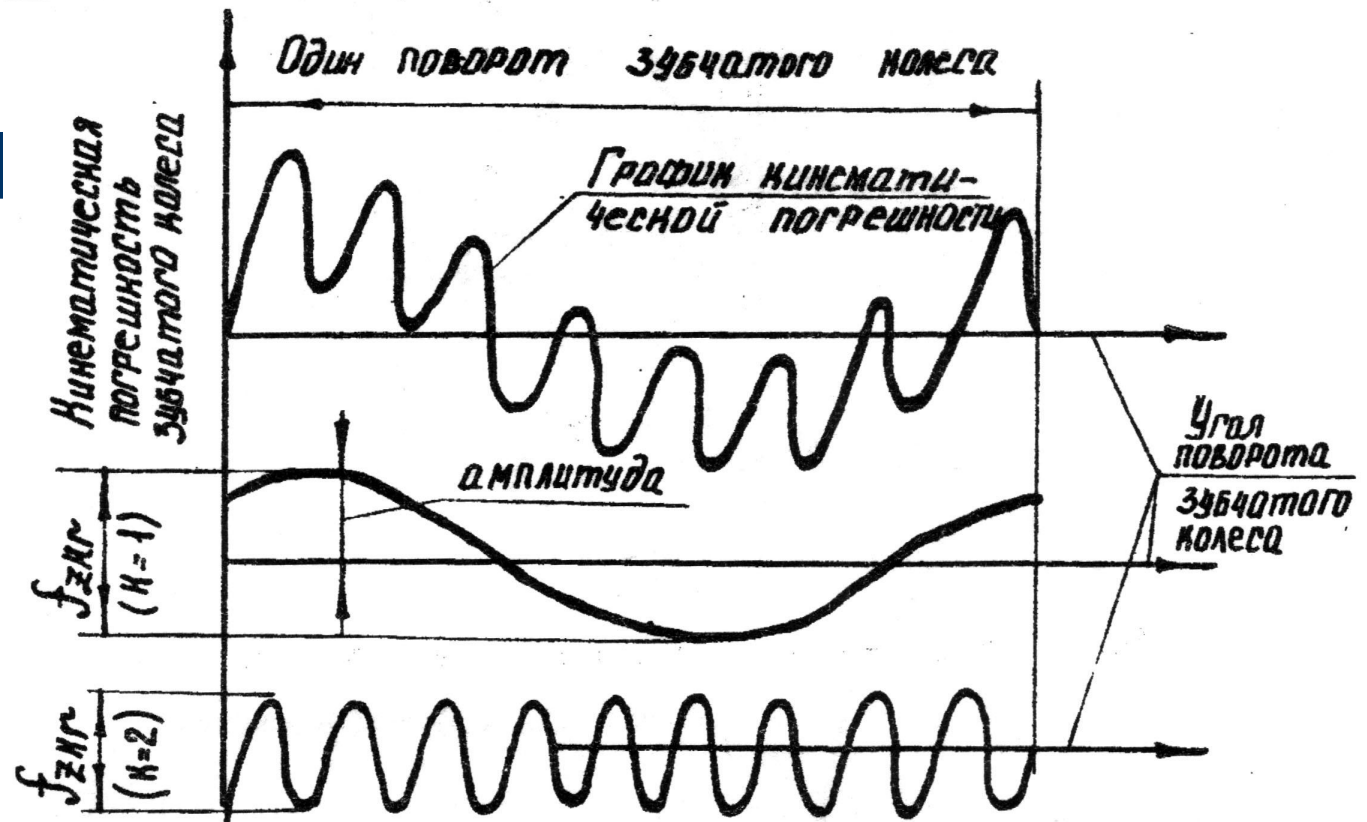
Плавность работы зубчатого колеса составляет часть кинематической погрешности, которая многократно (циклически) проявляется за время одного оборота колеса

Кинематическую погрешность можно представить в виде спектра гармонических составляющих, амплитуда и частота которых зависят от причин вызывающих погрешности угла поворота.

