

**ОПД.Ф.02.03 ТЕОРИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**  
**ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПРЯМОЗУБОГО ВНЕШНЕГО**  
**ЭВОЛЬВЕНТНОГО ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ**  
Методические указания к курсовому проектированию

Излагаются основы теории эвольвентного зубчатого зацепления.

Рассматривается методика определения коэффициентов смещения инструмента при нарезании зубчатых колес, определения геометрических параметров зубчатого зацепления и выполнения его чертежа.

# ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПРЯМОЗУБОГО ВНЕШНЕГО ЭВОЛЬВЕНТНОГО ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Задачей геометрического синтеза зубчатого зацепления является определение его размеров, а также качественных характеристик (линии зацепления дуг зацепления и рабочих участков профилей зубьев), зависящих от геометрии зацепления.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Геометрический синтез зубчатого зацепления является разделом курсового проекта по дисциплине «Теория механизмов и машин». Для выполнения этого раздела в задании на курсовой проект указываются число зубьев  $Z_1$  и  $Z_2$  колеса и модуль  $m$  зубчатых колес.

## 2. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ

Раздел курсового проекта «Геометрический синтез прямозубого внешнего эвольвентного зубчатого зацепления» состоит из графической части и пояснительной записки.

Графическая часть выполняется на листе чертежной бумаги формата А1 (841×594), оформляется согласно требований ЕСКД и стандарта предприятия. Пример выполнения графической части приведен на рис. 1.

Пояснительная записка к данному разделу должна содержать следующие пункты:

- исходные данные;
- определение размеров зубчатого зацепления;
- построение элемента зубчатого зацепления;
- построение активной части линии зацепления, дуг зацепления и рабочих участков профиля зубьев.

Объем пояснительной записки 5...7 страниц.

Внешнее нулевое эвольвентное зацепление

$$K_f = 0,4 \frac{MM}{MM}$$

КП.Б0300.62.24.Д04.ОХ

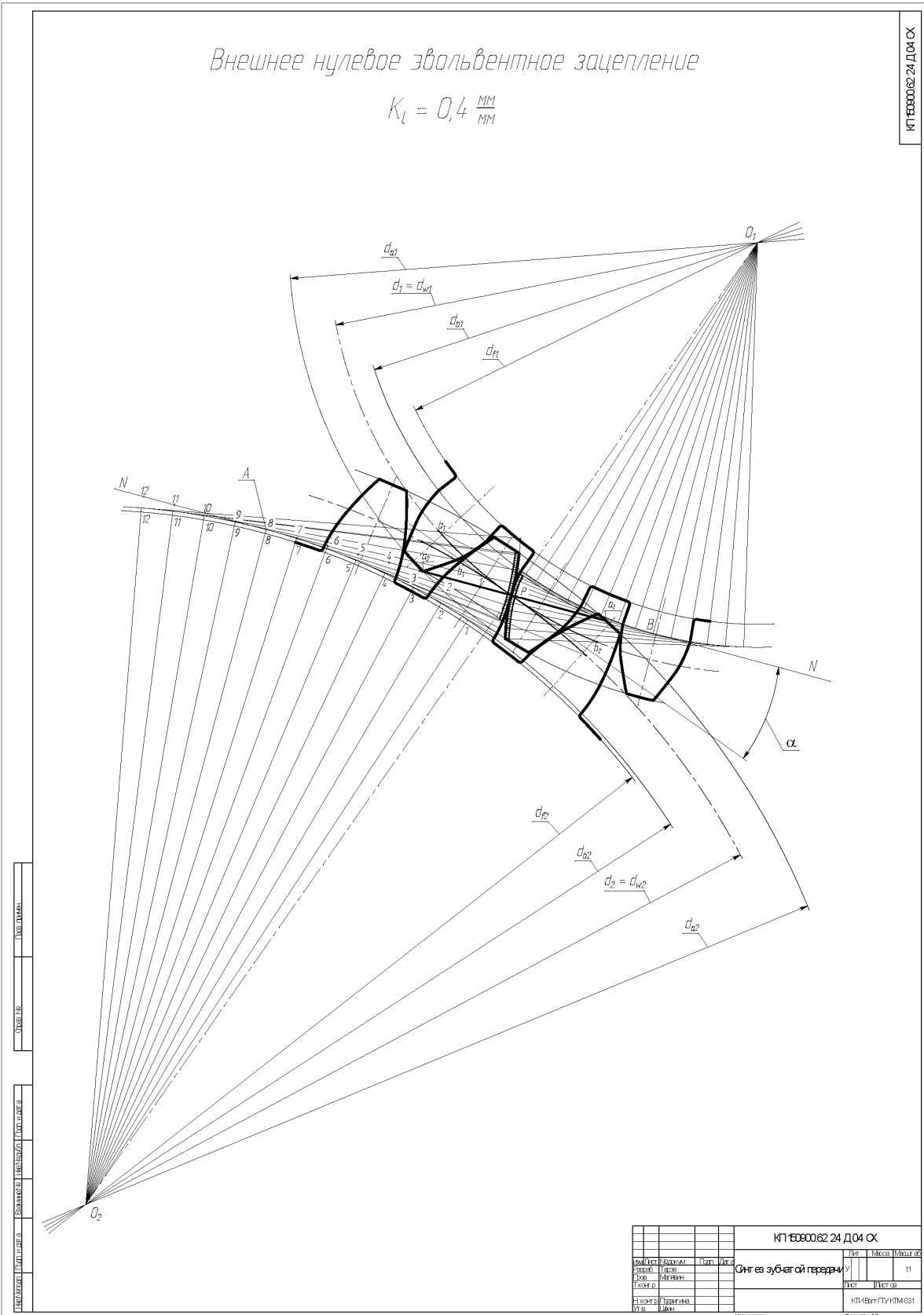


Рис. 1.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Размеры колес, а также всего зацепления, зависят от чисел  $Z_1$  и  $Z_2$  зубьев колес, от модуля  $m$  зацепления (определяемого из расчета зуба колеса на прочность), общего для обоих колес, а также от метода их обработки.

Предположим, что колеса изготавливаются по методу обкатки инструментом реечного типа (инструментальной рейкой, червячной фрезой), который профилируется на основе исходного контура согласно ГОСТ 13755-81.

