

ГЛАВА ПЪРВА

РАЗВИТИЕ И АНАЛИЗ НА СЪВРЕМЕННОТО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА ЗА ОБРАБОТВАНЕ НА ЗЪБНИ КОЛЕЛА С ПРАВИ ЗЪБИ

1.1. Конструктивни и геометрични елементи (параметри) на зъбните колела с прави зъби

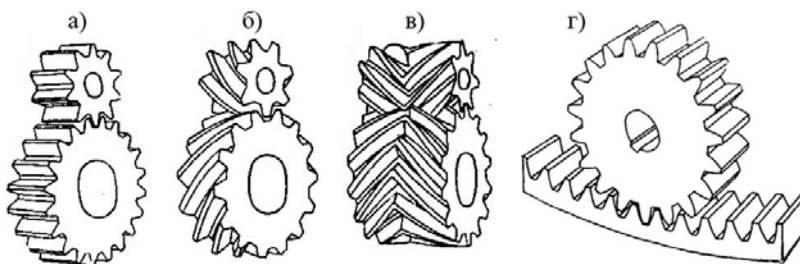
Предаването на непрекъснато въртене от един вал към друг със зададено предавателно отношение често се осъществява с помощта на зъбни механизми. Те са намерили много голямо приложение както в машиностроенето така и в уредостроенето благодарение на голямата надеждност и точност на възпроизвеждане на зададения закон на движение. Зъбните предавки се използват за изменение на скоростта или направлението на движение на водимото звено при изменение на въртящия момент, получаване на точни премествания, при необходимост от стабилно съотношение между скоростите на водещия и водимия вал във всеки момент от време и зададено предавателно отношение. Те се състоят от зъбни колела, установени на валове, които са установени на опори в корпусите на машините или уредите. Предаването на въртящия момент се осъществява чрез натиск между зъбите на зъбните колела, намиращи се в зацепление.

В зависимост от определени параметри може да се направи следната класификация на видовете зъбни колела [1, 23, 49, 51]:

1.1.1. Видове зъбни колела

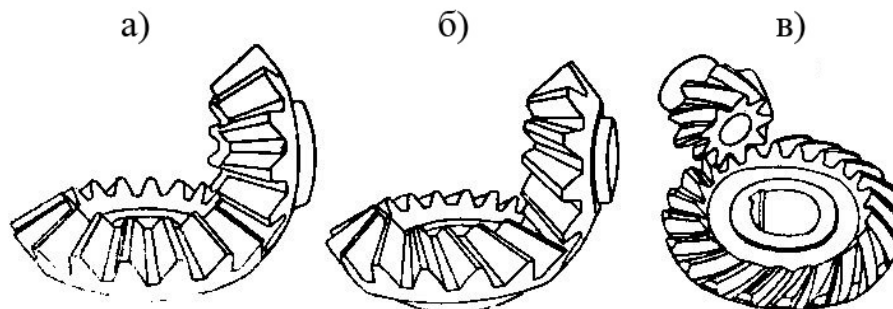
- по форма на повърхността на която са разположени зъбите се различават:

- цилиндрични зъбни колела (фиг.1.1);



Фиг.1.1. Видове цилиндрични зъбни колела: а) с прави зъби; б) с наклонени зъби; в) с шевронни зъби ; г) зъбно колело зъбен гребен

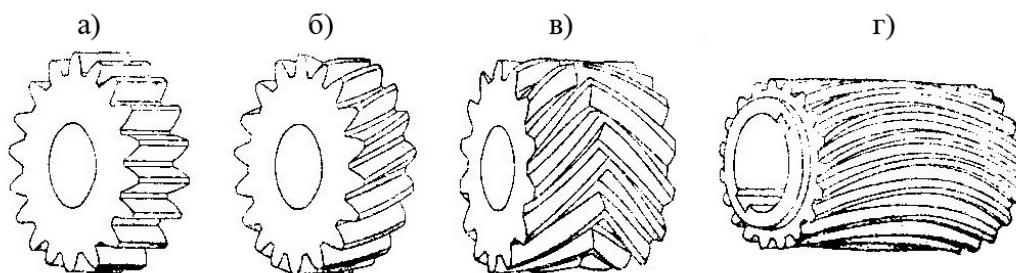
- конусни зъбни колела (фиг.1.2);



Фиг.1.2. Видове конусни зъбни колела: а) с прави зъби ; б) с наклонени зъби ; в) с криволинейни зъби

- по направление на зъба:

- с прави зъби (фиг.1.3.а.);
- с наклонени зъби (фиг.1.3.б.);
- с шевронни зъби (фиг.1.3.в.);
- с криволинейни зъби (фиг.1.3.г.);.



Фиг.1.3. Видове направления на зъбите

- в зависимост от формата на зъбните колела:

- зъбни колела с кръгла форма;
- зъбни колела с некръгла форма;

- по вида на профила на зъба

- еволвентен- когато профилът на зъба е образуван от два симетрични еволвенти;
- циклоиден- когато профилът е образуван от циклоидни криви;
- часовников;
- цевно зацепване;
- асиметричен профил;
- зацепване на Новиков – когато профилът е образуван от дъгите на окръжности.

Най-голямо приложение намират зъбните колела с еволвентно зацепване, поради следните предимства: допуска се изменение на междусосовото разстояние, без да се нарушава работата на предавката, улеснява се изработването, тъй като с един инструмент могат да се нарязват зъбни колела с един модул и ъгъл на зацепване, независимо от броя на зъбите; зъбните колела с еднакъв модул и ъгъл на зацепване могат да работят съвместно независимо от броя на зъбите.

- в зависимост от конструктивната форма на зъбното колело:

- втулка зъбно колело;
- диск зъбно колело;
- вал зъбно колело;
- блок зъбно колело;
- зъбен сектор;
- зъбна рейка.

- в зависимост от технологичните бази използвани при нарязване на зъбите:

- базиране по конусен отвор на дорник;
- базиране по челна повърхнина и цилиндричен отвор на дорник;
- базиране по цилиндрична повърхнина и центрови отвор;
- базиране по два центрови отвора;
- базиране по външна цилиндрична повърхнина.

- в зависимост от модула на зъбното колело:

- зъбни колела с малък модул ($m \leq 1$);
- зъбни колела с модул $m > 1$.

За да изпълняват функционалното си предназначение за силово или кинематично предаване на въртящ момент зъбните колела се сдружават по между си и образуват зъбни предавки. За тях също може да се направи класификация по определени параметри.

1.1.2. Видове зъбни предавки:

- според предназначението си

- силови — служат да предават мощност и намират приложение в машиностроенето;
- позиционни — изпълняват предварително зададено преместване до определена точна позиция, като точността на движение до достигане на целта често не е важна;

- кинематични – предават и преобразуват точно преместване, като точността на движение е важна по всяко време и във всяка точка от траекторията и намират приложение в уредостроенето.

- по конструкция:

- закрити предавки – разположени в общо закрито тяло и работят при обилно мазане и са изолирани от външната среда;
- открити предавки – бавноходни предавки с по големи размери.

- в зависимост от относителното разположение на зъбите и междузъбията в предавката :

- зъбни предавки с външно зацепване;
- зъбни предавки с вътрешно зацепване.

- в зависимост от разположението на зъбните колела в предавката:

- редово разположение, което се разделя на:
 - едностъпално;
 - многостъпално.
- планетно , което се разделя на :
 - едностъпално;
 - многостъпално.

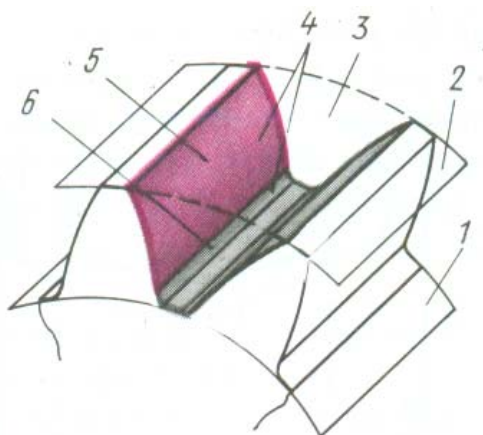
- в зависимост от положението на осите на зъбните колела от зъбната предавка в пространството:

- зъбни предавки с успоредни оси – за цилиндрични зъбни колела;
- зъбни предавки с кръстосани и пресичащи се оси- за конусни, винтови и червячни зъбни колела;
- зъбни гребени и сектори.

Разглеждането на геометричните елементи на зъбното колело и изходния производящ контур е необходимо, за да може след това да се направя анализ на грешките. Всяко зъбно колело се състои от определени повърхнини, които определят неговия профил [1, 5, 125] .

Повърхнина **1**, отделяща зъба от тялото на зъбното колело се нарича повърхнина на падините на зъбите. (фиг.1.4). Повърхнината **2**, ограничаваща зъба от външната страна на зъбното колело – повърхност на върховете на зъбите. Пространството между два съседни зъба **3** – междузъбие. Повърхнината ограничаваща зъба от страната на двете междузъбия **4**, се нарича странична повърхнина на зъба. Страничната повърхнина се състои от главна **5** и преходна **6** повърхнина [1, 22, 57].

Главната повърхнина е част от страничната част на зъба, която взаимодейства с главната повърхнина на зъб от друго колело, осигурява необходимото предавателно отношение. Преходната повърхнина осигурява връзка между главната повърхнина и падината. Главната повърхнина най-често е еволвентна повърхнина. В уредостроенето понякога се използват циклоидни профили (еписиклоида или хипоциклоида), но постепенно те се заменят с еволвента. Еволвентата е крива, която описва коя де е точка от права, допирателна към окръжност, която се търкаля по нея без приплъзване.

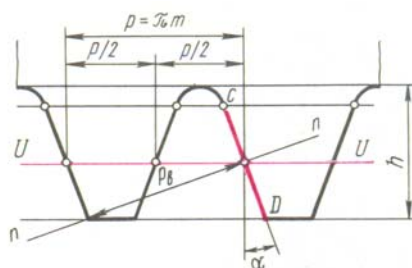


Фиг. 1.4. Повърхнини на профила на зъба на зъбно колело

За геометричната теория на зацепването важно значение имат следните основни свойства на еволвентата [1, 49, 88]:

- а) еволвентата е симетрична крива съставена от две части, започващи от точка разположена на основната окръжност. Следователно еволвентата няма точки вътре на основната окръжност;
- б) нормалата към еволвентата в коя да е точка е права, която е допирателна към основната окръжност;
- г) ъгълът на профила α_y и радиусът на кривина ρ_y в началната точка на еволвентата са равни на нула. При отдалечаване на точки от еволвентата от основната окръжност, ъгълът на профила и радиусът на кривина се увеличават;
- д) при увеличаване на радиуса на основната окръжност еволвентният профил постепенно загубва своята кривина и при $r_b = \infty$ еволвентата се преобразува в права линия.

Ако безкрайно се увеличи броя на зъбите на колелото, а следователно и радиусите на всички окръжности, то при брой зъби равен на безкрайност ($z = \infty$) всички окръжности се преобразуват в успоредни прави, а еволвентния профил на зъба става праволинеен (фиг.1.5.).



Фиг. 1.5. Схема на еволвентен профил при брой зъби $z = \infty$

Това има много голямо практическо значение. При брой зъби $z = \infty$ се получава зъбен гребен. Във всяко положение на праволонейната част на гребена, профилният ъгъл е един и същ равен на α . Правата, по която дебелината на зъба в гребена е равна на ширината на междузъбието и равна на половината на стъпката, се нарича делителна права. Стъпката на зъбите на рейката, измерена по произволна права успоредна на делителната има същото значение $p = \pi m$. Стъпката на гребена измерена по нормала n-n към нейния профил е равна на: $\pi m \cos \alpha$,

1.1.3. Геометрия на изходния производящ контур (ИПК)

При пресмятане на геометричните параметри на елементи от висша кинематична верига е необходимо да се отчитат технологичните възможности за изработване на детайлите на машините. Геометрията на формообразувания инструмент е свързана с производящата повърхнина. За инструменти, извършващи процеса на формообразуване чрез отнемане на стружки, такава повърхност се явява въображаема повърхност, съдържаща режещите ръбове на инструмента или образувана при тяхното главно движение, необходимо за рязането. Ако режещите ръбове са прави, а главното движение праволинейно, то производящите повърхнини са равнинни. Ако режещите повърхнини са криволинейни, а главното движение праволинейно, то производящата повърхнина е цилиндър. Зацепване, проектиращо повърхността на зъбите с производяща повърхнина по аналогия със зацепване на нарязваното зъбно колело с производящата повърхнина на режещия инструмент се нарича машинно зацепване [13, 15, 22, 49].