Например, отклонение шага зубчатого колеса вызывает колебания кинематической погрешности с *зубцовой* частотой, равной частоте входа в зацепление зубьев колеса.

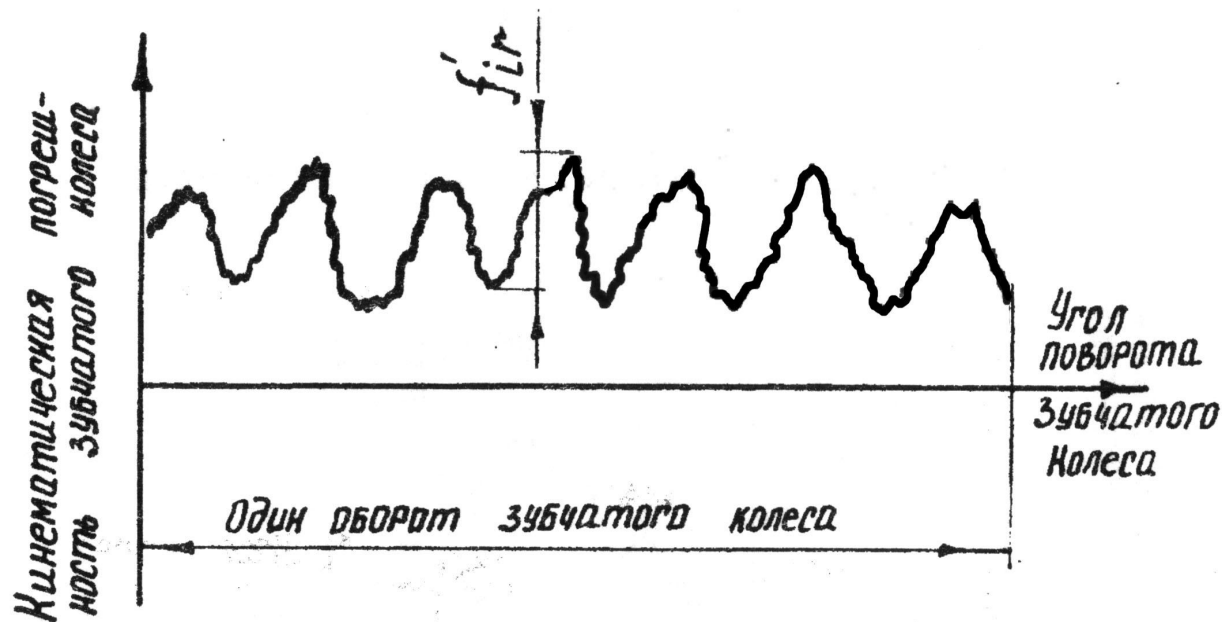
Если все гармонические составляющие сложить, то снова получится график кинематической погрешности колеса ***F_к***.
П.К.

Циклическая погрешность зубчатого колеса



- Показатель f_{zkr} — циклическая погрешность зубчатого колеса, это удвоенная амплитуда гармонической составляющей кинематической погрешности зубчатого колеса

Местная кинематическая погрешность зубчатого колеса



Показатель f'_{ir} – местная кинематическая погрешность зубчатого колеса, это наибольшая разность между местными соседними экстремальными (минимальными и максимальными) значениями кинематической погрешности зубчатого колеса в пределах его оборота

Показатель f_{pbr} – отклонение шага зацепления, это разность между действительным и номинальным шагами зацепления

Действительный и номинальный шаг зацепления

Под действительным шагом зацепления (P_d) понимается кратчайшее расстояние между двумя параллельными плоскостями, касательными к двум одноименным активным боковым поверхностям соседних зубьев зубчатого колеса