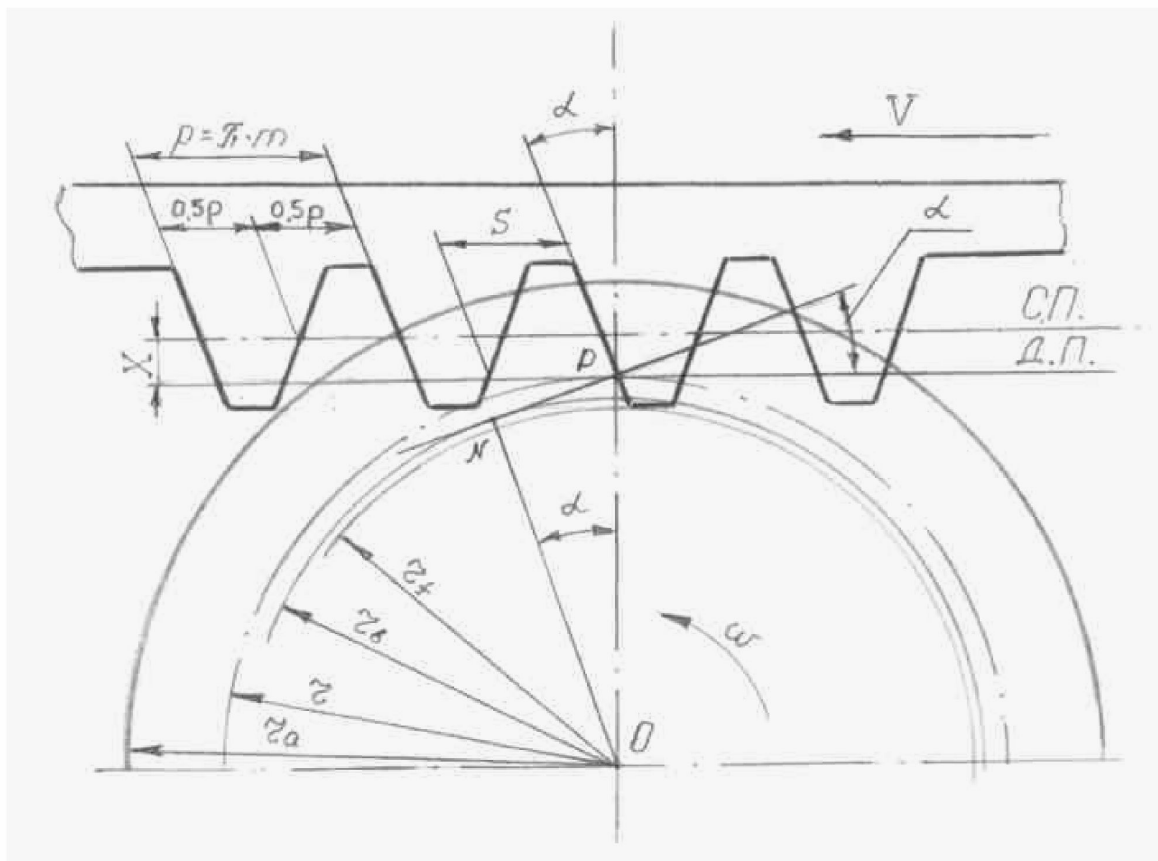


Рис. 2.

Процесс изготовления зубчатого колеса (рис. 2) инструментальной рейкой по методу обкатки заключается в том, что рейка в движении по отношению к обрабатываемому колесу перекачивается без скольжения одной из своих делительных прямых (ДП) или средней прямой (СП) по делительной окружности колеса (движение обкатки) и одновременно совершает быстрые возвратно-поступательные перемещения вдоль оси колеса, снимая при этом стружку (рабочее движение).

Расстояние между средней прямой рейки (СП) и той делительной прямой (ДП), которая в процессе обкатки перекачивается по делительной окружности колеса, называется смещением  $X$  рейки. Очевидно, что смещение  $X$  равно расстоянию, на которое отодвинута средняя прямая рейки от делительной окружности колеса. Смещение считается положительным, если средняя прямая ото-

двинута в направлении от центра нарезаемого колеса. Величина смещения  $X$  определяется формулой:

$$X = x \cdot m,$$

где  $x$  – коэффициент смещения, который имеет положительное или отрицательное значение.

Зубчатые колеса, изготовленные без смещения инструментальной рейки, называются нулевыми; изготовленные при положительном смещении рейки – положительными, при отрицательном смещении – отрицательными.

В зависимости от значений  $x_{\Sigma}$  зубчатые зацепления классифицируются следующим образом:

а) если  $x_{\Sigma} = 0$ , при чем  $x_1 = x_2 = 0$ , то зацепление называется нормальным (нулевым);

б) если  $x_{\Sigma} = 0$ , при чем  $x_1 = -x_2$ , то зацепление называется равносмещенным;

в) если  $x_{\Sigma} \neq 0$ , то зацепление называется неравносмещенным, при чем при  $x_{\Sigma} > 0$  зацепление называется положительным неравносмещенным, а при  $x_{\Sigma} < 0$  – отрицательным неравносмещенным.

Применение нормальных зубчатых колес с постоянной высотой головки зубьев и постоянным углом зацепления, вызвано стремлением получить систему сменных зубчатых колес с постоянным расстоянием между центрами для одной и той же суммы чисел зубьев, с одной стороны, и с другой стороны – сократить число комплектов зуборезного инструмента в виде модульных фрез, которыми снабжаются инструментальные мастерские. Однако условие сменности зубчатых колес при постоянном расстоянии между центрами может быть удовлетворено и при применении косозубых колес, а также колесами нарезанными со смещением инструмента. Наибольшее применение нормальные зубчатые колеса находят в передачах при значительных числах зубьев обоих колес (при  $Z_1 > 30$ ), когда эффективность применения смещения инструмента значительно меньше.

При равносмещенном зацеплении ( $x_{\Sigma} = x_1 + x_2 = 0$ ) толщина зуба ( $S_1$ ) по делительной окружности шестерни увеличивается за счет уменьшения толщины зуба ( $S_2$ ) колеса, но сумма толщин по делительной окружности сцепляющихся зубьев остается постоянной и равной шагу. Таким образом, нет необходимости в раздвигании осей колес; начальные окружности так же, как и у нормальных колес, совпадают с делительными; угол зацепления не изменяется, но меняется соотношение высот головок и ножек зубьев. В связи с тем, что прочность зубьев колеса понижается, такое зацепление может применяться только при малых числах зубьев шестерни и значительных передаточных отношениях.