Същността му се заключава в това, **че производящата повърхнина (повърхността на режещите ръбове на инструмента) и проектираната повърхност на зъба (нарязваното зъбно колело) имат такова относително движение, каквото биха имали зъбни колела при зацепване по между си по аксоидна повърхнина.**

При нарязване на цилиндрични зъбни колела осите на производящото колело (инструмента) и нарязваното зъбно колело са успоредни и аксоидната повърхнина е цилиндър. Ако производящото зъбно колело има краен брой зъби, то режещият инструмент

е дълбяк или абразивен диск, с които се обработват страничните повърхнини на зъбите. При безкраен брой зъби на инструмента, той се превръща в зъбен гребен. В този случай, инструмент се явява червячната фреза или абразивен червяк.

Геометрията на нарязваното зъбно колело се определя от точността на ИПК на инструмента и неговото разположение по отношение на нарязваното зъбно колело.

Ако производящата повърхнина пресича с равнина перпендикулярна на оста на нарязваното зъбно колело, то в сечението се получава **изходния производящ контур (ИПК)** [160]. Машинното зацепване е зацепване на ИПК с профила на нарязваното зъбно колело. Ако се разгледа машинно рейково зацепване то тогава ИПК има форма на зъбен гребен (фиг.1.5.). Режещият инструмент (червячна фреза или зъбен гребен) има много ценни предимства : може да с изработи сравнително евтино и достатъчно точно.

Формата и размерите на ИПК са стандартни. Еволвентните части на профила на зъбите на ИПК са праволинейни и са наклонени към оста на зъба под ъгъл α . Преходите от праволинейна част на зъба към падините и върховете се извършват по дъга от окръжност с радиус ρ_0 . Точките на свързване са отбелязани с буквите **A**, **C**, **D**, **E** (фиг. 1.6.). Праволинейната част **CD** се явява еволвента, а закръгленията **AC** и **DE** – нееволвентна част на контура. Правата, разделяща зъба по височина на две равни части , се нарича делителна. На ИПК се отбелязват още четири линии, успоредни на делителната и прекарани в основата и върха на зъбите и през спрегнатите точки **C** и **D**. Правите прекарани през точки **C** и **D** , се наричат прави на граничните точки. Размерите между профилите по делителната права са стъпка на ИПК. Стъпката p , измервана по коя да е права успоредна на делителната, има постоянна стойност равна на $\pi \cdot m$, където m е стандартния модул

Разстоянието между тези прави изразява размера на зъба на ИПК по височина и се измерва съответно с величината:

$$h_a = h_a^* \cdot m \text{ и } c = c^* \cdot m \quad , \quad (1.1)$$

където: h_a^* - коефициент на височината на зъба, c^* - коефициент на радиалната хлабина. Съгласно стандарта: $h_a^* = 1$; $c^* = 0,25$ [1, 49, 88].

Дебелината на зъба по делителната права S_0 е равна на ширината на междузъбието e_0 и се определя с изрази:

$$s_0 = e_0 = \frac{\pi \cdot m}{2} \cdot \quad (1.2)$$

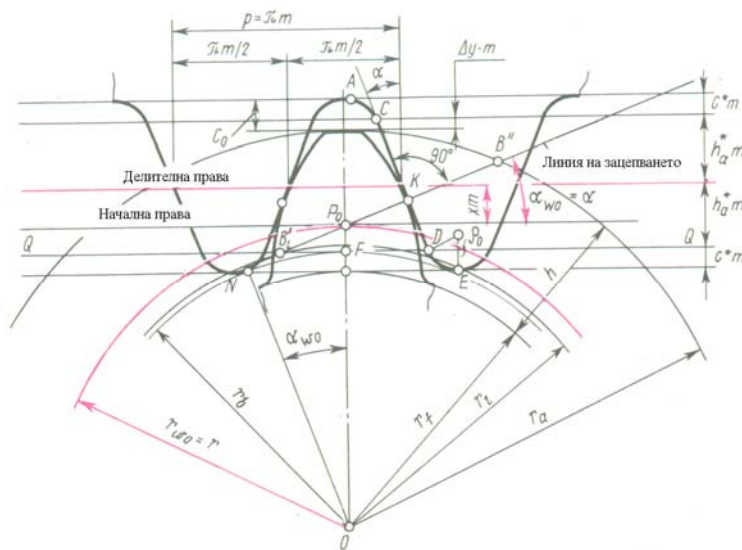
Сумата от двете определя стъпката на ИПК. Ъгълът на профила на зъба е стандартен $\alpha = 20^\circ$. Радиусът на закръгление (дъгата **DE**) се определя с изрази:

$$\rho_o = \frac{c^* m}{(1 - \sin \alpha)} \approx 0,4 m \quad (1.3)$$

ИПК се характеризира с четири стандартни параметъра: **m**, **α** , **ha***, **c*** [1,13, 49, 88, 160].

На машината инструментът може да се разположи по различен начин относно нарязваното колело. При това делителната права на ИПК може да се разположи различно спрямо делителната окръжност на колелото, а именно :

- тя се допира до делителната окръжност – нулево установяване на инструмента;
- не се допира до делителната окръжност - положителна изместване на ИПК;
- пресича делителната окръжност – отрицателна изместване на ИПК.



Фиг. 1.6. Схема на ИПК на рейков еволвентен инструмент

Геометрията на ИПК е основна за определяне на геометричните размери на режещите инструменти при обработване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби. При машинното зацепване ИПК най-често има формата на зъбен гребен. Той определя вида и геометричните размери на режещия инструмент, а именно червячна модулна фреза. Геометрията на нарязваното зъбно колело се определя от точността на ИПК на инструмента и неговото разположение по отношение на нарязваното зъбно колело.

1.2. Методи за обработване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби

Една от най-важните операции при обработване на едно зъбно колело се явява оформянето на профила на зъба. Това се осъществява на отделна операция. При нея се сменя материал от заготовката в зоната на междузъбието. В практиката намират приложение два основни метода за обработване на профила: метод на обхождането (отъркалването) и метод на копирането.

1.2.1. Обработване на цилиндрични зъбни колела по метода на обхождане

Същността на метода е, че се имитира зацепване на зъбна двойка (детайл-инструмент).

За обработване на цилиндрични зъбни колела по метода на обхождане се използва:

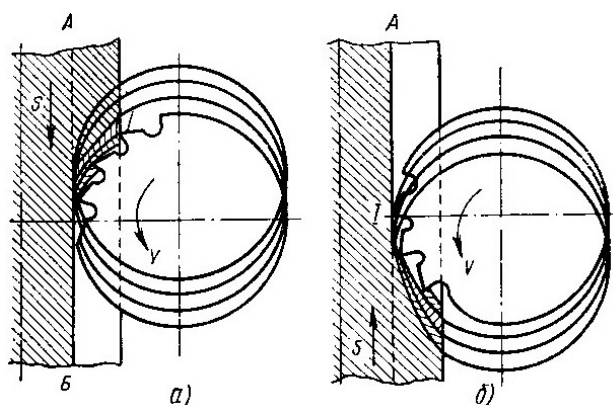
- зъбофрезозване с червячна модулна фреза;
- нарязване със зъбодълбачно колело.

1.2.1.1. Зъбофрезозване с червячна фреза

Зъбофрезозването се явява най-разпространения в машиностроенето и уредостроенето метод за нарязване на зъбите на цилиндрични зъбни колела с прави и с наклонени зъби с външно зацепване, отличаващ се с универсалност, висока производителност и точност. Чрез зъбофрезозване се обработват зъбни колела при твърдост на заготовките, не превишаващи **HB 320** или **HRC 26...32**, и рядко при **HRC 32...36**. Точността на зъбния венец съответства на **6^{та}** до **9^{та}** степен на точност. [26, 27, 45].

Нарязването на зъби с червячни фрези се осъществява на зъбофрезозови машини по метода на обхождане. Профилът на режещата част на червячната фреза в осово сечение практически не се различава от профила на зъбния гребен, затова нарязването на зъбите с червячна фреза може да се представи като зацепване на гребен със зъбно колело.

В процеса на зъбофрезозване, праволинейните режещи ръбове на червячната фреза възпроизвеждат в пространството постъпателно движение на зъбите на рейката, зацепващи се с колелото. По направлението на въртене на червячната фреза и подаването се различават два метода на зъбофрезозване: попълтно (фиг. 1.7 а.) и насрещно (фиг. 1.7 б.).



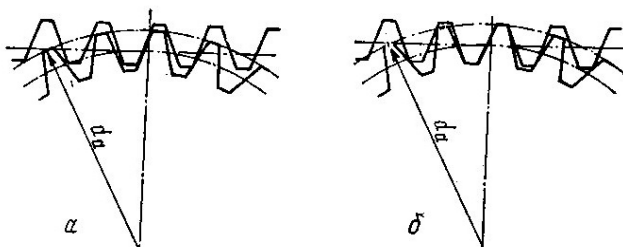
Фиг. 1.7. Начини на зъбофрезозване (а - попълтно, б – насрещно)

Методът на насрещното зъбофрезозване е по-универсален, тъй като не изисква допълнителни устройства за обикане на хлабината във винтовата двойка при подаването на инструмента. [95, 102, 103].

За осигуряване на висока точност на основните параметри на зъбния венец, се предпочита попълтно зъбофрезозване.

По вида (по размерите и височините на зъбите) на инструмента съществуват два метода за нарязване на зъбни колела; зъбофрезозване с обикновени червячни фрези (с открит профил) (фиг. 1.8. а) и зъбофрезозване с пълнопрофилни червячни фрези (със закрит профил) (фиг. 1.8. б).

При зъбофрезозване с пълнопрофилни червячни фрези (фиг. 1.8.б) по върховия диаметър на заготовката се оставя прибавка за обработване. Височината на зъба на фрезата е равна на височината на зъба на фрезозаното зъбно колело. Впадините на зъбите на такива фрези вземат участие в процеса на рязане, снемайки прибавка по върховата окръжност на зъбите d_a на обработваното колело. Следователно, в процеса на зъбофрезозване при формирането на зъбния венец с пълнопрофилни червячни фрези се произвеждат едновременно всички повърхнини (профили) на зъбите (ляв и десен еволвентен профил, върхови и петови диаметър).



Фиг. 1.8. Зъбофрезозване с различни видове фрези а - с открит профил, б - със закрит профил

1.2.1.2. Нарязване със зъбодълбачно колело

Зъбодълбането е основано на възпроизвеждане на процеса обхождане при зацепване на две зъбни колела без хлабина, едното от които се явява режещ инструмент – дълбач, а другото - заготовка на обработваното колело[27, 51, 91, 119].

Зъбодълбането се явява един от най-универсалните зъбообработващи методи. С помощта на кръгъл дълбач в машиностроенето и уредостроенето се нарязват зъбни колела, които е невъзможно да се обработват чрез зъбофрезозване, а именно:

- а) малки венци на блокови колела и фланцови колела, когато разстоянието между зъбните венци е недостатъчно за изхода на червячната фреза (3 до 5 mm);
- б) зъбни колела за вътрешно зацепване;
- в) зъбни сектори;
- г) зъбни рейки.

Зъбодълбането има следните предимства:

1) минималният брой зъби на нарязваното колело $Z_{\min}$, който може да бъде обработено без подрязване на зъбите, е по-малко отколкото при зъбофрезозване с червячна фреза;

2) по-малка височина на грапавините по страничните еволвентни профили на зъба (в границите на R_a равно на 2,5 до 0,32 μm);

3) възможно е да се обработват зъбни колела с вътрешно зацепване. Зъбните колела за вътрешно зацепване трябва да се нарязват с опашкови или дискови правозъбни дълбяци с 14 до 30 зъба по-малко от броя зъби на нарязваното зъбно колело, за да се изключи опасността от подрязване на профила на зъбите.

Зъбодълбането с дискови дълбяци в уредостроенето се използва по-рядко, отколкото зъбофрезозване с червячна фреза. Това се обяснява със следните основни недостатъци:

1) висока точност на зъбните колела при зъбодълбането се постига значително трудно, тъй като зависи от точността на използваните дълбяци, които имат сложен профил и отклонение от ъгловата стъпка;

2) може да се получи място със значителни грешки на отделните показатели на нарязваното колело при еднотреходно зъбодълбане в сектора на завършване на процеса на нарязване.

Нарязването със зъбодълбачно колело не е обект на дисертацията, защото разработваните модели предназначени за червячна модулна фреза.

Вторият метод за обработване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби е методът на копирането. Фокус на дисертацията е определяне на грешките при метода на обхождане, но кратко се прави и анализ на другия метод поради приложението му в практиката.

1.2.2 Обработване на цилиндрични зъбни колела по метода на копирането

Характерно за метода е това, че инструментът има профила на обработваното зъбно колело или на обработваното междузъбие от дадено зъбно колело. Той се реализира чрез:

- зъбофрезозване с дискови (палцови) модулни фрези;
- нарязване с многоножова глава;
- протегляне на зъбите.