Номинальное значение шага зацепления определяется по формуле

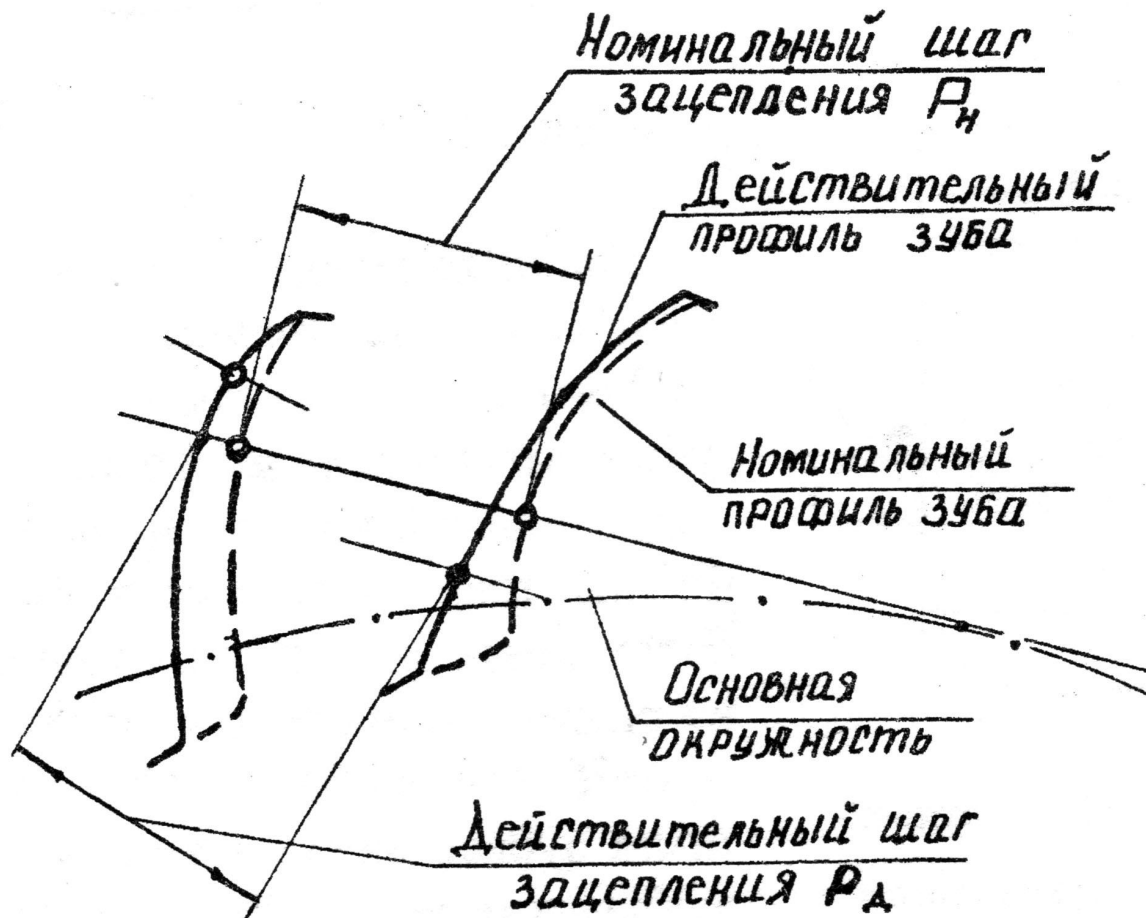
$$P_o = \pi \cdot m \cos \alpha_d,$$

где $\alpha_d = 20^\circ$ – угол зацепления, тогда

$$P_o = 2,951 m.$$

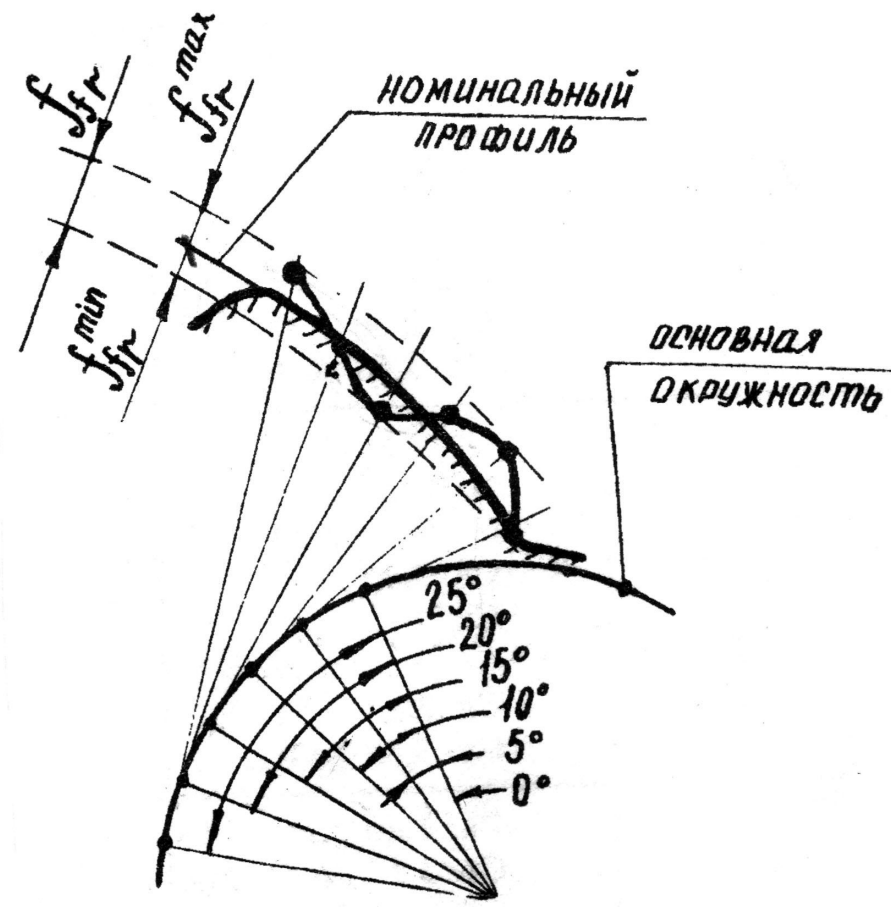
$$f_{Pbr} = P_d - P_o, \text{ МКМ}$$

Шаги зацепления зубчатого колеса



Отклонение формы действительного профиля зуба

Показатель f_{fr} — погрешность профиля зуба, это расстояние по нормали между двумя номинальными торцовыми профилями, проходящими касательно к действительному профилю



Другие показатели кинематической точности

Показатель f_{Ptr} – дискретное значение кинематической погрешности зубчатого колеса при его повороте на один номинальный угловой шаг при $k = 1$

Показатель f_{zrz} – циклическая погрешность зубцовой частоты зубчатого колеса, это циклическая погрешность зубчатого колеса при зацеплении с эталонным колесом с частотой повторений, равной частоте входа зубьев в зацепление

$$f_{fr} = f_{frmax} - f_{frmin}$$

Показатель f''_{ir} – колебание измерительного межосевого расстояния на одном зубе, это разность между наибольшим и наименьшим действительными межосевыми расстояниями в зацеплении эталонного и контролируемого зубчатых колес при повороте контролируемого колеса на один угловой шаг

Показатель f_{vPtr} – разность шагов, т.е. разность между двумя отклонениями шагов в любых участках зубчатого колеса