При неравносмещенном зацеплении  $x_{\Sigma} = x_1 + x_2 \neq 0$  сумма толщин зубьев по делительным окружностям обычно больше, чем у нулевых колес. Поэтому оси колес приходится раздвигать, начальные окружности не совпадают с делительными и угол зацепления увеличен. Неравносмещенное зацепление имеет большие возможности, чем равносмещенное, и поэтому имеет более широкое распространение.

Применяя смещение инструмента при нарезании зубчатых колес можно повысить качество зубчатого зацепления:

- а) устранить подрезание зубьев шестерни при малом числе зубьев;
- б) повысить прочность зубьев на изгиб (до 100 %);
- в) повысить контактную прочность зубьев (до 20 %);
- г) повысить износостойкость зубьев и др.

Но следует иметь в виду, что улучшение одних показателей ведет к ухудшению других.

Существуют простые системы, которые позволяют определить смещение по простейшим эмпирическим формулам. Эти системы повышают показатели работы передач по сравнению с нулевыми, однако они не используют все возможности смещения.

В соответствии с рекомендациями ISO предложены следующие правила выбора коэффициентов смещения:

- а) при числе зубьев шестерни  $Z_1 \geq 30$  применяют нормальные колеса;
- б) при числе зубьев шестерни  $Z_1 < 30$  и суммарном числе зубьев  $Z_1 + Z_2 > 60$  применяют равносмещенное зацепление с коэффициентами смещения  $x_1 = 0,03 \cdot (30 - Z_1)$  и  $x_2 = -x_1$ ;
- в) при суммарном числе зубьев  $Z_1 + Z_2 < 60$  применяют неравносмещенное зацепление коэффициентами  $x_1 = 0,03 \cdot (30 - Z_1)$  и  $x_2 = 0,03 \cdot (30 - Z_2)$ .

Суммарное смещение ограничивается величиной:

$$x_{\Sigma} = x_1 + x_2 \leq 0,9, \text{ если } (Z_1 + Z_2) < 30,$$

$$\text{и: } x_{\Sigma} \leq 1,8 - 0,03 \cdot (Z_1 + Z_2), \text{ если } 30 < (Z_1 + Z_2) < 60.$$

Для ответственных передач коэффициенты смещения следует выбирать в соответствии с основными критериями работоспособности.

В настоящем руководстве приведены таблицы 1...3 для неравносмещенного зацепления, составленные профессором В. Н. Кудрявцевым, и табл. 4 для равносмещенного зацепления, составленная Центральным конструкторским бюро редуكتورостроения.

Таблицы содержат значения коэффициентов  $x_1$  и  $x_2$ , сумма которых  $x_{\Sigma}$  является максимально возможной при выполнении следующих требований:

- а) не должно быть подрезания зубьев при обработке их инструментальной рейкой;
- б) предельно допустимая толщина зуба по окружности выступов принята  $0,3 m$ ;
- в) наименьшее значение коэффициента перекрытия  $\varepsilon_{\alpha} = 1,1$ ;
- г) обеспечение наибольшей контактной прочности;
- д) обеспечение наибольшей прочности на изгиб и равнопрочности (равенства напряжений изгиба) зубьев шестерни и колеса, изготовленных из одинакового материала с учетом разного направления сил трения на зубьях;

е) наибольшей износостойкости и наибольшего сопротивления заданного (равенство удельных скольжений в крайних точках зацепления).

Данными таблицами нужно пользоваться следующим образом:

а) для неравномерного внешнего зацепления коэффициенты смещения  $x_1$  и  $x_2$  определяются в зависимости от передаточного отношения

$i_{1,2}$ : при  $2 \geq i_{1,2} \geq 1$  по табл. 1; при  $5 \geq i_{1,2} > 2$  по табл. 2, 3 по заданным  $Z_1$  и  $Z_2$ .

б) для равносмещенного внешнего зацепления коэффициенты смещения  $x_1$  и  $x_2 = -x_1$  определяют в табл. 4. При подборе этих коэффициентов нужно помнить, что должно быть выполнено условие  $Z_\Sigma \geq 34$ .

После определения коэффициентов смещения все размеры зацепления подсчитываются по формулам, приведенным в табл. 5.

#### 4. ВЫЧЕРЧИВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Подсчитав все размеры элементов зацепления по формулам, приведенным в табл. 5., приступаем к вычерчиванию зубчатого зацепления.

Масштаб построения выбираем таким, чтобы высота зуба на чертеже была не менее 50 мм.

Профили зубьев вычерчиваем в такой последовательности:

4.1. На линии центров колес (рис. 3) от точки  $P$  (полюса зацепления) откладываем радиусы  $r_{w_1}$  и  $r_{w_2}$  начальных окружностей и строим их, а затем основные окружности радиусами  $r_{e_1}$  и  $r_{e_2}$ .

4.2. Строим эвольвенты, которые описывают точки  $P$  прямой  $AB$  при перекачивании ее по основной окружности.

При построении 1-й эвольвенты откладываем на основной окружности колеса 2 от точки  $A$  (рис. 3) дугу  $AP_1$ , равную длине отрезка  $AP$ , пользуясь известным построением (рис. 3).

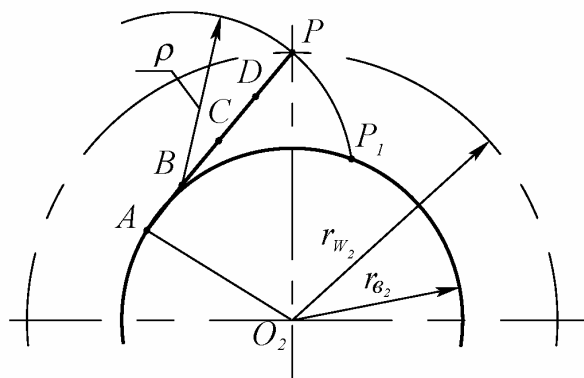


Рис. 3.

Отрезок  $AP$  (рис. 3) делим на четыре равные части ( $AB = BC = CD = DP$ ) и из точки  $B$  проводим дугу радиуса  $r = BP$  до пересечения в точке  $P_1$  с основной ок-

ружностью; тогда  $\cup AP_1 = AP$ . После этого, отрезок  $AP$  (рис. 3) снова делим на произвольное число равных частей ( $\overline{P1} = \overline{12} = \overline{23} = \dots$ ) длиной 15... 20 мм (число делений целесообразно взять четным). Дугу  $AP_1$  также делим на такое число равных частей ( $\cup P_11' = \cup 1'2' = \cup 2'3' = \dots$ ). На прямой  $AP$  за точкой  $A$  откладываем отрезки ( $89 = 910 = \dots$ ) равные  $P1$ , а на основной окружности – дуги ( $\cup 8'9' = \cup 9'10' = \dots$ ), равные дуге  $P_11'$ .