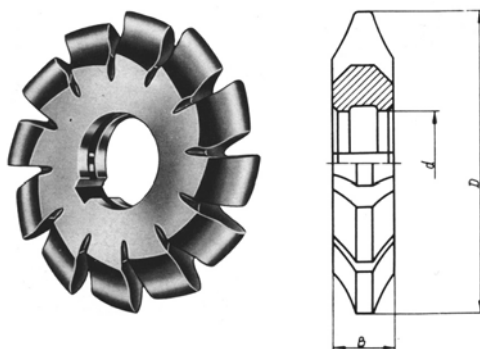
1.2.2.1. Зъбофрезозване с дискови модулни фрези

Нарязването на зъбите на цилиндричните зъбни колела с дискови фасонни фрези се отнася към най-ранно разпространените методи за обработка на зъбни колела.

Същността на метода на зъбофрезозване с дискова фреза се състои в следното. Дисковата фреза се върти около своята ос и се премества към долната част на зъба на обработваното зъбно колело [27, 51, 88, 103, 104]. Профилът на зъбите в осово сечение на

дисквата модулна фреза съвпада с профила на междузъбието на обработваното колело. На фиг. 1.9. е показан профилът и основните размери на дискова фреза.

След прорязване на впадината между зъбите фрезата се отвежда, и обработваното колело се завърта на определена ъглова стъпка. Във времето на делене фрезата се връща в начално положение. Преди следващия работен ход осите на фрезата и на обработваното колело се сближават до определена зададена величина.



Фиг. 1.9. Дискова модулна фреза за зъбообработване

В този случай, процесът на нарязване на колелата се състои от зъбофрезование, делителни завъртания на колелото, и празни ходове на инструмента. Профилът на падината между зъбите на колелото се получава съответстващ на профила на зъбите на инструмента.

Колелата, нарязани с дискови фрези, поради ниската им точност се използват само за неотговорни бавноходни предавки. Дисковите фрези се използват главно за грубо изрязване на цилиндрични и конусни колела със средни и големи модули.

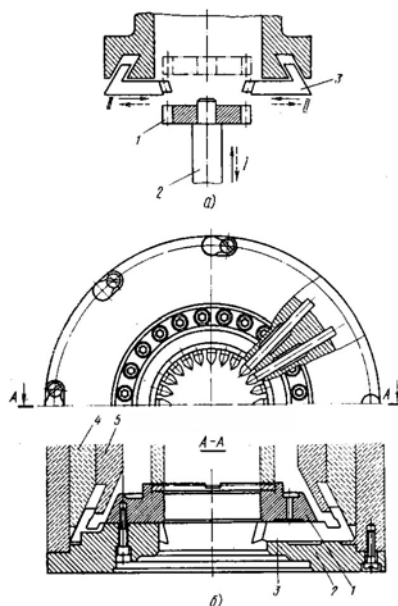
1.2.2.2. Нарязване с многоножова (зъбодълбачна) глава

Обработването се извършва на специални зъбонарезни машини при следната схема (фиг. 1.10.).

Режещите ножове **3** са разположени радиално в неподвижния корпус **2** (фиг.1.10 б). Заготовката **1** извършва възвратно-постъпателно работно движение (фиг.1.10.а). При преминаването и между ножовете се сема съответната прибавка, а при връщане ножовете се отдръпват, за да не се получи триене между тях и детайла. При следващия двоен ход ножовете отново се придвижват към детайла на такова разстояние, че да се осигури необходимата прибавка за снемане[95,97].

Радиалното преместване на ножовете се извършва чрез преместването във вертикално направление на подавателния конус **4**. При първите ходове радиалното подаване е по-голямо, след което постепенно намалява. Скоростта на рязане е около 10 до 15m/min. Поради това, че едновременно се обработват всички междузъбия, производителността е 7 до 10 пъти по-

голяма от тази при зъбофрезозане с червячна фреза. По този начин се получава $8^{\text{ма}}$ - $9^{\text{та}}$ степен на точност на обработваните зъби [93, 96, 119].

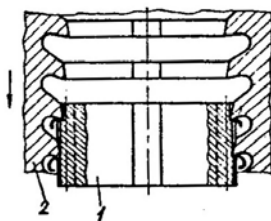


Фиг. 1.10. Контурно дълбане на зъбите на цилиндрични колела с многоножова глава
а - направления на основните движения, б - конструкция на главата

Основният недостатък на метода е, че се използва много скъп инструмент. Освен това е необходимо за всяко зъбно колело с различен брой зъби да се изработва отделна многоножова глава. Прилага се в условията на голямосерийно и масово производство за нарязване на цилиндрични зъбни колела с модул по-голям или равен на 0,8 mm.

1.2.2.3. Протегляне на зъбите

Зъбопротеглянето (или зъбопрошиването) представлява процес на едновременно формообразуване на всички зъби от зъбния венец с помощта на специални режещи инструменти - протяжки или прошивки (фиг. 1.11.). Разположението и профила на зъбите на протяжката (прошивката) съответства на разположението и профила на падините между зъбите на обработвания венец. Процеса на рязане на метала се осъществява за сметка на постоянно увеличаваща се височина на последващите зъби на протяжката, в сравнение с предишните.



Фиг.1.11. Протегляне на зъбни колела с външни зъби (1- заготовка; 2 – протяжка)

Протяжките се явяват специални инструменти, които могат да бъдат изработени само в специализирани фирми, разполагащи със зъбошлифовални машини и имащи опит във зъбошлифоването на малкомодулни зъбни колела. Методът се използва в условията на голямосерийно и масово производство за протегляне на цилиндрични зъбни колела с модул по-голям или равен на 0,3 mm [57, 94, 119, 134].

Изборът на метод за обработване на зъбите на дадено зъбно колело зависи основно от типа на производство и изискванията за точност. На база на дадения обзор могат да се направят следните изводи за предимствата и недостатъците на двата метода. Методът на обхождане има следните основни предимства:

- осигурява по голяма точност при обработване;
- лесно се изработват инструментите, използвани за обработване на зъбите;
- за изработване на зъбни колела от един модул се използва един инструмент независимо от броя на зъбите;
- методът осигурява висока производителност.

Недостатъците на метода на обхождане са следните:

- използва се специализирано оборудване;
- получаване на подрязване на зъба при определен брой зъби.

Методът на копирането има следните основни предимства:

- използване на универсално оборудване;
- възможност за обработване на зъбни колела без подрязване.

При приложение на протеглянето или обработване с многоножова глава се постига и висока производителност.

Недостатъците на метода на копиране са следните:

- използване на набор от определен брой инструменти за производство на зъбни колела от даден модул в зависимост от броя на зъбите. Това води до получаване на грешка на метода на обработване;
- малка точност при обработването поради използване на универсално оборудване и необходимост от честа смяна на позициите на детайла;
- ниска производителност поради наличието на много празни ходове.

На база на откритите предимства и недостатъци може да се направи извод, че по-голямо приложение в практиката намира методът на обхождане. Поради това в дисертационния труд основно ще се отдели внимание на този метод.

1.3. Инструменти и машини за обработване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби

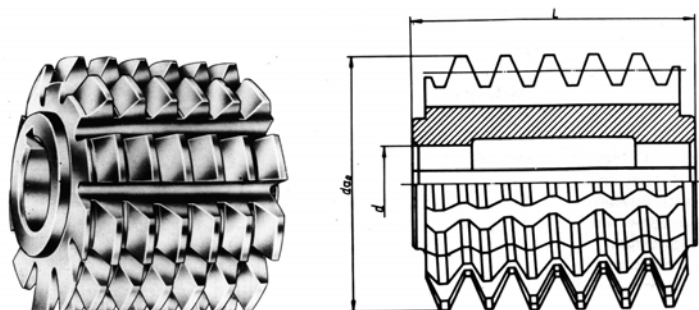
За обработване на цилиндрични зъбни колела по метода на обхождане се използват червячни модулни фрези и зъбодълбачни колела.

1.3.1. Класификация на червячни модулни фрези

Този инструмент представлява профилиран по съответен начин червяк (фиг. 1.12.) с режещи зъби, които имат преден и заден ъгъл. Предният ъгъл γ е ъгълът между предната повърхнина на зъба и радиалната равнина на фрезата. При фрезите за окончателно обработване е необходимо предният ъгъл да е равен на нула ($\gamma = 0$). Задният ъгъл α при външните ръбове е ъгълът между задната повърхнина на зъба и равнината, допирателна към външния цилиндър и преминаваща през дадения ръб; той е равен на $10 \div 12^\circ$. Задните ъгли при червячните фрези се получават чрез затиловане на затиловъчни машини (освен при острозаточените фрези, чиито задни ъгли се получават при заточването) [22, 51, 55, 56]. Страничните задни ъгли (около страничните режещи ръбове) са равни на $3 \div 4^\circ$. Червячните фрези се класифицират по вида на обработването, по броя на ходовете, по направлението на навивките и по конструкцията [158, 159].

По вида на обработването се различават фрези за грубо, чисто и прецизно обработване:

- Фрезите за грубо обработване са предназначени за предварително нарязване на зъбите. Те могат да се изработват с по-малка точност, отколкото фрезите за чисто обработване, и имат преден ъгъл, равен на $5 \div 7^\circ$. Дебелината на зъбите при тези фрези обикновено е по-малка, отколкото при фрезите за чисто обработване, и се определя в съответствие с прибавката за чисто нарязване.



Фиг. 1.12. Общ вид и основни размери на червячна фреза

- Фрезите за чисто обработване са стандартизирани. Размерите им са определени от БДС 14 645. 1978.

- Фрезите за прецизно обработване, предназначени за нарязване на зъбните колела на особено точни предавки, например за турбинните колела, обикновено се изработват с увеличен диаметър.

Според броя на ходовете се различават:

- *едноходови фрези;*
- *многоходови (двухходови и триходови) фрези.*

Многоходовите фрези имат увеличен ъгъл на подем на извивката и следователно дават по-голяма грешка на профила на нарязаните зъби. Те се използват при грубо нарязване с оглед да се намали машинното време. Напоследък в някои случаи многоходовите червячни фрези с увеличен диаметър се използват и за чисто обработване.

Според посоката на навивките се различават:

- *фрези с десни навивки на каналите;*
- *фрези с леви навивки на каналите.*

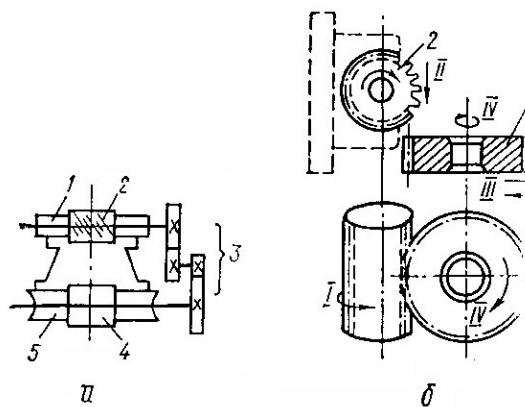
Според конструкцията те биват:

- *цели*- изработени от бързорежна стомана;
- *сглобяеми* (с гребеновидни ножове и отделни ножове).

1.3.2. Класификация на зъбофрезови машини

Принципната кинематична схема на зъбофрезова машина е показана на фиг. 1.13. Заготовката **1** на нарязваното зъбно колело е твърдо свързана с делителното червячно колело **5**, получаващо завъртане от делителния червяк **4**. Последният е кинематически свързан с червячната фреза **2** чрез сменните колела **3**. Зъбофрезовата машина има следните основни движения (фиг. 1.11. б) [27, 45, 88, 104] :

а) главно движение на рязането **I** – вретеното за фрезование с червячната фреза **2** се върти с постоянни обороти **n**, които се настройват с помощта на лирата за оборотите;



Фиг. 1.13. Зъбофрезова машина (а - кинематична схема, б - основни движения)

б) движение на обхождане **IV** -въртене на масата (или работния шпиндел) със заготовката **1** на нарязваното зъбно колело осигурено с помощта на делителните лири (на червячното колело **5** и червяка **4**) непрекъснато обхождане на инструмента и колелото; настройва се лирата **3** на отношение $i_{\text{дел}}$:

$$i_{\text{дел}} = \frac{C_{\text{дел}} \cdot Z_c}{Z} \quad (1.4)$$

където : $C_{\text{дел}}$ - характеристика на кинематическата верига на машината; Z_c - брой ходове на червячната фреза , бр.; Z - брой зъби на нарязваното колело, бр.

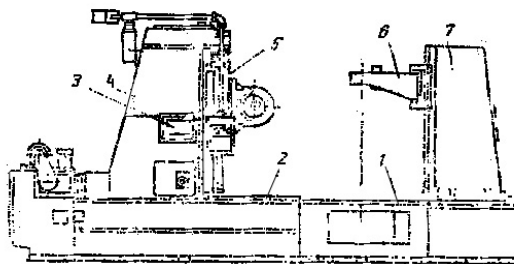
в) движение на подаване на фрезата **II** - леко преместване на фрезовия супорт надолу от оста на колелото **1**, т.е. осево подаване S_o [mm/об] на масата на фрезата, настройвано с помощта на лирата на подаването. Точността на сменните зъбни колела на лирата на зъбофрезовите машини трябва да бъде равна или по-точна от нарязваните зъбни колела.

