

ГЛАВА ВТОРА

АНАЛИЗ И КЛАСИФИКАЦИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ГРЕШКИ, ВЛИЯЕЩИ СЕ ОТ РАЗЛИЧНИ ФАКТОРИ

2.1. Анализ на технологичните грешки, възникващи при обработване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби по метода на обхождане

Предаването на непрекъснато въртене от един вал към друг със зададено предавателно отношение най-често се осъществява с помощта на зъбни механизми. Те са намерили много голямо приложение както в машиностроенето така и в уредостроенето. В общото машиностроене предавателните механизми със зъбни колела по-често са предназначени за предаване на определени сили и моменти, по-рядко – за получаване на необходимата точност на предавателното отношение. В уредостроенето основното предназначение на зъбните механизми е получаване на необходимата точност на предавателното отношение. Поради това машиностроенето въпросът за качеството на зъбните колела се свежда основно до разглеждане на точността на разположение на едноименните профили. В уредостроенето и кинематичната точност и качеството на допиране на работните профили на зъбите се разглежда по двата профила на зъба.

Ефективното изучаване на неточността на зъбни колела, причините за появяване на грешки в процеса на обработване, влиянието на тези грешки върху експлоатационните показатели за работоспособност на предавката (шум, КПД, кинематична точност, вибрации, динамично натоварване, странична хлабина и др.) може да доведе до тяхното намаляне, увеличаване на получаваната точност и изпълнение на изискванията зададени от конструктора.

Технологичният процес за нарязване на цилиндрични зъбни колела с прави зъби по метода на обхождане се осъществява върху технологична система, включваща следните подсистеми:

1. Металорежеща машина.
2. Приспособление за установяване на режещия инструмент.
3. Режещ инструмент.

4. Приспособление за установяване на обработвания детайл.
5. Обработван детайл.

Всяка от подсистемите може да бъде източник на грешки (сигнали $\vec{S}_1 \dots \vec{S}_5$), оказващи влияние върху точността на нарязаното зъбни колело. Освен това при свързването на подсистемите една с друга възникват сигналите ($\vec{S}_6 \dots \vec{S}_9$), които също са източници на подобни грешки.

На фиг.2.1 са показани връзките в системата МПИД, влияещи върху точността на крайния детайл (зъбно колело).



Фиг. 2.1. Връзки в технологичната система

Съвкупността от тези грешки води до неточност във формата и размерите на обработваното зъбно колело. При работата на даденото зъбно колело тази неточност води до неравномерност в движението, възникват динамични натоварвания, шум при работа и др.

В технологичната литература грешките се класифицират по различни признаци. В [55, 86, 109, 122], например се приема, че грешките от технологичен характер възникват от: геометрична и кинематична неточност на машината; неточност на изработване на

заготовките; заточване и установяване на зъбонарезния инструмент на машината; грешки от установяване на заготовката; неточност в настройване на технологичната система.

Грешките при зъбофрезозване на цилиндрични зъбни колела по метода на обхождане ще бъдат разгледани по-подробно. В техническата литература те са класифицирани по причините за тяхното възникване:

2.1.1 В зависимост от влиянието на използваните металорежещи инструменти и технологично оборудване:

2.1.1.1. Грешки от червячната фреза БДС 14637-85

Грешки присъщи на метода на обработване

1) грешки в профила на зъбното колело вследствие приблизителния метод на профилиране на червячната фреза - чрез използване на радиално странично затиловане:

За получаване на зъбни колела с еволвентен профил е необходимо профила на фрезата да е построен на базата на еволвентен червяк, тъй като при нарязване оста на червячната фреза се пресича с оста на колелото. Зъбната предавка между колелото и фрезата се явява винтова предавка.

Профилът на режещия ръб на фрезата, проектиран на базата на еволвентен червяк, има криволинейна форма. Използването на радиално затиловане при изработване на червячните фрези не осигурява при презаточване съхранение на профила на зъба. За съхранение на режещите ръбове при презаточване е необходимо да се извърши затиловане по оста на фрезата (осово затиловане). Тъй като осовото затиловане е трудно изпълнимо, при изработване на фрезата се използва приблизително профилно шлифоване с радиално затиловане.

Най-добро приближение дава профилирането с праволинейни осови профили. Този метод се явява независим от средствата за измерване. При това криволинейният профил в осово сечение на еволвентния червяк се заменя с праволинейен. Ъгълът на профила на задната повърхнина на зъба е различен от профила на зъба на изходния гребен. Той е увеличен с няколко минути - от 4' до 15' при модул от 1 до 14 mm за дясната страна и намален с 3' до 4' за левия профил. Профилирането с други приближени методи, когато праволинейният профил е в нормално сечение, създава големи грешки в нарязаното зъбно колело. Освен това големината на грешката от профилирането на фрезата зависи от средствата за измерване на профила.