Через точки  $1'; 2'; 3' \dots$  проводим перпендикуляры к соответствующим радиусам  $O_21'; O_22'; O_23' \dots$ . На перпендикулярах (они касаются основной окружности) откладываем отрезки  $1'1''; 2'2''; 3'3'' \dots$ , соответственно равные отрезкам  $P1; P2; P3 \dots$ . Соединяя точки  $P_1; 1''; 2''; 3'' \dots$  плавной кривой, получаем эвольвенту для второго колеса. Таким же способом строим эвольвенту для первого зубчатого колеса.

4.3. Строим окружности выступов обоих колес. Построив окружности выступов, найдем точки пересечения их с соответствующими эвольвентами – крайние точки на профилях головок.

4.4. Строим окружности впадин обоих колес. Следует отметить, что радиус окружности впадин может быть больше, равен и меньше радиуса  $r_a$  основной окружности. Это зависит от числа  $Z$  зубьев колеса и от коэффициента смещения  $x$ .

Профиль ножки у основания зуба можно построить упрощенно. Если  $r_f < r_a$ , то от основания эвольвенты до окружности впадин проводят радиальный отрезок, а затем у основания зуба делают закругление радиуса 0,2 м. Упрощенное построение профиля ножки зуба не отражают истинного его очертания, а является только чертежным приемом.

4.5. Строим делительные окружности обоих колес и получаем точки пересечения их с соответствующими эвольвентами. На рис. 4 показано нормальное зацепление, поэтому точки  $D$  пересечения делительных окружностей с эвольвентами совпали с полюсом  $P$ .

От точки  $D$  откладываем на делительной окружности колеса 2 (пользуясь построением, показанным на рис. 2) дуги: влево  $\cup DE$ , вправо  $\cup DF$ , равные каждой длине шага  $p$ . От точки  $E, D, F$  влево откладываем (пользуясь тем же построением) дуги  $ER, DM, FH$ , равным каждой толщине  $S$  зуба по делительной окружности.

Делим дуги  $DM, FH, ER$  пополам в точках  $T, Y, Q$ . Соединяем эти точки с центром  $O_2$ , получаем оси симметрии зубьев. После этого вырезаем из твердой бумаги шаблон половины зуба, которым пользуемся для построения остальных зубьев. Обязательным является построение трех зубьев – первого, профиль которого построен по точкам, и двух, находящихся справа и слева от первого.

Аналогично строим три зуба для другого колеса.

4.6. Построение активной части линии зацепления, дуг зацепления и рабочих участков профилей зубьев.



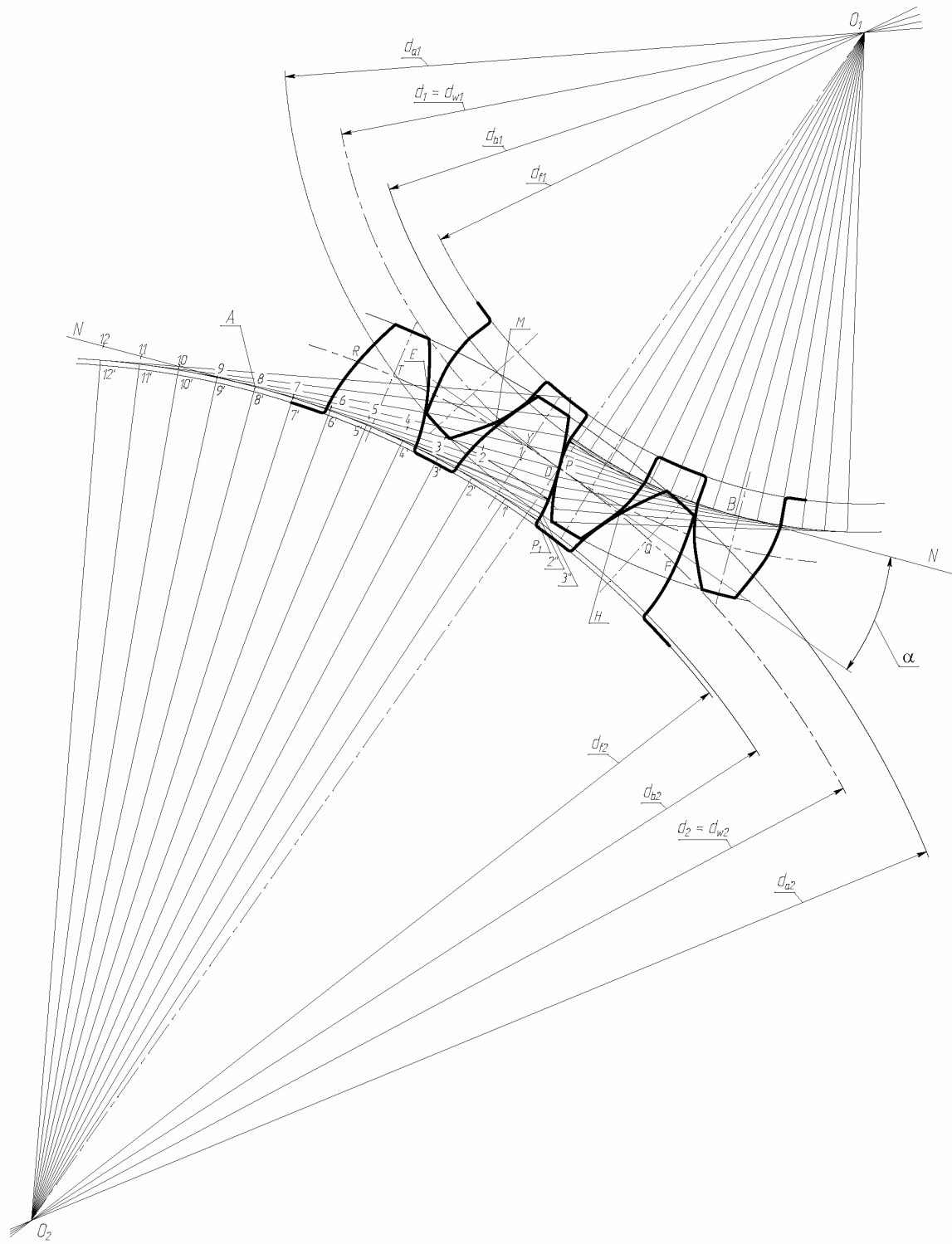


Рис. 4.