г) движение на предварително установяване на инструмента и нарязваното зъбно колело в изходно работно положение **III**.

Подавателното движение се осигурява от преместването на супорта с фрезата надлъжно спрямо нарязваното зъбно колело (успоредно на оста му). При новите машини има и радиално подаване (за врязване). При нарязване на зъбните колела с наклонени зъби трябва да се осигури едно допълнително завъртане на масата, свързано с подавателното движение. Зъбофрезовите машини имат съответни кинематични вериги и органи за настройката им (лири), дадени в табл. 1.1.

В зависимост от положението на оста на заготовката зъбофрезовите машини се делят **на вертикални и хоризонтални** [51].

- **Вертикалните зъбофрезови машини** (фиг. 1.14) се изработват или с подаваща маса, или с подаваща стойка.



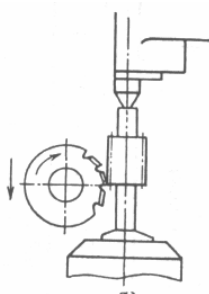
Фиг. 1.14. Общ вид на вертикална зъбофрезова машина: 1 - маса; 2 - основа; 3 - пулт за управление; 4 - колона (фрезова стойка); 5 - фрезов супорт; 6 – конзола; 7 - поддържаща стойка

Машината с подаваща маса, на която е закрепена заготовката, има неподвижна стойка с фрезов супорт и задна поддържаща стойка с напречник или без напречник. Сближаването на фрезата и заготовката се осигурява от хоризонталното преместване на масата (по направляващите).

Табл. 1.1. Кинематични вериги в зъбофрезовите машини

Основни кинематични вериги на фрезовите машини				
Верига	Какво се осигурява	Крайни елементи на веригата	Движения които трябва да бъдат свързани	Орган за настройване
Скоростна	Скорост на рязане v [m/min] ; оборотите на фрезата n [min ⁻¹]	Електродвигател – фрезово вретено	Въртене на вала на електродвигателя (n_e , min ⁻¹) и на фрезата (n , min ⁻¹)	Скоростна лира
За осово подаване	Подаване s_0 [mm/об]	Маса – винт за подаване на супорта	Един оборот на заготовката – осово преместване на супорта s_0 [mm]	Подавателна лира
Делителна	Брой на нарязваните зъби z	Маса – фрезово вретено	Един оборот на фрезата – k/z оборота на масата	Делителна лира
Диференциална	Ъгъл на наклона на нарязваните зъби β	Маса – винт за подаване на супорта	Преместване на супорта на една осова стъпка t_a – допълнително завъртане на заготовката $1/z$ оборота	Диференциална лира

Машината с подаваща стойка, която се премества за осигуряване на сближаването със заготовката, закрепена върху масата, може да бъде изпълнена със задна стойка или без нея. Обикновено големите машини се изпълняват по този начин.

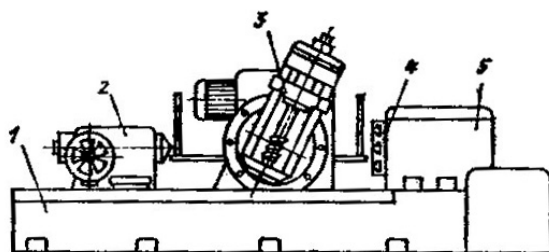


Фиг. 1.15. Схема на нарязване на зъбно колело на вертикална зъбофрезова машина

В съвременните машини с вертикална компоновка масата за закрепване на заготовката е неподвижна (фиг.1.15.). Премества се стойката с червячната фреза. Такива машини са удобни и надеждни за автоматизация и включване в автоматични линии. Осигуряват висока стабилност на системата маса-магазин-заготовка и постоянно положение на заготовката при всяко закрепване.

- **Хоризонталните зъбофрезови машини** (фиг. 1.16) са предназначени предимно за нарязване на зъби върху вал-зъбни колела (зъбни колела, направени като едно цяло с вала) и зъбни колела с малки размери. Те се изработват или с подаващо вретенно седло, което носи заготовката, или с подаващ фрезев супорт.

При машините с подаващо вретенно седло единият край на заготовката е закрепен към вретенното седло, а другият се опира на задния център.

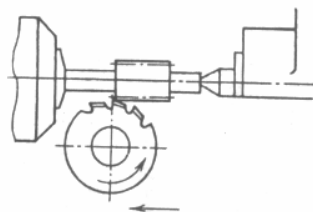


Фиг. 1.16. Хоризонтална зъбофрезова машина: 1 - основа; 2 - задно седло; 3 -фрезев супорт; 4 - планшайба; 5 -предно седло

Червячната фреза се намира под заготовката - на вретеното на фрезовия супорт, чиято шейна се премества хоризонтално по направляващите на тялото на машината, успоредни на оста на заготовката. Радиалното врязване на фрезата се осигурява чрез вертикално преместване на вретенното седло заедно със задния център и обработваното изделие.

При машините с подаващ супорт заготовката се закрепва към вретенното седло и към люнети. Червячната фреза се намира зад изделието - на вретеното на фрезовия супорт, чиято шейна се премества хоризонтално по направляващите на тялото, успоредно на оста на изделието, и с това осигурява работното подаване. Радиалното врязване на фрезата се осигурява от хоризонталното преместване на фрезовия супорт, перпендикулярно на оста на заготовката.

Конструкции на хоризонтални зъбофрезови машини намират приложение за обработване на малкомодулни зъбни колела (фиг.1.17.). Те имат затворена рамкова конструкция с широк фрезев супорт и добра достъпност до закрепващите елементи и инструмента.



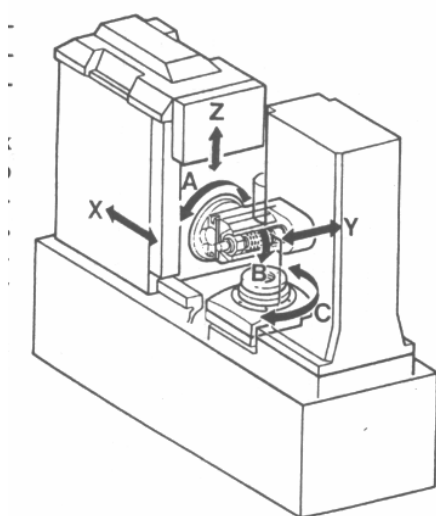
Фиг.1.17. Схема на нарязване на зъбно колело на хоризонтална зъбофрезова машина

Масата на зъбофрезовите машини се задвижва от червячна делителна предавка червяк-червячно колело. Главно от точността на тази предавка зависи кинематичната точност на машината. Затова не бива да се допуска твърде висока скорост на въртене на масата, за да се избегне прегряване на делителната предавка или заяждането ѝ.

Съвременните зъбофрезови машини имат ефективна система за цифрово програмно управление (ЦПУ), повишена статична и динамична стабилност на основните възли, голямо осово преместване на фрезата, възможност за обилно охлаждане при работа и безстепенно регулиране скоростта на работа.

Голямо разпространение намират зъбофрезовите машини с шест управлявани оси, притежаващи големи технологични възможности (фиг.1.18.) [51].

Освен линейните движения (радиално X , осово Z движение за подаване и осово Y за преместване на фрезата), управлявани се явяват и завъртането на фрезовата глава A , фрезата B и масата на машината C . При това съгласуваното въртене за обхождане на фрезата и масата със заготовката, точното ъглово позициониране на масата се осигуряват от допълнителен модул в машината.

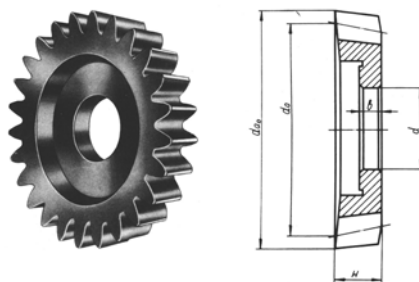


Фиг.1.18. Схема на зъбофрезова машина с шест управлявани оси

Масата на зъбофрезовите машини се задвижва от червячна делителна предавка червяк-червячно колело. Главно от точността на тази предавка зависи кинематичната точност на машината. Затова не бива да се допуска твърде висока скорост на въртене на масата, за да се избегне прегряване на делителната предавка или заяждането ѝ. При нарязване на зъбни колела с малък брой зъби, а също при използване на многоходови червячни фрези трябва да се определи фактичката скорост на плъзгане в червячната делителна двойка, която при чугунени червячни колела не бива да надвишава $1 \div 1,5 \text{ m/s}$, а при червячни колела с бронзов венец $2 \div 3 \text{ m/s}$. В конструкциите на машините е предвидена възможност за регулиране на делителната двойка, лагерите на масата и вретеното, клиновете на супортната шейна и червячната двойка в супорта.

1.3.3. Класификация на зъбодълбачни колела

На фиг. 1.19 е показана схема на дисково зъбодълбачно колело.



Фиг. 1.19. Зъбодълбачно колело

Дълбяка представлява закалено еволвентно зъбно колело, превърнато в режещ инструмент чрез създаване на задни и предни ъгли на неговите зъби. По конструкция зъбодълбачите се разделят на дискови, опашкови, чашковидни и втулковидни; по направление на зъбите - с прави и с наклонени зъби. За обработка на малкомодулни зъбни колела се използват дискови и опашкови дълбачи с прави зъби [15, 114, 115, 119].

Зъбодълбачното колело е коригирано зъбно колело, чиято предна повърхнина е изместена на определено разстояние от изходното сечение с оглед да се увеличи времето на работа на инструмента, който се презаточва по предната повърхнина. В изходно положение размерите на зъба на инструмента са равни на размерите на зъба на изходния контур на инструменталния гребен. Предният ъгъл при стандартни зъбодълбачни колела е $\gamma = 5^0$; задният ъгъл при върха на зъбите е $\alpha = 6^0$; задният страничен ъгъл се мени в известни граници при презаточванията и е приблизително равен на 2^0 . В много случаи се използват по-големи стойности на предните и задните ъгли за облекчаване на процеса на рязане.

1.3.4. Зъбодълбачни машини

Принципната кинематична схема на зъбодълбачна машина е показана на фиг. 1.20. Завъртането на дълбяка **1** на един зъб трябва да съответства на завъртането на един зъб на заготовката **2** на нарязваното колело, като се осигурява кинематически от сменните колела **3**. При зъбодълбането машината има следните основни движения (фиг. 1.18. а.) [56, 51, 88, 104]:

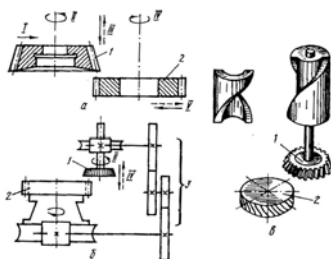
а) главно движение на рязане - инструменталното вретено с дълбяка **1** извършва бързо възвратно - постъпателно движение **III**; броя на ходовете в минута се установява с помощта на лирата за скоростта;

б) движение на обхождане - инструменталното вретено с дълбяка **1** и работната маса на машината със заготовката **2** извършват синхронно въртене **II** и **IV**; относителните скорости на тяхното въртене се настройват с помощта на лирата за делене **3** на предавателно отношение $i_{\text{дел}}$:

в) движение на ъглово подаване S_k - абсолютната скорост на въртене се настройва с помощта на лира за ъглово подаване.

$$i_{\text{дел}} = C_{\text{дел}} \frac{Z}{Z_o} \quad (1.5)$$

където: $C_{\text{дел}}$ - характеристика на кинематическата верига на делене на машината; Z_o - брой зъби на дълбяка, бр.; Z - брой зъби на нарязваното зъбно колело, бр.



Фиг. 1.20. Зъбодълбачни машини (а, - основни движения, б - принципна кинематична схема в – подавателен механизъм на дълбяка)

1.3.5. Класификация на дискови модулни фрези

Профилът на зъбите на фрезата, предназначена за чисто нарязване, трябва да отговаря на формата на обработваното междузъбие, която зависи от броя на зъбите на колелото - при по-голям брой на зъбите кривината на еволвентата намалява и профилът се доближава до праволинеен [15, 51, 56, 117]. Еволвентният профил на всяко зъбно колело зависи от неговия модул, броя на зъбите му и ъгъла на зацепване. Тъй като ъгълът на зацепването α е стандартен и постоянен, профилът на еволвентата за даден модул зависи от броя на зъбите. С увеличаване на броя на зъбите кривата на еволвентата се изменя и се приближава към права

линия. При колело с безкрайно голям брой зъби (зъбен гребен) еволвентата преминава в права линия .

Теоретически за всеки различен брой зъби на колелото е необходим отделен инструмент. Такова голямо количество фрези за нарязване на зъбни колела само с един модул струва много скъпо и е икономически неоправдано. Ето защо в зависимост от желаната точност на нарязване на зъбите в практиката се използват комплекти от 8, 15 или 26 фрези. Всяка фреза от комплекта има свой номер и е предназначена за нарязване на колела с определен диапазон на зъбите, като профилът само на едно от тях е точен, а останалите се получават с по-малка или по-голяма грешка. Не се препоръчва комплектът от 8 фрези да се използва за модули над 8 mm. Профилът на зъбите на фрезата от комплекта се изработва според най-малкия брой на зъбите от интервала, за който тя е предназначена. Например фреза № 6 има профил на зъбите, който отговаря на зъбно колело с 35 зъба.