Грешките в профила на колелото, определени във вид на отклонения от праволинейност на условната рейка на червячната фреза с праволинейен осов профил, се увеличават с увеличаване на модула и ъгъла на подема на винтовата линия

2) отклонение от кръгла форма на профила на зъбното колело от крайния брой зъби (режещи ръбове) на фрезата;

3) грапавост по дължина на контактната линия, зависеща от големината на осовото подаване.

Грешки (неточност) от изработването, заточването и износването на фрезата

1) **неточност на профила на фрезата** - ъгъл на профила; изкривяване на режещите ръбове от нерадиалност на предната повърхнина на стружковите канали:

Преди това бяха разгледани грешките в профила на фрезата, породени от радиалното затиловане, в резултат на което режещите ръбове не лежат на повърхнината на основния еволвентен червяк. Породените от това отклонения във формата на профила на зъбните колела бяха отнесени към грешки присъщи на метода на обхождане. Поради това тук ще бъдат разгледани грешките в профила на фрезата, получени при нейното изработване и заточване. Тези грешки са: грешки в ъглите на профила и изкривяване на режещите ръбове; грешки, породени от нерадиалност на режещите ръбове [50].

Грешките в профила на фрезата могат да имат местен характер, а могат да се разпространяват и по целия профил и да се повтарят на всички зъби на фрезата. Грешките от местен характер f_U се получават в резултат от вибрации на машината при затиловане на фрезата, откъртване на шлифовалният диск или от единични грешки в машината. Те влияят върху точността на изделието само тогава, когато зоната на грешката съвпада с участък от режещия ръб, извършващ чисто рязане при обработване на еволвентния профил.

Когато грешката попадне върху профила, извършващ чисто рязане, тя се пренася върху профила на зъба. Ясно е, че знаците на отклонение на фрезата и зъба ще бъдат различни, тъй като грешка в режещия ръб, разположена към "материала" на зъба на фрезата (знак "-"), създава върху профила на зъба изпъкналост (знак "+").

$$\Delta f_K = -\Delta f_U \quad (2.1)$$

където: Δf_K е изпъкналост на колелото ; Δf_U - изпъкналост на инструмента.

Ако режещият ръб на инструмента има грешка в ъгъла на профила, повтаряща се на всички едноименни (леви или десни) страни на зъбите на фрезата, което може да се получи в резултат на неправилно установяване или на отклонение в профила на стругарския нож, или шлифовалния диск, използвани при обработване на инструмента, се получава отклонение в осовата стъпка на фрезата, а следователно и в детайла. Отклонението в осовата стъпка може да се определи от фиг.2.2. по формулата:

$$\Delta t_o = \pi \cdot m [\cos(\alpha_d + \Delta\alpha_d) - \cos \alpha_d] \quad (2.2)$$

където: $\Delta\alpha_d$ е ъглова грешка в профила.

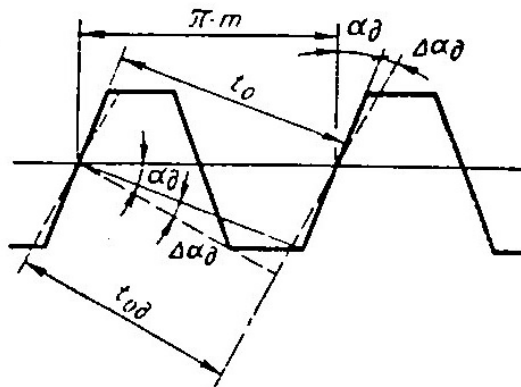
Отклонението в профила на нарязваното зъбно колело, получено от грешки в ъгъла на фрезата се определя от уравнението:

$$\Delta f = \pi \cdot m [\cos(\alpha_d + \Delta\alpha_d) - \cos \alpha_d] \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

където ε е коефициент на припокриване.

Обикновено каналите на фрезата, преминават през делителния цилиндър, нормално на винтовата линия и образуват режещи ръбове. В този случай има място следващото съотношение между ъгъла на подема λ_d на винтовата линия на зъба на основния червяк на цилиндъра R_d и ъгъла на наклона ω_d на повърхността на винтовите канали:

$$\lambda_d = \omega_d \quad (2.4)$$



Фиг. 2.2. Грешка в стъпката на зацепване породена от отклонение на ъгъла в профила на инструмента

Предният режещ ръб на червячната фреза е необходимо да се изпълнява радиално с преден ъгъл $\gamma = 0$. При неизпълнение на това изискване се получават следните отрицателни явления (моменти), при използване на фрезата:

- 1) отслабване на режещите ръбове във върха на зъба;
- 2) изкривяване на режещите ръбове на фрезата;
- 3) трудно презаточване, ако е необходимо да се съхрани тази нерадиалност;
- 4) от друга страна заточването на предната повърхнина с нерадиалност подобрява условията на рязане, тъй като се получава преден ъгъл γ .