4.6.1. *Линия зацепления.* Различают теоретическую линию зацепления и активную часть линии зацепления.

Теоретической линией зацепления называют отрезок  $AB$  касательной к основным окружностям, заключенной между точками касания (рис. 5).

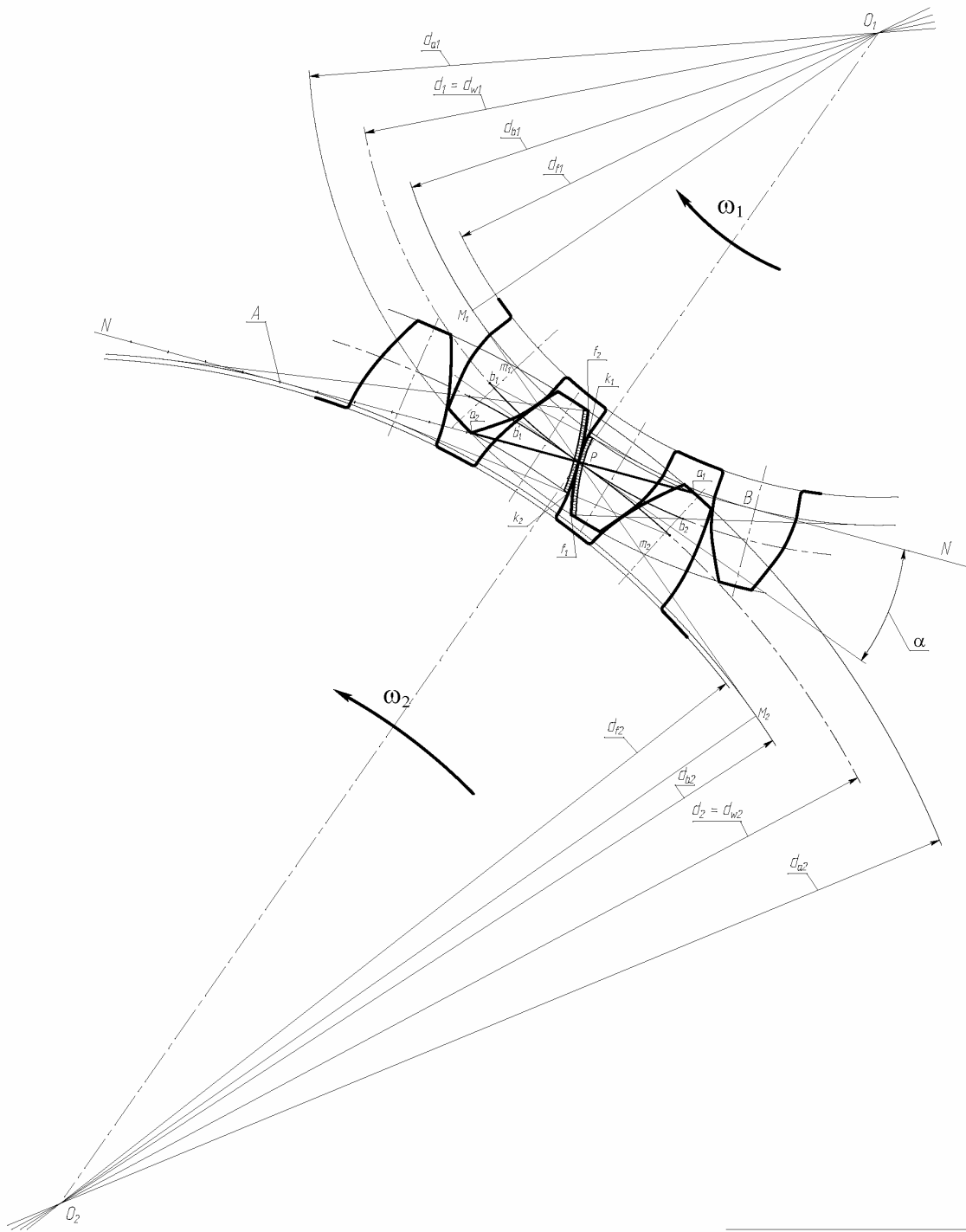


Рис. 5.

Активной частью линии зацепления называют отрезок  $a_1a_2$  теоретической линии зацепления, заключенной между точками пересечения ее с окружностями

выступов колес. Активная часть линии зацепления является геометрическим местом точки зацепления (касания) профилей зубьев на неподвижной плоскости.

Если колесо  $I$  является ведущим и вращается по направлению вращения часовой стрелки, то зацепление зубьев начинается в точке  $a_1$  и заканчивается в точке  $a_2$ . При этом точка касания на профиле первого колеса (ведущего) перемещается от основания к вершине, на профиле второго колеса (ведомого) – от вершины к основанию.

Если колесо  $I$  (ведущее) вращается против направления вращения часовой стрелки, то теоретической линией зацепления будет отрезок  $M_1M_2$ , а активной частью линии зацепления – отрезок  $m_1m_2$ . В этом случае точка касания на профиле ведущего колеса (первого) также перемещается от основания к вершине, а на профиле ведомого колеса (второго) – от вершины к основанию.

4.6.2. *Рабочие участки профиля зубьев.* Те участки профилей зубьев, которые участвуют в зацеплении, называют рабочими. Чтобы найти эти участки, нужно на профиле зуба второго колеса (рис. 4) найти точку сопряженную с крайней точкой головки первого колеса, а на профиле зуба первого колеса – точку, сопряженную с крайней точкой головки второго колеса. Для этого через точку  $a_1$  из центра  $O_1$  проводим дугу радиуса  $O_1a_1$  до пересечения в точке  $k_1$  с профилем первого колеса и через точку  $a_2$  из центра  $O_2$  проводим дугу радиуса  $O_2a_2$  до пересечения в точке  $k_2$  с профилем второго колеса.

Участки  $k_1f_1$  и  $k_2f_2$  профилей зубьев являются рабочими участками профилей.

Чтобы обозначить на чертеже эти участки, нужно провести линии параллельные  $k_1f_1$  и  $k_2f_2$  на расстоянии 1,5...2 мм и заштриховать получившиеся полосы.

Так как сопряженные участки профилей зубьев не являются центроидами, то они перекатываются друг по другу со скольжением. Поэтому длины рабочих участков профилей зубьев не равны между собой.

При вычерчивании профилей зубьев нужно помнить следующее:

- профили зубьев могут касаться только на активной части линии зацепления;
- наличие зазора на активной части линии зацепления между профилями, пересекаемыми линиями зацепления, свидетельствуют о неправильном выполнении чертежа.