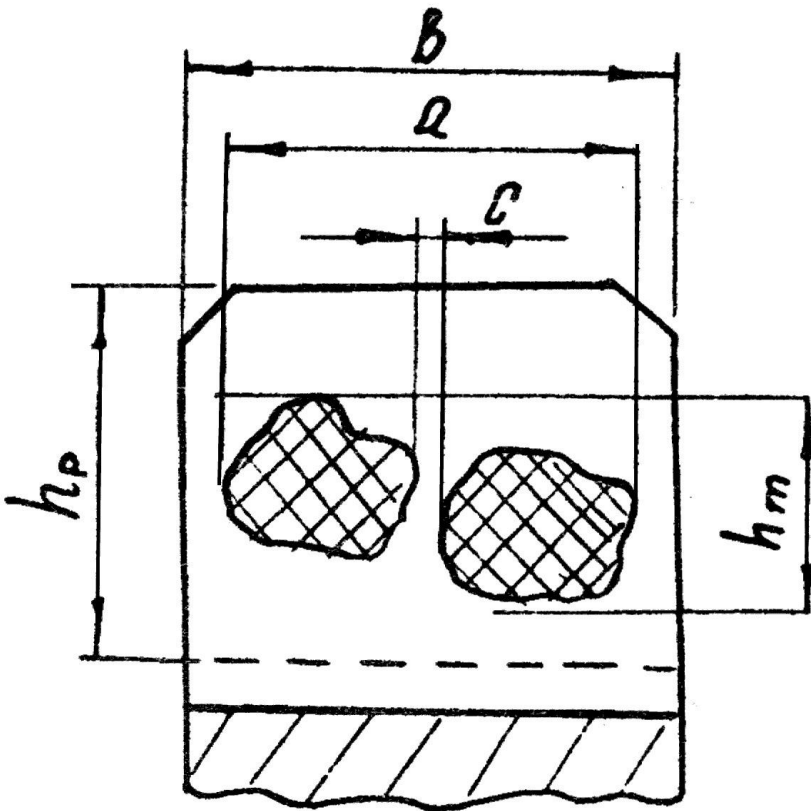
Норма контакта зубчатых колес

Показателем, определяющим норму контакта зубьев в передаче, является **суммарное пятно контакта**.

Контроль контакта зубчатых колес производится следующим образом: на рабочие поверхности зубьев эталонного колеса наносится специальная краска, контролируемое колесо вводится в зацепление с эталонным и колеса проворачиваются на один оборот под нагрузкой, установленной конструктором.

В результате, на рабочих поверхностях зубьев контролируемого колеса остаются отпечатки краски, по размерам этих отпечатков и определяется степень точности по норме контакта

Суммарное пятно контакта



- Относительные размеры пятна контакта по ширине зуба:

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

- относительные размеры пятна контакта по высоте зуба:

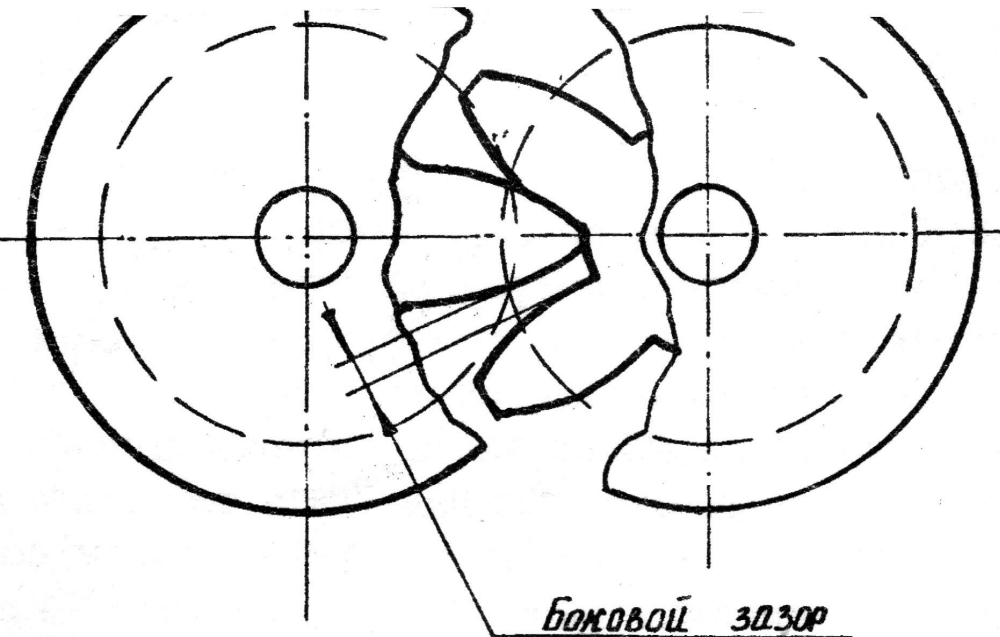
$$\frac{h_n}{h_p} \cdot 100\%$$

Комбинирование норм

Стандарт предусматривает комбинирование норм кинематической точности, норм плавности работы и норм контакта зубьев зубчатых колес и передач разных степеней точности