При нарязване на зъбни колела с прави зъби се избира фреза, като се изхожда от зададения брой зъби.

1.3.6. Машины за зъбофрезозване с дискова модулна фреза

В зависимост от мащаба на производството се използват няколко начина за нарязване с дискова модулна фреза:

а) Нарязване на универсална фрезова машина, снабдена с делителна глава.

Това е най-простия начин за фрезозване на зъбите по метода на копирането. При този метод се изразходва много спомагателно време за извършване на деленето и празните ходове. Използва се в условията на единично и малкосерийно производство.

Фрезозването (по-точно зъбонарязването) може да се извърши на хоризонтална фрезова машина с дискова модулна фреза. Заготовката на нарязаното зъбно колело се закрепва на дорник, който се установява в центрите на делителния апарат и задното седло [15, 56, 65, 88]. Когато заготовката на нарязаното зъбно колело има радиус, по-голям от височината на центрите на делителния апарат, вретеното на апарата се установява във вертикално положение. В подобни случаи може да се използва и кръгла делителна маса. Фрезозването се извършва при вертикално подаване на масата.

При нарязване на зъбни колела на хоризонталната фрезова машина с дискова модулна фреза главното движение се извършва от режещия инструмент - дисковата модулна фреза.

Спомагателното движение и подаването се извършват от масата на машината с делителния апарат и нарязаното зъбно колело. След като се фрезозва междузъбието, масата със заготовката и делителния апарат се отдръпва в изходно положение. Чрез делителния апарат заготовката се завърта на един зъб, след което започва фрезозването на следващото

междузъбие. Така последователно се нарязват всички междузъбия. Извършва се по подобен начин, както при обработването на универсална фрезова машина. Разликата е тази, че машината работи с полуавтоматичен цикъл - ръчно се извършва само сменяването на заготовката и пускането на машината. Основният недостатък на този метод е, че една и съща фреза се използва за грубо и за чисто фрезозане.

б) Нарязване на зъбофрезов полуавтомат с една фреза.

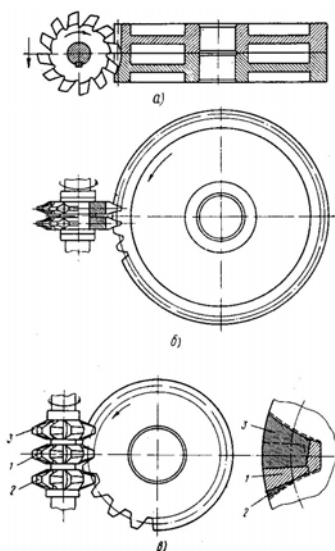
Това води до бързо износване на фрезата и намаляване точността на обработваните зъбни колела. Използва се в условията на дребносериен и серийно производство.

в) Нарязване на зъбофрезов полуавтомат с няколко фрези.

Върху вретеното на машината се установяват две или три фрези. Отначало с първата се извършва прорязване на всички зъби. След това дорникът заедно с фрезата се премества автоматично по дължината на оста си така, че на мястото на първата фреза да дойде втората (получистова). Тя оформя зъбите, като се оставя известна прибавка за третата (чистова) фреза (фиг.1.21). За получистова фреза най-често се използва износена чистова фреза. При обработване на неточни зъбни колела нарязването може да стане само с две или с една фреза. Този метод се използва в условията на голямосериен и масово производство.

г) Нарязване на зъбофрезов автомат.

Извършва се по същата схема, както при зъбофрезните полуавтомати, но се работи при пълен автоматичен цикъл. Този начин се използва в условията на голямосериен и масово производство.



Фиг. 1.21 Фрезозане на зъбите на цилиндрични зъбни колела а – едновременно на две зъбни колела, б – на едно колело с две дискови фрези, в – с три дискови модулни фрези

Растящите изисквания за точност и увеличението на количеството и типоразмера на произвежданите зъбни колела води до необходимост от използване на гъвкави производствени технологични системи с лесно пренастройване за ново производство. На базата на това се използват усъвършенствани технологични процеси за производство на зъбни колела и се създава съвременно зъбообработващо оборудване. По отношение на развитие на зъбообработващите машини мога да се отбележат следните направления [144]:

- за основните операции за изработване на зъбните колела да се използват машини с ЦПУ;
- използваните машини са с голяма степен на универсалност, което позволява производство на голям набор от зъбни колела;
- новите машини съчетават в себе си възможност за обработване по различни методи на зъбни колела;
- за намаляване на времето за обработване се използват роботизирани системи за установяване на заготовката и сваляне на готовия детайл;
- използват се производствени центрове съставени от няколко машини, оборудвани с автоматичен контрол, свързани чрез системи за транспорт и манипулатори. По този начин се осигурява комплектно производство на целия продукт (зъбно колело);
- в производството на зъбни колела и зъбни предавки е налице склонност на компаниите да се специализират в това направление като доставките могат да стават по каталог или чрез заявка.

Приложението на нови технологии и оборудване поставя изисквания и към използваните инструменти:

- използване на нови материали за изработване на инструменти;
- подобряване на процеса на стружкоотделяне и от там работа с по големи режими на рязане. Това води до намаляване на времето за обработване;
- използване на точни инструменти и режими на рязане, които позволяват получаване на зъбно колело без необходимост от довършителна обработка;
- при необходимост от последващо шлифование се използват нови абразивни материали или диамантни дискове. Това намалява необходимостта от честото им презаточване.

Производството и потреблението на зъбни предавки непрекъснато се увеличава и бележи ръст с 4-6 %. В 2005 г. този обем достигна около 100 милиарда долара. Поради това интересът към зъбните колела и зъбните предавки на конструкторите, технолозите, производителите непрекъснато се увеличава [16, 17].

Най-голям производител на зъбни колела в света се явява САЩ с около 30 % от световното производство. Най-голямо приложение зъбните колела там са намерили в четири основни направления: автомобилна промишленост; общо машиностроене (производство на металорежещи машини, подемно-транспортно машиностроене и др.); самолетостроене и корабостроене. В САЩ 80% от произвежданите зъбни колела намират приложение в автомобилната промишленост. В световен мащаб около 65%от зъбните колела се използват в тази област. Използването им в това направление поставя големи изисквания за точност на обработването и получаване на качествена продукция.

Най-големи производители на зъбни колела и зъбни предавки в света след САЩ се явяват Япония, Германия, Китай, Италия, Франция, Англия и др.

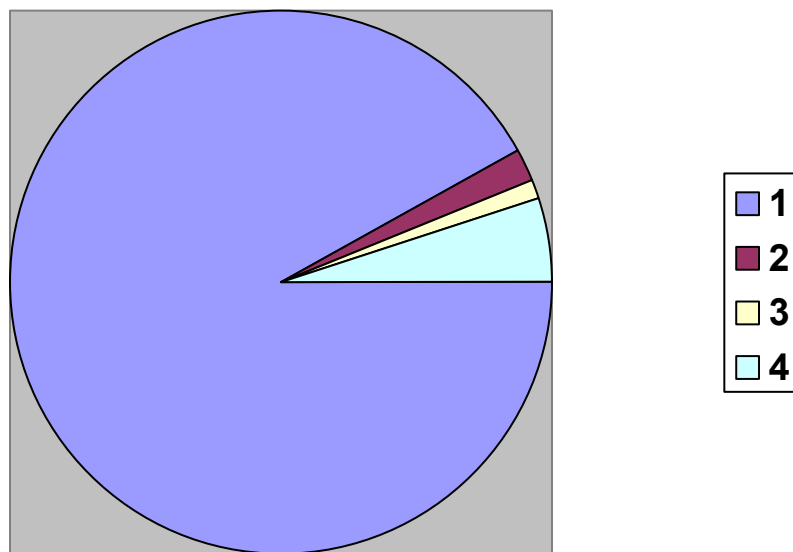
Продукцията на японските производители на зъбни колела намира приложение в основно в автомобилостроенето, а също така и в корабостроенето и общото машиностроене. Германия е лидер в областта на използване на зъбните предавки в общото машиностроене. Производството на зъбни колела и зъбни предавки в Китай бележи бързо развитие свързано с развитието на автомобилната промишленост.

В изследване направено от списание „Gears Technology” се дават оптимистични данни за производството и потреблението на зъбни колела и зъбни предавки. Данните сочат, че фирмите отговорили на въпросите залагат ръст на производство 18-22%. От тези данни се вижда, че използваното оборудване и технологии за производство в 18% от фирмите са на световно ниво, 47% са конкурентноспособни, 27% добро оборудване с възможност за подобряване.

Производителите на зъбообработващи машини основно се намират в Япония и Западна Европа (Германия и Швейцария). Поради тази причинна използваното оборудване в тези области е по ново и съвременно. По данни от германски производители критичният срок за експлоатация на зъбообработващите машини не трябва да превишава 10 години.

От данните дадени в изследването може да се даде по какъв начин е разпределено отношението на различните методи за обработване на зъбни колела: 92% от зъбните колела се получават чрез рязана; 2% се получават чрез пластично деформиране (накатка); 1% чрез щамповане или шприцване на зъбни колела от пластмаса; 5% получаване по други методи на обработване (фиг. 1.22).

На база на публикациите в определени големи международни конференции по зъбни колела, зъбни предавки и трансмисии за периода 2000-2007 година могат да се направят изводи за основните научни направления, в които се провеждат изследвания в тази област.



Фиг.1.22 Методи за обработване на зъбни колела (1- обработване чрез рязане; 2- получаване чрез пластично деформиране; 3 – чрез шприцване ; 4 – получаване по други методи на обработване)

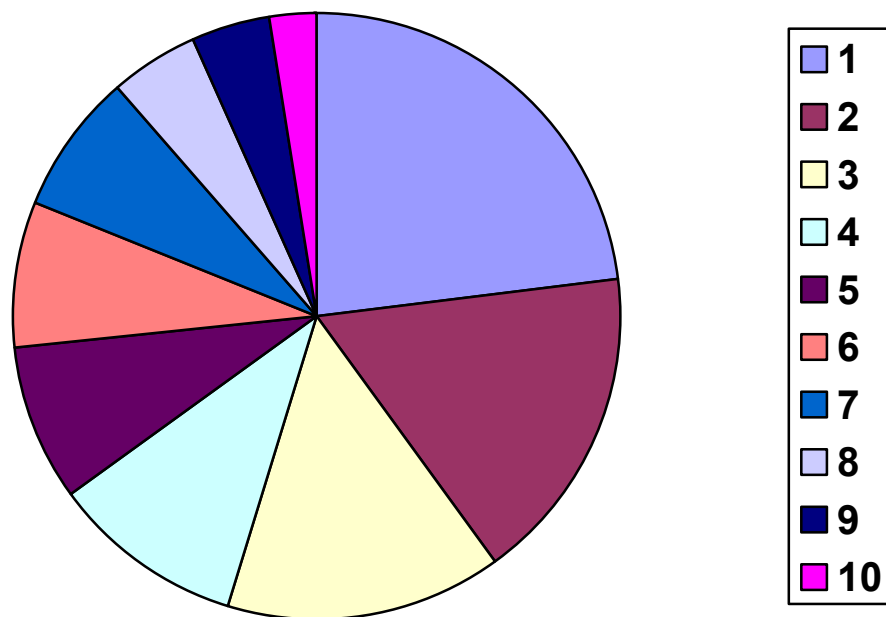
Тези конференции са следните:

- „Силови трансмисии и предавки”, конференция на американското общество на инженерите механици, Балтимор, САЩ, 2000;
- „Предавки, силови предавки и механични системи”, Нотингам, Англия, 2000;
- „Кинематични и силови предавки”, Фукуока, Япония, 2001;
- „Механични силови предавки”, Чонгинг, Китай, 2001;
- „Съвременни информационни технологии. Проблеми на изследванията, производството и проектирането на зъбни предавки, Ижевск, Русия, 2001;
- Конференция по предавките, Мюнхен, Германия, 2002;
- Силови трансмисии и предавки”, конференция на американското общество на инженерите механици, Чикаго, САЩ, 2003;
- Конференция по предавките, Мюнхен, Германия, 2005;
- „Механични силови предавки”, Чонгинг, Китай, 2006;
- „Силови предавки 06”, конференция на Балканската асоциация по кинематични и силови предавки, Нови Сад, Сърбия, 2006;
- „Световен конгрес по ТММ секция зъбни колела и зъбни предавки”, Безансон, Франция, 2007;

- „Силови трансмисии и предавки”, конференция на американското общество на инженерите механици, Лас-Вегас, САЩ, 2007;

На база на докладваните на тези конференции разработки (анализирани са над 1500 публикации) могат да бъдат открити следните научни направления в които се провеждат изследвания в областта на зъбните колела и зъбните предавки (фиг.1.23):

- динамика и якост - 23 %;
- технология, оборудване, производство – 16,9 %;
- геометрия, теория на проектирането – 14,8 %;
- нови конструкции – 10,4 %;
- изследвания, експерименти – 8,1 %;
- компютърно проектиране, моделиране – 7,9 %;
- вибрации и шум – 7,6 %;
- приложение – 4,5 %;
- материали, смазки, триене – 4,4 %;
- точност – 2,4 %.