4.6.3. *Дуга зацепления.* Каждую из дуг начальных окружностей, которые перекатываются одна по другой за время зацепления одной пары сопряженных профилей, называют дугой зацепления. Так как начальные окружности перекатываются друг по другу без скольжения, то дуги зацепления для обоих зацепляющихся колес равны между собой.

Построения дуги зацепления производится следующим образом.

Через крайние точки  $k_1$  и  $f_1$  рабочего участка профиля первого колеса проводим касательные к основной окружности первого колеса. Находим точки  $v_1$  и  $v_2$  пересечения этих касательных с начальной окружности первого колеса. Дуга  $v_1v_2$  является дугой зацепления на начальной окружности первого колеса.

Аналогично находим дугу зацепления на начальной окружности второго колеса.

## 5. СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коренько А. С. и др. курсовое проектирование по теории механизмов и машин. «Выща школа», 1970. – 332с. ил., приложения.
2. Иванов М. Н. Детали машин: Учебник для студентов высших техн. Учеб. завед, – изд. пераб. – М.: Высшая школа.
3. Чернин И. М. и др. Расчеты деталей машин. Минск, «Вышейш школа», 1974. – 592 с.

## 6. ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Значение коэффициентов  $x_1$  и  $x_2$   
 для неравносмещенного внешнего зацепления при  $2 \geq i_{1,2} \geq 1$

$Z_2$	Значение при $Z_1$									
	11		12		13		14		15	
	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$
11	0,395	0,395	-	-	-	-	-	-	-	-
12	0,432	0,372	0,444	0,444	-	-	-	-	-	-
13	0,464	0,354	0,479	0,423	0,486	0,486	-	-	-	-
14	0,490	0,341	0,515	0,400	0,524	0,462	0,525	0,525	-	-
15	0,513	0,330	0,543	0,386	0,557	0,443	0,565	0,506	0,571	0,571
16	0,534	0,322	0,566	0,376	0,588	0,426	0,600	0,485	0,609	0,547
17	0,551	0,317	0,589	0,365	0,614	0,414	0,631	0,468	0,644	0,526
18	0,568	0,312	0,609	0,358	0,636	0,405	0,661	0,452	0,677	0,508
19	0,584	0,308	0,626	0,353	0,659	0,394	0,686	0,441	0,706	0,492
20	0,601	0,303	0,646	0,345	0,676	0,389	0,706	0,433	0,717	0,481
21	0,617	0,299	0,663	0,341	0,694	0,384	0,726	0,426	0,754	0,472
22	0,630	0,297	0,679	0,337	0,714	0,376	0,745	0,419	0,775	0,463
23	-	-	0,693	0,334	0,730	0,372	0,763	0,414	0,792	0,458
24	-	-	0,706	0,333	0,745	0,369	0,780	0,409	0,813	0,449
25	-	-	-	-	0,758	0,368	0,796	0,405	0,830	0,445
26	-	-	-	-	0,773	0,365	0,813	0,400	0,848	0,440
27	-	-	-	-	-	-	0,826	0,399	0,862	0,438
28	-	-	-	-	-	-	0,840	0,397	0,881	0,431
29	-	-	-	-	-	-	-	-	0,894	0,430
30	-	-	-	-	-	-	-	-	0,908	0,428
31	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение табл. 1

$Z_2$	Значение при $Z_1$									
	16		17		18		19		20	
	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	0,608	0,608	-	-	-	-	-	-	-	-
17	0,644	0,586	0,646	0,646	-	-	-	-	-	-
18	0,678	0,566	0,683	0,624	0,684	0,684	-	-	-	-
19	0,716	0,542	0,720	0,601	0,723	0,658	0,720	0,720	-	-
20	0,744	0,528	0,756	0,580	0,756	0,639	0,756	0,699	0,755	0,755
21	0,766	0,519	0,781	0,568	0,792	0,617	0,793	0,676	0,793	0,731
22	0,793	0,507	0,809	0,554	0,814	0,609	0,830	0,652	0,831	0,707
23	0,815	0,497	0,833	0,543	0,849	0,588	0,860	0,636	0,866	0,686
24	0,834	0,491	0,856	0,534	0,871	0,579	0,888	0,622	0,893	0,673
25	0,854	0,483	0,878	0,526	0,898	0,566	0,915	0,609	0,926	0,654
26	0,869	0,480	0,898	0,517	0,916	0,561	0,937	0,601	0,948	0,645
27	0,892	0,470	0,916	0,511	0,937	0,552	0,959	0,592	0,976	0,632
28	0,907	0,467	0,936	0,504	0,958	0,543	0,980	0,583	0,997	0,624
29	0,921	0,465	0,952	0,500	0,976	0,537	0,997	0,578	1,018	0,615
30	0,936	0,462	0,968	0,496	0,994	0,532	1,017	0,571	1,038	0,608
31	0,951	0,459	0,981	0,495	1,011	0,528	1,038	0,562	1,056	0,602
32	0,967	0,455	0,999	0,490	1,026	0,525	1,054	0,559	1,076	0,594
33	-	-	1,014	0,487	1,041	0,522	1,071	0,554	1,093	0,589
34	-	-	1,030	0,483	1,059	0,516	1,088	0,550	1,110	0,584
35	-	-	-	-	1,072	0,515	1,102	0,547	1,127	0,580
36	-	-	-	-	1,088	0,511	1,117	0,545	1,141	0,578
37	-	-	-	-	-	-	1,131	0,542	1,159	0,573
38	-	-	-	-	-	-	1,145	0,540	1,173	0,570
39	-	-	-	-	-	-	-	-	1,187	0,568
40	-	-	-	-	-	-	-	-	1,201	0,567
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Окончание табл. 1