При этом нормы плавности могут быть не более чем на две степени точнее или на одну степень грубее норм кинематической точности, а нормы контакта зубьев могут назначаться по любым степеням, более точным и на степень грубее, чем нормы плавности

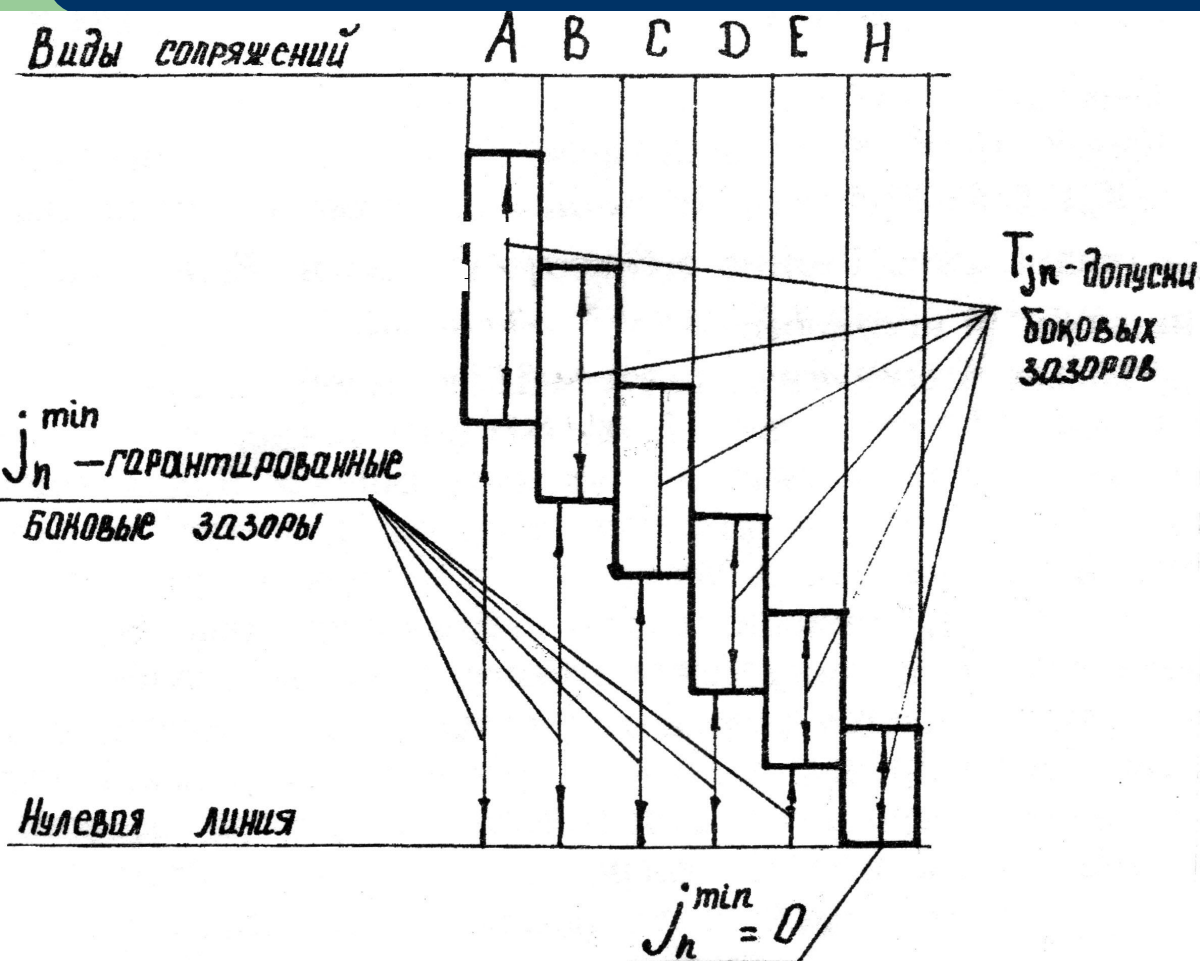
Боковой зазор



Для создания нормальных условий работы зубчатой пары (смазки, компенсации погрешностей изготовления и монтажа, температурной деформации) стандартом предусматривается зазор между зубьями сопряжённых колёс в передаче