Фиг. 1.23. Основни научни направления в областта на зъбните колела и зъбните предавки (1- динамика и якост; 2 - технология, оборудване, производство; 3 - геометрия, теория на проектирането; 4 - нови конструкции ; 5 - изследвания, експерименти; 6 - компютърно проектиране, моделиране; 7 - вибрации и шум; 8 – приложение; 9 - материали, смазки, триене; 10 - точност

Цитираните данни достатъчно точно показват основните тенденции в развитието на разработките и изследванията в областта на зъбните колела и зъбните предавки. Участието на представители от промишлеността в работата на научните конференции дава възможност те да получат необходимата информация за тенденциите в развитие на теорията и практиката на зъбните колела и зъбните предавки.

Големите изисквания за качество на произвежданата продукция са свързани с изискванията за нейната реализация на пазара. За да може това да се получи е необходимо да се осигури съответното качество (точност) на възлите, от които е съставено дадено изделие, а неговото качество основно зависи от точността на детайлите от които е съставено. Това с особена сила важи за зъбните колела и зъбните предавки, които намират приложение в много направления на промишлеността. Познаването на причините за поява на грешки при тяхното обработване дава възможност за намаляването им и получаване на детайли с по-високо качество.

Точността при обработването на зъбни колела по метода на обхождане основно зависи от точността на инструмента и точността на използваното оборудване. Грешките в профила на инструмента (грешка в стъпката, грешка в ъгъла на профила, грешка в ъгъла на профила от нерадиалност на предната повърхнина, грешка в стъпката на винтовите стружкови канали водят до получаване на съответните грешки върху обработваното зъбно колело. Износването на фрезата, температурните деформации, установяване на инструмента върху дорника също влияят върху получаваната точност.

Точността на машината също съществено влияе върху точността на обработваното зъбно колело. При оборудването могат да се получат геометрични грешки от неточност на обработването и монтажа на основни детайли и възли, водещи до грешки при преместване на основни елементи на машината и водещи до получаване на радиални или осови грешки в зъбното колело. Получаването на кинематични грешки основно е свързано с наличие на неточност във веригата за фрезование (обхождане), зъбната предавка на диференциала, зъбната предавка на подаването.

Върху получаваната точност оказва влияние и стабилността на оборудването. Основно влияят деформациите на предно и задно седло и супорта. Грешките от настройване на технологичната система на размер водят до неточност на зъбното колело. Отделяната в процеса на рязане топлина предизвиква деформация на елементите на машината и поражда грешки при обработването.

Познаването на тези грешки и тяхното влияние върху точността на обработваното зъбно колело дава възможност на конструкторите и технолозите активно да влияят върху

технологичния процес и да търсят начини за повишаване на получаваната при обработване точност.

1.4. Математически методи и моделиране на технологични процеси

За реализация на съвременните принципи на технологично проектиране се поражда необходимост от създаване на математичен модел на технологичния процес. Моделирането е един от най-разпространените начини на изучаване на различни процеси и явления, разглеждани като сложни системи. За построяване на такъв модел на технологичния процес (ТП) е необходимо той да се опише с помощта на стандартни символи. Те се намират в определено взаимодействие и позволяват да се приведе словесното описание на този процес във формален език. В този случай се описва даден ТП на определен програмен език използван в компютрите и след това решаването на задачите за технологично проектиране с тяхна помощ. Построяването на формално (математично) описание на ТП с необходимата степен на достоверност се нарича формализация. Резултатът от това е построяването на неговия модел. Разработването на модели се базира на представяне на ТП като сложна система, параметрите на която в общия случай зависят от времето и имат вероятностен характер [14, 19, 83]. Поради това, моделът на ТП представлява съвкупност от функционални схеми, уравнения, логически оператори, номограми, таблици. С тяхна помощ характеристиките на състояние на системата се определят в зависимост от параметрите на процеса, входните сигнали и времето.

1.4.1. Математическо моделиране на технологични процеси, изисквания и класификация

Сложността на математичното описание на конкретен ТП зависи от степента на неговото познаване и необходимата детайлизация на модела. За многооперационните ТП е правилно да се построяват модели на отделните операции, а след това да се описва взаимодействието между тях. Тъй като математичния модел на ТП представлява система от зависимости между показателите на процеса (точност, надеждност, производителност) и неговите параметри, то заедно с показателите за ТП е необходимо да се открие и системата на неговите параметри за да се включат във формализираната схема. Степента на обхващане на всички страни на моделирания ТП, зависи от изискванията, поставени към модела.

Важно изискване е точността на съответствие на модела и реалния ТП. Тя може да се постигне чрез правилно описване на взаимодействието на параметрите на процеса. Изискванията за точност на модела зависят от неговото предназначение и особеностите на ТП. Понякога използването на много сложни модели не е математически оправдано. Поради

това е целесъобразно за даден процес или операция да има набор от модели с различна сложност и точност и те да се използват по предназначение.

Друго изискване поставяно към модела на ТП е за неговата чувствителност. Тя се изразява в значително изменение на числовите значения на моделираните технико-икономически показатели (точност, надеждност, производителност) при сравнително малко изменение на изследваните технологични параметри. Високата чувствителност на модела облекчава процеса на изследване на конкретния ТП или операция.

Изискването свързано с използване на компютърна техника (КТ) за технологично проектиране, е непрекъснатост на модела на процеса. Под това изискване се разбира приложение на модела за широк диапазон от технологични режими. Ако моделът не притежава свойството непрекъснатост в голям интервал на изменение на режимите изчисленията се усложняват.

На основата на системния подход към анализа на ТП може да се въведе условно разделяне на моделите на: детерминирани и вероятностни, статични, динамични и комбинирани. Построяването на детерминиран модел на ТП произлиза от функционалната връзка между физичните величини:

$$y = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.6)$$

където y е технико-икономическият показател, с който се моделира процеса; $x_1, x_2, \dots, x_n$ са параметрите на ТП.

По този начин наличието на детерминиран модел означава съществуването на еднозначна функционална зависимост между изследваните показатели на процеса и значения на технологични параметри (например температура, скорост на рязане и др.).

Вероятностният модел на ТП се получава в резултат на описание на връзката между закона на разпределение на технико-икономическите показатели на ТП и неговите параметри, които могат да се разглеждат като случайни величини или случайни функции.

Вероятностният модел на процеса се представя във вид на статистически масив, закони на разпределение, уравнение на регресия и др.

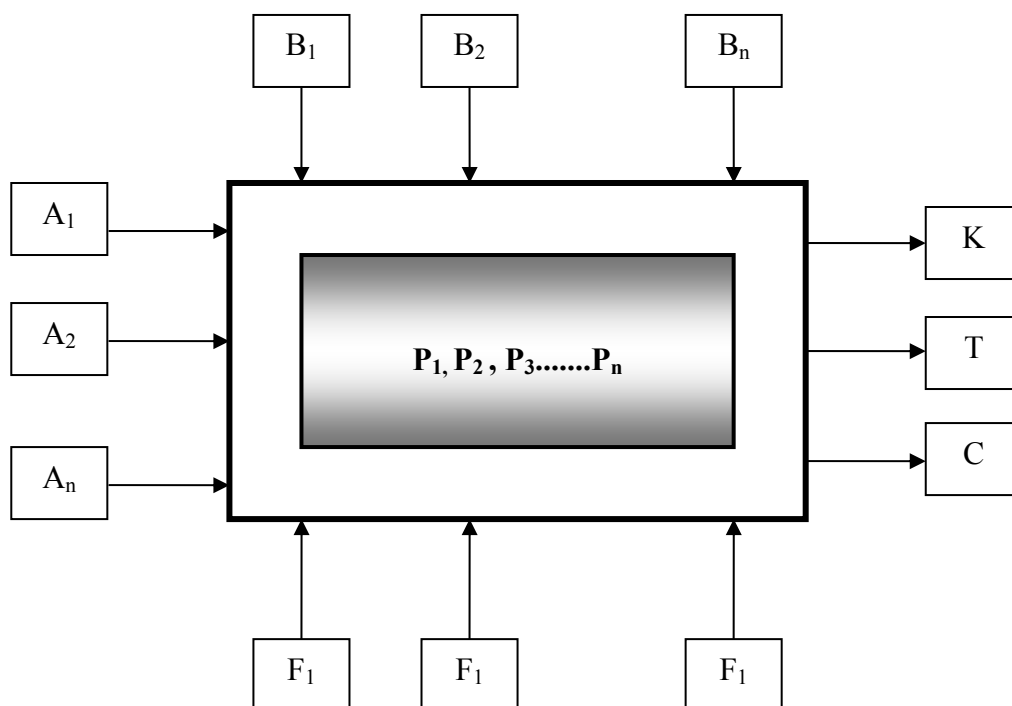
Детерминираният и вероятностен модел се намират във връзка помежду си. Първият изисква експериментална проверка и статистическа обработка на получените данни. Вторият модел се строи като се отчитат теоретичните предпоставки отразяващи физико-химичните особености на конкретния ТП. Тази връзка се проявява при използване на методите за планиране на експеримента при търсене на оптимален режим на ТП.

Детерминираният статичен модел отразява функционалната зависимост между технико-икономическите показатели на ТП и неговите параметри, не зависещи от времето. Тези модели се представят като система от алгебрични уравнения.

Детерминираният динамичен модел се получава в резултат на формализация на ТП, на параметрите, които се явяват функция на времето или производни от параметри по времето.

Вероятностният динамичен модел отразява връзката между параметрите на ТП и неговите технико-икономически показатели, разглеждани като случайни функции. Динамичните характеристики на тези модели отразяват математичното очакване и автокорелационните функции на случайните процеси.

Математичния модел на технологичния процес е съвкупност от уравнения, определящи значението на изходните параметри и ограничения на някои аргументи на уравненията. В общ вид математичния модел на една операция може да се представи със схемата (фиг.1.24.)



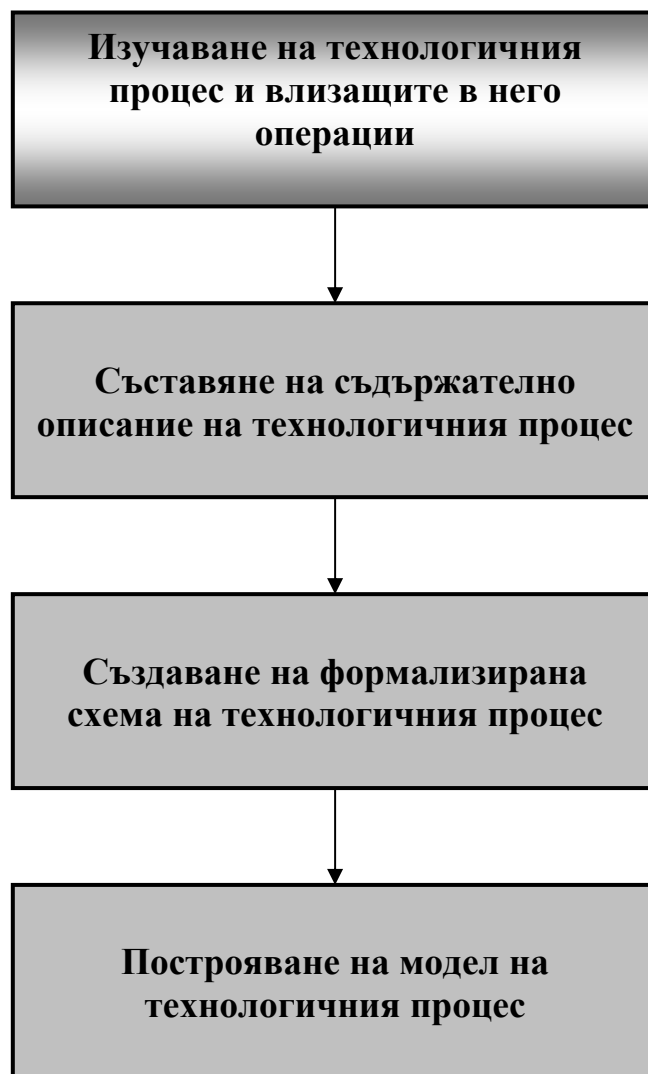
Фиг. 1.24. Схема на формиране на изходни показатели за операция

На схемата на фиг. 1.24 са използвани следните означения: К е точността получавана при дадената операция; Т – времето необходимо за изпълнение на операцията; С – себестойност на операцията; $A_1 \dots A_n$ – характеристики на предмета на труда постъпващи в

технологичната система; $B_1 \dots B_n$ – характеристики на технологичната система; $F_1 \dots F_n$ – фактори, действащи на технологичната система; $P_1 \dots P_n$ – елементи на режима на рязане.