$Z_2$	Значение при $Z_1$							
	21		22		23		24	
	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$		
11	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-
21	0,782	0,782	-	-	-	-	-	-
22	0,821	0,758	0,812	0,812	-	-	-	-
23	0,861	0,732	0,850	0,787	0,839	0,839	-	-
24	0,892	0,715	0,884	0,767	0,872	0,820	0,865	0,865
25	0,925	0,696	0,924	0,742	0,913	0,793	0,898	0,845
26	0,951	0,683	0,950	0,729	0,946	0,774	0,934	0,822
27	0,976	0,672	0,984	0,708	0,979	0,755	0,966	0,804
28	1,000	0,662	1,007	0,700	1,010	0,737	1,000	0,784
29	1,023	0,651	1,031	0,689	1,038	0,723	1,033	0,764
30	1,045	0,641	1,051	0,681	1,055	0,718	1,060	0,750
31	1,065	0,634	1,075	0,659	1,084	0,701	1,081	0,741
32	1,082	0,629	1,094	0,662	1,101	0,696	1,105	0,729
33	1,102	0,622	1,114	0,655	1,121	0,689	1,127	0,720
34	1,122	0,614	1,131	0,650	1,145	0,678	1,149	0,710
35	1,140	0,608	1,154	0,639	1,163	0,672	1,170	0,702
36	1,157	0,603	1,172	0,634	1,180	0,667	1,188	0,696
37	1,171	0,601	1,187	0,631	1,200	0,659	1,206	0,690
38	1,186	0,599	1,204	0,626	1,218	0,653	1,223	0,685
39	1,201	0,595	1,222	0,622	1,232	0,651	1,241	0,680
40	1,218	0,591	1,233	0,621	1,249	0,647	1,260	0,673
41	1,231	0,589	1,250	0,616	1,265	0,643	1,276	0,669
42	1,247	0,586	1,266	0,612	1,279	0,640	1,291	0,665
43	-	-	1,279	0,611	1,295	0,636	1,306	0,662
44	-	-	1,293	0,609	1,310	0,634	1,321	0,659
45	-	-	-	-	1,325	0,631	1,336	0,657
46	-	-	-	-	1,338	0,629	1,350	0,654
47	-	-	-	-	-	-	1,365	0,651
48	-	-	-	-	-	-	1,379	0,649

Таблица 2

Значения коэффициента  $x_1$  для неравносмещенного внешнего зацепления при  $5 \geq i_{1,2} > 2$ 

$Z_1$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$x_1$	0,66	0,73	0,80	0,86	0,92	0,98	1,04	1,10	1,16	1,22	1,27

Таблица 3

Значения коэффициента  $x_2$  для неравносмещенного внешнего зацепления при  $5 \geq i_{1,2} > 2$ 

$Z_2$	Значение при $Z_1$										
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
25	0,442	0,425	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0,501	0,486	0,471	0,463	-	-	-	-	-	-	-
35	0,556	0,542	0,528	0,522	0,518	0,512	0,505	-	-	-	-
40	0,610	0,596	0,582	0,577	0,575	0,569	0,564	0,560	0,553	-	-
45	0,661	0,648	0,635	0,632	0,628	0,624	0,620	0,616	0,611	0,606	0,566
50	0,709	0,696	0,685	0,684	0,682	0,677	0,674	0,671	0,667	0,662	0,623
55	0,754	0,745	0,734	0,732	0,731	0,728	0,727	0,722	0,720	0,716	0,677
60	-	0,789	0,782	0,780	0,779	0,778	0,777	0,773	0,772	0,769	0,729
65	-	-	0,822	0,825	0,826	0,827	0,825	0,823	0,821	0,820	0,778
70	-	-	-	0,866	0,870	0,872	0,874	0,871	0,869	0,868	0,828
75	-	-	-	-	0,909	0,914	0,917	0,920	0,919	0,916	0,876
80	-	-	-	-	-	0,954	0,957	0,961	0,962	0,965	0,924
85	-	-	-	-	-	-	0,998	0,101	1,003	1,008	0,964
90	-	-	-	-	-	-	-	1,042	1,046	1,048	1,005
95	-	-	-	-	-	-	-	-	1,086	1,088	1,045
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,129	1,087
105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,131

Таблица 4

Значения коэффициента  $x_1 = -x_2$  для равносмещенного внешнего зацепления  
с выравненными коэффициентами относительного скольжения

$Z_2$	Значение при $Z_1$											
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
17	-	-	-	-	-	-	0,000	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	0,060	0,032	0,000	-	-	-	-
19	-	-	-	-	0,124	0,094	0,060	0,030	0,000	-	-	-
20	-	-	-	0,182	0,159	0,120	0,086	0,056	0,027	0,000	-	-
21	-	-	0,241	0,220	0,181	0,144	0,110	0,080	0,052	0,025	0,000	-
22	-	0,300	0,283	0,239	0,201	0,165	0,131	0,101	0,073	0,047	0,023	0,000
23	0,358	0,343	0,299	0,256	0,219	0,183	0,149	0,119	0,092	0,067	0,043	0,021
24	0,400	0,350	0,313	0,271	0,235	0,199	0,165	0,136	0,109	0,085	0,062	0,041
25	0,400	0,350	0,326	0,285	0,248	0,213	0,180	0,151	0,125	0,101	0,079	0,058
26	0,400	0,350	0,337	0,297	0,260	0,226	0,191	0,168	0,138	0,115	0,094	0,073
27	0,400	0,350	0,347	0,308	0,271	0,238	0,205	0,178	0,152	0,128	0,107	0,087
28	0,400	0,350	0,356	0,318	0,281	0,249	0,216	0,189	0,163	0,140	0,119	0,100
29	0,400	0,350	0,364	0,327	0,291	0,258	0,226	0,199	0,173	0,150	0,130	0,111
30	0,400	0,350	0,372	0,335	0,300	0,266	0,235	0,208	0,183	0,160	0,140	0,122
31	0,400	0,350	0,379	0,343	0,308	0,274	0,243	0,216	0,192	0,170	0,150	0,132
32	0,400	0,350	0,385	0,350	0,315	0,282	0,251	0,224	0,200	0,178	0,159	0,141
34	0,400	0,350	0,390	0,363	0,329	0,296	0,265	0,238	0,215	0,194	0,175	0,158
36	0,400	0,350	0,390	0,375	0,341	0,309	0,279	0,253	0,230	0,210	0,191	0,174
38	0,400	0,350	0,390	0,385	0,353	0,322	0,293	0,266	0,246	0,226	0,207	0,190
40	0,400	0,350	0,390	0,395	0,363	0,333	0,306	0,282	0,260	0,240	0,222	0,225
44	0,400	0,350	0,390	0,409	0,378	0,350	0,325	0,301	0,280	0,260	0,242	0,225
48	0,400	0,350	0,390	0,422	0,392	0,366	0,341	0,319	0,297	0,277	0,260	0,243
52	0,400	0,350	0,390	0,430	0,404	0,378	0,354	0,332	0,312	0,292	0,275	0,252
56	0,400	0,350	0,390	0,430	0,414	0,399	0,364	0,343	0,324	0,305	0,287	0,271
60	0,400	0,350	0,390	0,430	0,423	0,397	0,374	0,353	0,334	0,316	0,299	0,283
66	0,400	0,350	0,390	0,430	0,435	0,409	0,388	0,366	0,349	0,331	0,315	0,300