Зазор определяется в сечении, перпендикулярном направлению зубьев, в плоскости, касательной к основным цилиндрам колёс

Виды сопряжения



В зависимости от величины гарантированного бокового зазора (j_{nmin}) стандартом установлено шесть видов сопряжения зубчатых колес в передаче:

A, B, C, D, E, H

и восемь видов допуска на боковой зазор, обозначаемых в порядке уменьшения буквами:

x, y, z, a, b, c, d, h

Зависимость вида сопряжения от степени точности по норме плавности работы

Вид сопряжения	A	B	C	D	E	H
Степень точности по нормам плавности	3 - 12	3 - 11	3 - 9	3 - 8	3 - 7	3 - 7

Видам сопряжения **H** и **E** соответствует вид допуска **h**, а видам сопряжения **A, B, C, D** – виды допуска **a, b, c, d** соответственно

Соответствие между видом сопряжения зубчатых колес в передаче и видом допуска на боковой зазор допускается изменять, при этом также могут быть использованы виды допусков **x, y, z**

Условное обозначение точности зубчатых колес

7 – С ГОСТ 1643 – 81

Такое колесо не должно иметь отклонений параметров, превышающих нормы кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев по 7-й степени точности, вид сопряжения «С» и вид допуска на боковой зазор «с»

При комбинировании норм разных степеней точности и изменении соответствия между видом сопряжения и видом допуска на боковой зазор условное обозначение точности зубчатого колеса должно включать степень точности по каждой норме, вид сопряжения и вид допуска, например: степень кинематической точности – 8, по нормам плавности – 7, по нормам контакта – 6, вид сопряжения «В», вид допуска на боковой зазор «а»

8 – 7 – 6 Ва ГОСТ 1643-81

Гарантированный боковой зазор

Допускается изменять соответствие между видом сопряжения и классом точности делительного межосевого расстояния. При выборе более грубого класса точности делительного межосевого расстояния, чем предусмотрено для данного вида сопряжения, в условном обозначении точности зубчатой передачи указываются принятый класс и гарантированный боковой зазор, рассчитанный по формуле:

$$j'_{nmin} = j_{nmin} - 0,68(|f'a| - |fa|),$$

где j_{nmin} и fa - табличные значения соответственно гарантированного бокового зазора и предельного отклонения делительного межосевого расстояния для данного вида сопряжения;

$f'a$ – отклонение делительного межосевого расстояния для более грубого класса;

j'_{nmin} - рассчитанный гарантированный боковой зазор

Классы точности зубчатых передач

Стандартом предусмотрено шесть классов точности зубчатых передач в зависимости от погрешности делительного межосевого расстояния (a_w), обозначаемых в порядке убывания точности римскими цифрами от **I** до **VI**

Гарантированный боковой зазор в каждом зубчатом сопряжении обеспечивается при соблюдении предусмотренных классов точности делительного межосевого расстояния: для сопряжений **H** и **E** – **II**-й класс, а для сопряжений **A**, **B**, **C**, **D** – соответственно **VI**, **V**, **IV** и **III**

Обозначение класса точности зубчатой передачи

Пример обозначения точности цилиндрической передачи

с 7-й степенью точности по всем нормам

с видом зацепления «С», видом допуска на боковой зазор «а»

с V-ым классом точности делительного межосевого расстояния с рассчитанным гарантированным боковым зазором $j'_{nmin} = 128$ мкм:

7 – Ca/ V – 128 ГОСТ 1643 – 81