В общ вид математичния модел на операцията от фиг. 1. 24. може да се запише по следния начин:

Общата последователност на етапите за съставяне на модел на ТП може да се представи схематично, както е показано на фиг. 1.25.



Фиг. 1.25. Обща схема на съставяне на модел на ТП

Първият етап на построяване на модел на ТП се явява неговото изучаване. При това трябва да бъдат открити основните закономерности на процеса, позволяващи още на този етап да се прилага метода на типизация и груповите технологии. Използването на тези методи значително облекчава следващото формализиране на процеса, като позволява да се намери единна логическа схема на построяване на технологичните операции, преходи,

установки. В етапа на изучаване на ТП влиза провеждането на експерименти, обработване на получените данни, обобщаване на резултатите. Необходимостта от провеждане на тези работи се определя от значителното относително тегло на операции с различна физическа природа (химични, електрически, магнитни), които нямат разработени детерминиран или вероятностен модел.

Съдържателното описание е резултат от проведеното в предните етапи изучаване на ТП. То може да бъде представено като графично изображение на технологични вериги и необходимото описание на всички операции. Това описание дава общи сведения за физичната природа и характеристика на операциите и преходите. Дава се тяхното значение в общата схема на ТП и характера на взаимодействие между тях. В създавания математичен модел, освен параметрите на ТП и тяхната характеристика (таблици, графики), се включват и в съдържателното описание, което се съставя от специалисти-технолози и не се представя в математична форма, но се явява основа за построяване на формализационната схема на ТП.

Формализираната схема на ТП е преходен етап от съдържателното описание към математичен модел. В състава на формализационния модел влизат: система от параметри на проектирания ТП, технико-икономически показатели на процеса, съвкупност от начални условия, известни модели на операции и преходи, влизащи в разработвания ТП.

Пресметнатите данни се разглеждат на етапа на съставяне на съдържателно описание на процеса. Във формализираната схема тези данни се включват в концентриран вид като функционални схеми, кратки словесни пояснения.

Математичният модел на ТП е краен резултатна неговата формализация. При това всички съотношения между технико-икономическите показатели и параметрите на процеса се представят във вид на аналитични зависимости.

Формализираната схема на процеса е междинно звено между съдържателното описание и математичния модел. Тя се разработва не във всички случаи, а само тогава когато поради сложността на изследвания процес или някой негови елементи, непосредственият преход между съдържателното описание и математичния модел е невъзможен или нецелесъобразен. Преобразуването на формализираната схема в математичен модел се извършва с математични методи без приток на допълнителна информация за процеса. За тази цел всички съотношения трябва да се запишат в аналитична форма, за да се изразят логически условия във вид на системи от неравенства, а също така по възможност да се придаде аналитична форма на всички сведения, съдържащи се във формализираната схема.

Построяването на математичен модел на сложна система (сложен ТП) често е практически невъзможно поради тяхната сложност. В такива случаи системата (ТП) се

разделя на краен брой подсистеми (елементи или операции), като се запазват връзките между тях. Математичният модел на сложна система се състои от математични модели на нейните елементи (операции) и математичните модели на връзка между тях.

Използването на КТ за технологично проектиране изисква построяване на моделиращ алгоритъм, след създаване на модел на ТП.

1.4.2. Метод за пресмятане на точността, основан на моделиране на технологични процеси

Голямо значение за решаване на въпросите за точността на производството има разработването на математичен модел (математическо описание) на закономерностите и взаимовръзките съществуващи в ТП. Правилно построен математически модел дава възможност не само да се прогнозира, точността на всяка от съставлящите операции от ТП, но и обосновано да се подходи към разработване на оптимална система за автоматично управление на тези процеси за получаване на висококачествена продукция при минимални загуби за производството.

Методиката се базира на анализ на структурни схеми, методите на теория на вероятностите, математическата статистика и матричната алгебра. Тя има обобщен характер независимо от физическата същност на процесите и може да се използва за разнородни операции като обработване на металите чрез рязане, термична обработка, сглобяване.

На фиг. 1.26. е показана обобщена схема на еднооперационен ТП с много входи и изходи, разглеждана като статическа преобразуваща схема. Със $x_1, x_2, \dots, x_n$ се означават входните параметри, характеризиращи изходните фактори (грешки на размерите, отклонение на формата, микрогеометрия, твърдост) на обработваната заготовка. Със $z_1, z_2, \dots, z_m$ се характеризират изходните параметри, определящи количествените характеристики на качеството (грешка на размерите, отклонение от формата и разположението на повърхнините, вълнообразност, физико-механичните свойства) на детайла подложен на обработване. Със $y_1, y_2, \dots, y_p$ се означават вторите входни параметри, характеризиращи изходните фактори (стабилност на ТС, износване и притъпяване на инструмента, температурни деформации, грешка от установяване на заготовката) отнасящи се към преобразуващата система. Със символите $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{mn}$ и $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{mp}$ се означават преводните коефициенти, отразяващи влиянието на изходните параметри на общата сумарна грешка при обработването. Величините $a_{10}, a_{20}, \dots, a_{m0}$ са постоянните съставлящи на изходните променливи, определят систематичните грешки, присъщи на самата преобразуваща система. За линейна преобразуваща система на основата на принципа на

суперпозицията, всяка от грешките при обработването, може да се разгледа като линейна комбинация на технологични фактори x_i и y_k :

$$z_i = a_{i0} + \sum_{j=0}^n a_{ij} x_j + \sum_{k=1}^p b_{ik} y_k \quad (1.8.)$$

При анализ на точността на ТП с много входни и изходни променливи е удобно да се премине към матрична форма на запис на уравнение 1.7. , което има следния вид :

$$Z = A_0 + AX + BY \quad (1.9.)$$

$$\text{където } Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{pmatrix}; A_0 = \begin{pmatrix} a_{01} \\ a_{02} \\ \vdots \\ a_{0m} \end{pmatrix}; X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}; Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1p} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mp} \end{pmatrix}. \quad (1.10)$$

Като се отчете записването на уравнения в матрична форма (ф-ла(1.9) схемата на ТП (фиг.1.25) може да бъде заменена с еквивалентна матрична структурна схема, показана на фиг.1.25 б и в.

На матричните структурни схеми изходните фактори и грешки при обработването се представят като матрици-стълбове X , Y и Z , звената, през които преминават изходните фактори се наричат матрици на взаимната връзка A и B .

Полученото уравнение (1.9) за връзка може да се използва само за пресмятане на точност само на единични детайли. То може да се използва като основа за анализ на точността на партида детайли изработени в серийно и масово производство. При това изходните фактори, грешките при обработването се разглеждат като случайни величини (или случайни функции), ограничени от съответните допускови полета.

Във връзка с това, че изходните променливи се разглеждат като линейни функции на входните променливи, като се приложат към уравнение (1.9.) известни правила от теория на вероятностите, се получава матричен запис, свързващ по между си вероятностните характеристики на изходните фактори и грешките при обработване, а именно: математическото очакване.

$$M_z = A_0 + AM_x + BM_y \quad (1.11)$$

И дисперсията

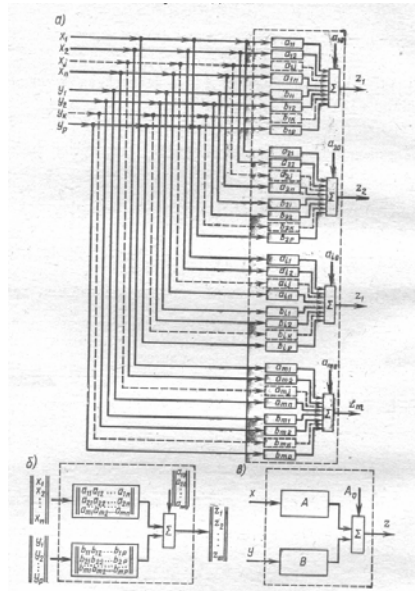
$$D = CD_x + FD_y \quad (1.12)$$

Влизащите в двете зависимости матрици имат вида :

$$M_z = \begin{Bmatrix} m_{z_1} \\ m_{z_2} \\ \vdots \\ m_{z_m} \end{Bmatrix}; M_x = \begin{Bmatrix} m_{x_1} \\ m_{x_2} \\ \vdots \\ m_{x_n} \end{Bmatrix}; M_y = \begin{Bmatrix} m_{y_1} \\ m_{y_2} \\ \vdots \\ m_{y_p} \end{Bmatrix} \quad (1.13)$$

$$D_z = \begin{Bmatrix} D_{z_1} \\ D_{z_2} \\ \vdots \\ D_{z_m} \end{Bmatrix}; D_x = \begin{Bmatrix} D_{x_1} \\ D_{x_2} \\ \vdots \\ D_{x_n} \end{Bmatrix}; D_y = \begin{Bmatrix} D_{y_1} \\ D_{y_2} \\ \vdots \\ D_{y_p} \end{Bmatrix}, \quad (1.14)$$

$$C = \begin{Bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & \dots & a_{1n}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & \dots & a_{2n}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1}^2 & a_{m2}^2 & \dots & a_{mn}^2 \end{Bmatrix}; F = \begin{Bmatrix} b_{11}^2 & b_{12}^2 & \dots & b_{1n}^2 \\ b_{21}^2 & b_{22}^2 & \dots & b_{2n}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{m1}^2 & b_{m2}^2 & \dots & b_{mn}^2 \end{Bmatrix}. \quad (1.15)$$



Фиг. 1.26. Общи схеми на връзка между входните и изходни грешки на технологичните процеси

В общия случай когато технологичните фактори са свързани помежду си с корелационна зависимост, във формулата за дисперсията се въвеждат група допълнителни съставки, съдържащи коефициентите на корелация:

$$D_{z_i} = \sum_{j=1}^n a_{ij}^2 D_{x_j} + \sum_{k=1}^p b_{ik}^2 D_{y_k} + \sum_{\substack{j, \mu=1 \\ j \neq \mu}}^n a_{ij} a_{i\mu} \rho_{x_j, x_\mu} \sigma_{x_j} \sigma_{x_\mu} + \\ + \sum_{\substack{k, s=1 \\ k \neq s}}^p b_{ik} b_{is} \rho_{y_k, y_s} \sigma_{y_k} \sigma_{y_s} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p a_{ij} b_{ik} \rho_{x_j, y_k} \sigma_{x_j} \sigma_{y_k} \quad (1.16)$$

където $\rho_{x_j, x_\mu}, \rho_{y_k, y_s}, \rho_{x_j, y_k}$ са коефициентите на корелация между изходните фактори x_j и x_μ , y_k и y_s , x_j и y_k ; $\sigma_{x_\mu}, \sigma_{x_j}, \sigma_{y_k}, \sigma_{y_s}$ са средно квадратичните отклонения на грешките на тези изходни фактори.

От формули 1.10 и 1.15 се вижда, че за пресмятане точността на обработване по зададени стойности на математическо очакване m_{x_j}, m_{y_k} , дисперсията D_{x_j}, D_{y_k} и коефициентите на корелация $\rho_{x_j, x_\mu}, \rho_{y_k, y_s}, \rho_{x_j, y_k}$ е необходимо да са известни числените стойности на преводните коефициенти a_{ij}, b_{ik} и параметрите a_{i0}, b_{i0} . Тези коефициенти могат да бъдат намерени по различни начини. Когато има функционална зависимост, описваща изучаваните грешки, преводните коефициенти се определят аналитично, като се пресмятат стойностите на частните производни. В останалите случаи коефициентите на влияние се определят емперически.

Правата задача на пресмятане се заключава в това, че по известни стойности на вероятностни характеристики на изходните фактори на заготовката и преобразуващата система и коефициентите за връзка на уравненията се пресмята точността на обработване по зависимости 1.10., 1.11., 1.15.

При обратната задача се определя какви да са грешките на изходните фактори, за да се получи точност на обработването в определени зададени граници.

При решаване на втората задача не съществува единствено решение, тъй като броя на уравненията за определяне на грешките при обработване не е равен на броя на неизвестните изходни фактори ($m \neq n + p$). Това означава, че зададената точност на обработване може да се получи, като се избират различни стойности на грешките на технологичните фактори.

За решаване на тези задачи може да се използват методите на линейното, нелинейното и динамичното програмиране.

До сега за определяне на сумарната грешка се използваше изчислително-аналитичния метод. При него основен е принципът на суперпозицията. При него действието на всяка елементарна грешка се разглежда независимо от другите, а сумарната грешка се определя чрез събиране на всички грешки. Основно предимство на този метод е неговата простота и възможност за приложение в инженерната практика.

Друг метод за решаване на проблема за повишаване на точността на изработване на детайлите е метода на размерния анализ. Чрез него се отчита влиянието на изменението на положението на детайлите от технологичната система на грешките при изработването.