Окончание табл. 4

$Z_2$	Значение при $Z_1$											
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
72	0,400	0,350	0,390	0,430	0,445	0,421	0,398	0,378	0,361	0,344	0,328	0,313
78	0,400	0,350	0,390	0,430	0,454	0,430	0,407	0,387	0,370	0,353	0,336	0,320
84	0,400	0,350	0,390	0,430	0,459	0,436	0,414	0,394	0,376	0,360	0,344	0,328
90	0,400	0,350	0,390	0,430	0,460	0,440	0,419	0,400	0,382	0,365	0,350	0,335
96	0,400	0,350	0,390	0,430	0,460	0,446	0,425	0,406	0,388	0,370	0,355	0,340
100	0,400	0,350	0,390	0,430	0,460	0,448	0,428	0,408	0,390	0,373	0,357	0,342
105	0,400	0,350	0,390	0,430	0,460	0,450	0,431	0,411	0,393	0,376	0,361	0,346
110	0,400	0,350	0,390	0,430	0,460	0,452	0,433	0,414	0,396	0,379	0,364	0,350

Таблица 5

Формулы для подсчета размеров элементов зубчатого цилиндрического зацепления с прямым зубом

Наименование	Зацепление		нулевое $x_1 = x_2 = 0$
	неравносмещенное $x_{\Sigma} \neq 0$	равносмещенное $x_{\Sigma} = 0, x_1 = -x_2$	
1. Шаг зацепления по делительной окружности $\rho$	$\rho = m \cdot \pi$		
2. Делительный диаметр $d$	$d_1 = Z_1 \cdot m; \quad d_2 = Z_2 \cdot m$		
3. Основной диаметр $d_e$	$d_{e1} = d_1 \cdot \cos \alpha; \quad d_{e2} = d_2 \cdot \cos \alpha$		
4. Коэффициент суммы смещений $X_{\Sigma}$	$x_{\Sigma} = x_1 + x_2$		
5. Толщина зуба по делительной окружности $S$	$S_1 = 0,5\rho + 2x_1 \cdot m \operatorname{tg} \alpha; \quad S_2 = 0,5\rho + 2x_2 \cdot m \operatorname{tg} \alpha$		
6. Угол зацепления $\alpha_w$	$\operatorname{inv} \alpha_w = \frac{2 \tan \alpha}{Z_1 + Z_2} + \operatorname{inv} \alpha$		$\alpha_w = \alpha$

Окончание табл. 5

Наименование	Зацепление		нулевое $x_1 = x_2 = 0$
	неравносместенное $x_{\Sigma} \neq 0$	равносместенное $x_{\Sigma} = 0, x_1 = -x_2$	
7. Межосевое расстояние $a_{\text{ш}}$	$a_w = \frac{(Z_1 + Z_2) \cdot m \cdot \cos \alpha}{2} + \text{inv} \alpha$	$a_{\text{ш}} = 0,5m \cdot (Z_1 + Z_2)$	
8. Начальный диаметр $d_{\text{ш}}$	$d_{\text{ш}1} = \frac{2a_w}{i+1};$	$d_{\text{ш}2} = \frac{2a_w \cdot i}{i+1}$	
9. Коэффициент уравнительного смещения $\Delta y$	$\Delta y = x_{\Sigma} = \frac{a_w - a}{m},$ где $a = 0,5m \cdot (Z_1 + Z_2)$		$\Delta y = 0$
10. Диаметр вершин зубьев $d_a$	$d_{a1} = d_1 + 2(h_a^* + x_1 - \Delta y)m;$ $d_{a2} = d_2 + 2(h_a^* + x_2 - \Delta y) \cdot m$		$d_{a1} = d_1 + 2h_a^* \cdot m$ $d_{a2} = d_2 + 2h_a^* \cdot m$
11. Диаметр впадин $d_f$	$d_{a1} = d_1 + 2(h_a^* + C^* - x_1) \cdot m;$ $d_{a2} = d_2 + 2(h_a^* + C^* - x_2) \cdot m$		$d_{a1} = d_1 - 2(h_a^* + C^*) \cdot m$ $d_{a2} = d_2 - 2(h_a^* + C^*) \cdot m$

Примечание: 1. Индекс 1 относится к размерам колес имеющего меньшее число зубьев, а индекс 2 – к размерам колеса, имеющего большее число зубьев.

2. Согласно ГОСТ 13755-81  $\alpha = 20^\circ$ ,  $h_a^* = 1$ ;  $C^* = 0,25$ .

Таблица 6

Значение эволюентной функции ( $inv\alpha$ )

$\alpha^\circ$	Минуты												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
20°	0,014904	0,015098	0,015293	0,015490	0,015689	0,015890	0,016092	0,016296	0,016502	0,016710	0,016920	0,017132	0,017345
21°	0,017345	0,01756	0,017777	0,017996	0,18217	0,018440	0,18665	0,018891	0,019120	0,019350	0,019583	0,019817	0,020054
22°	0,020054	0,020292	0,020533	0,020775	0,021019	0,021266	0,021514	0,021765	0,022018	0,022272	0,022529	0,022788	0,023049
23°	0,023049	0,023312	0,023577	0,023845	0,024114	0,024386	0,024660	0,024936	0,025214	0,025495	0,025778	0,026062	0,026350
24°	0,026350	0,026639	0,026931	0,027225	0,027521	0,027820	0,028121	0,028424	0,028729	0,029037	0,029348	0,029660	0,029975
25°	0,029975	0,030293	0,030613	0,030935	0,031260	0,031587	0,031917	0,032249	0,032583	0,032920	0,033260	0,0033602	0,033947
26°	0,033947	0,034294	0,034644	0,034997	0,035352	0,035709	0,036069	0,036432	0,036798	0,037166	0,037537	0,037910	0,038287
27°	0,038287	0,038666	0,039047	0,039432	0,039819	0,040209	0,040602	0,040997	0,041395	0,041797	0,042201	0,042607	0,043017
28°	0,043017	0,043430	0,043845	0,044264	0,044685	0,045110	0,045537	0,045967	0,046400	0,046837	0,047276	0,047718	0,048164
29°	0,048164	0,048612	0,049064	0,049518	0,049976	0,050437	0,050901	0,051368	0,051838	0,052312	0,052788	0,053268	0,053751