Математическото описание на образуването на геометрични грешки при обработване на детайлите е отражение на влиянието на много фактори, пораждащи неточност. Трудностите при решаването на тази задача се обясняват с голямото разнообразие на технологични системи, технологични процеси, материали за изработване [5, 26, 27]. За да може да се използва общ механизъм за образуване на грешките, като се отчита всеки фактор се използва метода на координатните системи с деформиращи се връзки. При него всяка технологична система (машина) се разглежда като съвкупност от детайли (възли). Детайлите се лишават от определен брой степени на свобода чрез поставяне на опорни точки, които се разглеждат като еластични елементи. Тези опорни точки се поставят на мястото на основните и спомагателни бази на детайла.

На базата на това детайлите могат да се заменят със съвкупност от работни и базиращи повърхнини и да се построи система от координати на основните базови детайли. Машината (технологичната система) може да се замени с еквивалентна схема. Тя е съвкупност от правоъгълни координатни системи разположени в такава последователност, както са разположени възлите (детайлите) на машината, с наложени на всяка система определен брой деформиращи връзки (опорни точки). Еквивалентната схема на машината (технологичната система) представлява съвкупност от работни повърхности и координатни системи, построени на основните бази на детайлите от технологичната система, с наложените им деформиращи се връзки като опорни точки, разположени в съответствие със схемата на базиране на всеки детайл.

Представянето на машината като еквивалентна схема може да се използва за основа за построяване на математичен модел на получаване на грешки за машини от различен тип, конструкция и компоновка.

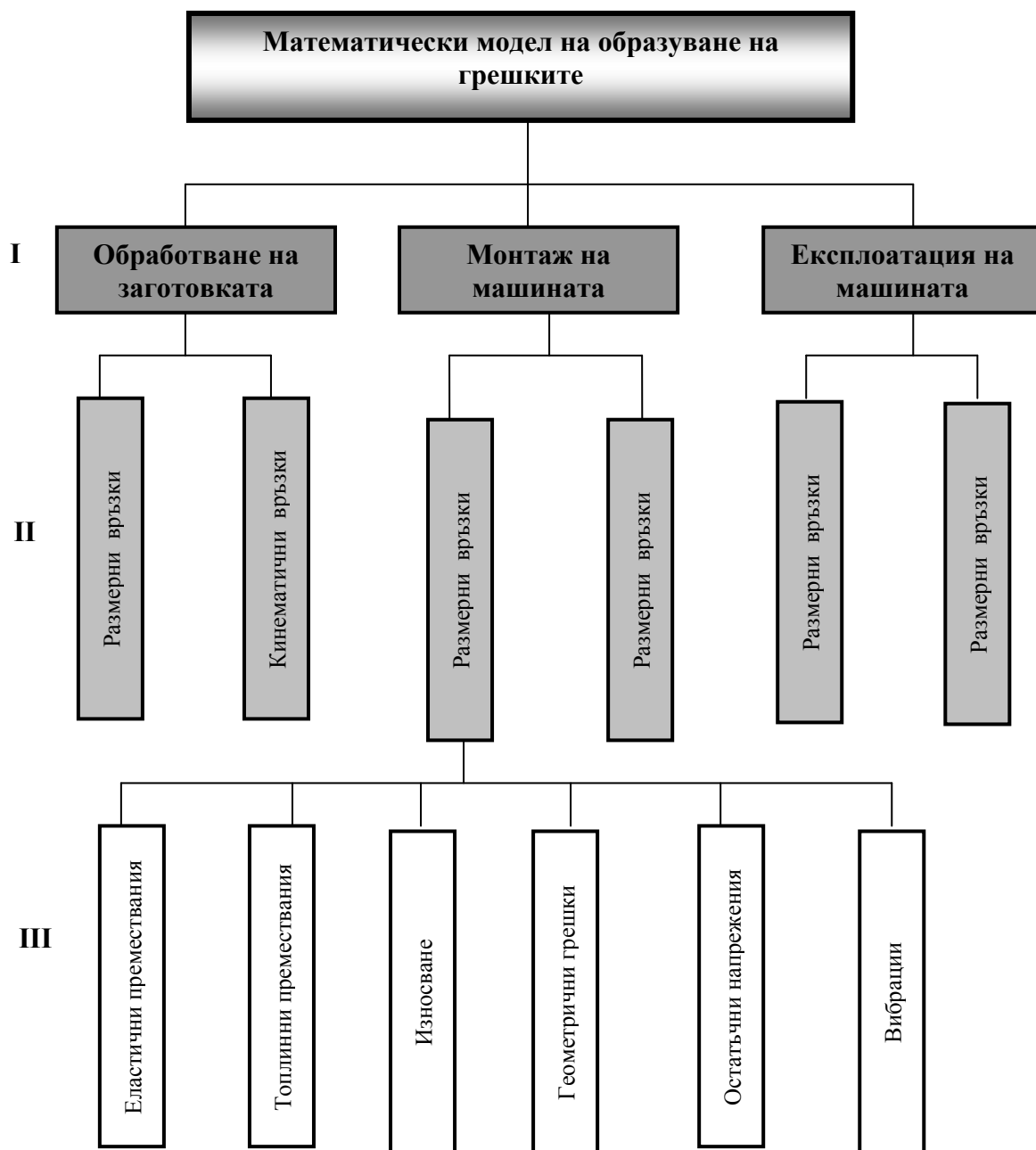
Методът е универсален и може да се използва при решаване на следващите задачи:

- определяне на геометричната грешка в зависимост от съвместното влияние на отклонението на размерните и кинематични връзки на машината;
- определяне на сумарното влияние на много фактори на грешката;
- определяне на влиянието на всеки фактор върху грешката;
- определяне на влиянието на конструктивните параметри, качествените характеристики на машината и режима на рязане върху грешката.

При използване на метода на координатните системи с деформиращи се връзки за построяване на модел на формиране на грешките могат да се открият три нива (фиг. 1.27):

- на първо ниво моделите се различават по типа на процеса;
- на второ ниво се описват грешките от размерни и кинематични връзки;

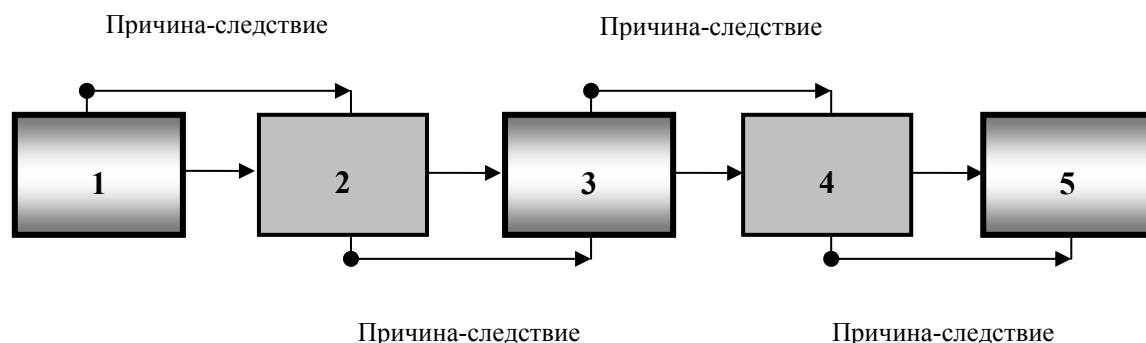
- на трето ниво се отчитат характеристиките на машините препятстващи въздействието на вредните фактори.



Фиг.1.27. Класификация на математическите модели

Независимо какъв модел ще се разработва при неговото построяване се спазват следните етапи: постановка на задачата; построяване на еквивалентна схема; извеждане на уравнения за относителното движение на работните повърхнини; съставяне на уравнения за движение с отчитане на факторите, нарушаващи задания ход на технологичния процес; проверка на модела за адекватност.

В основата на построяване на модела по метода на координатните системи са заложили причинно-следствените връзки за образуване на грешките (фиг. 1.28).



Фиг.1.28. Схема на причинно-следствените връзки на образуване на грешките
 (1- действащи фактори; 2- преместване на опорните точки; 3- преместване и завъртане на координатните системи; 4 – отклонение на относителното движение на работните повърхнини; 5 – грешки при изработването)

При постановката на задачата се определя по какъв начин ще се отчита влиянието на различните фактори върху точността на обработвания детайл. При разработване на еквивалентната схема на машината се заменят основните детайли (възли) влизащи в размерната верига на машината с правоъгълни координатни системи. Построяването на тези системи става като се взема предвид схемата на базиране на детайлите и се поставят опорни точки, отнемачи определен брой степени на свобода. За определяне на грешките при обработване трябва да се намери уравнение, описващо относителното движение на режещия ръб на инструмента спрямо технологичните бази. За отчитане на влиянието на действащите фактори на грешките при обработване първоначално е необходимо да се въведат премествания на опорните точки в полученото уравнение за движение. В резултат на определени причини се получават грешки, които могат да се изразят чрез преместване на опорните точки в координатните системи. Това поражда и преместване или завъртане на тези координатни системи. Определянето на връзката между уравнението на движение и новите премествания на координатните системи дава възможност за намиране на грешката при обработване. При проверката на модела за адекватност е необходимо да се съпоставят, получените изходни параметри с изходните параметри на реалния обект при еднакви входни въздействия.

1.5. Изводи към първа глава

1. Въз основа на направения литературен обзор и направената систематизация по определени признаци на видовете зъбни колела и зъбни предавки може да се направи извода, че точността при изработване на зъбни колела зависи преди всичко от точността, която се получава при обработване на зъбите.

2. По отношение на основните елементи на зъбното колело и метода на формообразуване, геометрията на нарязваното зъбно колело се определя от точността на ИПК на инструмента и неговото разположение по отношение на нарязваното зъбно колело.

3. При формообразуването на профила на зъбите, грешките получавани при обработването оказват най-голямо влияние върху точността на зъбните колела.

4. Същността на метода обхождане е, че се имитира зацепване на зъбна двойка (детайл-инструмент). За обработване на цилиндрични зъбни колела по метода на обхождане се използва: зъбофрезозване с червячна модулна фреза; нарязване със зъбодълбачно колело. За обработване на цилиндрични зъбни колела с червячна модулна фреза се използва специализирано оборудване. Точността е висока и затова именно тук се насочват усилията за изследване.

5. Зъбодълбането се явява един от най-универсалните зъбообработващи методи и при него се нарязват зъбни колела, които е невъзможно да се обработват чрез зъбофрезозване, а именно: малки венци на блокови колела и фланцови колела, когато разстоянието между зъбните венци е недостатъчно за изхода на червячната фреза (3 до 5 mm); зъбни колела за вътрешно зацепване; зъбни сектори; зъбни гребени;

6. Характерно за метода на копиране е това, че инструментът има профила на обработваното зъбно колело или на обработваното междузъбие от дадено зъбно колело и се реализира чрез: зъбофрезозване с дискови (палцови) модулни фрези; нарязване с многоножова глава; протегляне на зъбите;

7. Зъбофрезозването с дискова модулна фреза намира приложение в единично или дребносериинно производство поради малката точност и ниската производителност. Основно предимство на метода е, че липсва подрязване на зъбите при обработване на зъбни колела с брой зъби по малък от граничния. Методът на копиране не е обект на работата;

8. Обработването чрез протегляне и с многоножова глава намира приложение в едросериинно и масово производство поради голямата цена на инструмента, който е за обработване на конкретно зъбно колело. Основно предимство на методите е тяхната висока производителност.

9. Зъбните колела са детайли със сложни профилни повърхнини. При обработване на детайлите като цяло и на зъбните профили в частност възникват значителни технологични трудности – сложни инструменти, сложни спомагателни и формообразуващи движения, смяна на базите. В резултат на това възникват множество грешки. Отчитането им при проектирането на технологични процеси изисква задълбочен анализ от инженерите-технолози.

10. За реализация на съвременните принципи на технологично проектиране се поражда необходимост от създаване на математичен модел на технологичния процес. Моделирането е един от най-разпространените начини на изучаване на различни процеси и явления, разглеждани като сложни системи. В края на главата са разгледани основните видове модели използвани при проектиране на ТП.

1.6. Цел и задачи на дисертационния труд

Въз основа на направения обзор и анализ на съществуващите методи за обработване на зъбни колела целта на настоящия дисертационен труд е:

Да се извърши анализ на влиянието на видовете грешки при обработване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби по метода на обхождане и степента на тяхното влияние върху точността на обработваното зъбно колело.

За постигане целта на настоящето изследване е необходимо да се решат следните задачи:

1. Да се извърши системен анализ и класификация на технологичните грешки, влияещи се от различни фактори.
2. Да се разработи и предложи методика и математичен модел за аналитично и числено моделиране на процеса за обработване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби.
3. Да се разработи обобщен математичен модел на получаване на грешките при обработване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби.
4. Да се разработи алгоритъм и система за програмно осигуряване за проектиране и визуализиране на процеса на зъбофрезозване и формиране на грешките в профила на зъбите при обработване на зъбни колела.