Ако се приеме, че в резултат на грешки от изработването и заточването има нерадиалност r на височината на зъба (по дължина $2,5 \cdot m$), ще се получи грешка в ъгъла на профила. Тази грешка може приблизително да се определи, ако се приеме, че зъбът на фрезата представлява пирамида, имаща контура на изходния гребен (фиг.2.3.).

В този случай в резултат на нерадиалност на режещия ръб се получава контур на изходния гребен с ъгъл α_d по-малък от зададения.

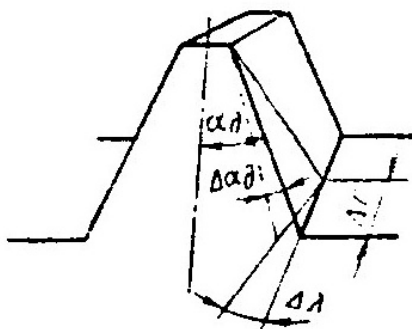
Разликата $\Delta\alpha_d$ между теоретичния и действителния ъгъл на изходния контур се определя от израза:

$$\Delta\alpha_d = \frac{\Delta r \cdot \Delta\lambda \cdot \cos \alpha_d}{2(f_o' + c) \cdot m} = \frac{\Delta r \cdot \Delta\lambda \cdot 0,94}{2,5 \cdot m}, [\text{rad}] \quad (2.5)$$

или:
$$\Delta\alpha_d = \frac{\Delta r \cdot \Delta\lambda \cdot \cos \alpha_d}{2(f_o' + c) \cdot m} \cdot 206000, \quad [s] \quad (2.6)$$

където: Δr и m са в [mm] ; $\Delta\lambda$ - ъгъл на затиловане е в [rad].

Изменението в профила на ъгъла на фрезата води до изменение в основната стъпка на зъбното колело[41]. Като се използва формула (2.3) може да се определи отклонението на основната стъпка в зависимост от големината на нерадиалност на режещия ръб. За фрези от всякакъв модул и степен на точност практически може да се приеме, че отклонението на стъпката Δt_o е равно на от (0,026 до 0,031)· Δr при зададен ъгъл α_d равен на 10° до 12°.



Фиг. 2.3. Грешка в ъгъла на профила от нерадиалност на режещите ръбове

По този начин най-голямо влияние на нерадиалността на режещите ръбове от предната повърхнина има при нарязване на зъбно колело с малък модул, където ъгловата стойност на нерадиалност е по-голяма.

2) изместване на режещите ръбове на фрезата от общата работна повърхнина - грешки в зацепването; грешки във винтовата линия на фрезата; грешки в стъпката или натрупана грешка в стъпката; натрупана грешка в стъпката на стружковите канали (радиална):

Грешката във винтовата линия, получена при изработване на червячната фреза, поражда грешки (неточности) в разположението на режещите ръбове на профилиращата повърхнина. Тази грешка може да бъде определена непосредствено и се получава от отклонението на винтовата линия за един оборот, за три оборота и от зъб към зъб. По

елементарна се явява проверката на грешката в осовата стъпка по направление на всяка рейка от фрезата и натрупаната грешка в стъпката.

Всички тези грешки могат да се разделят на два вида: грешки в средната стъпка и единични грешки в стъпката. Тези две грешки ще бъдат разгледани по отделно, тъй като всяка грешка в инструмента води до неточност в зъбното колело.

***Грешки на средната стъпка** - средноаритметичното значение на стъпката на винтовата линия се отличава от номиналната стойност на стъпката на инструмента.

Този вид грешки се получава в резултат на разтегляне или свиване на стъпката при изработване на фрезата и води до отклонения в ъгъла на подема на винтовата линия на фрезата от номиналния. Връзката между осовата стъпка и ъгъла на подема на винтовата линия се дава от уравнението:

$$\operatorname{tg} \lambda_d = (t_{oc} / \pi \cdot d_d) \quad (2.7)$$

или чрез нормалната стъпка на фрезата:

$$\sin \lambda_d = (t_n / \pi \cdot d_d) \quad (2.8)$$

където d_d е диаметър на фрезата, mm.

От уравнение (2.8) се вижда, че систематичната грешка на зададен диаметър на фрезата може да има само при грешка в ъгъла на подема на винтовата линия на инструмента.

Отклонението в осовата или нормална стъпка, при запазване на ъгъла на профила, води до изменение на основната стъпка на фрезата и нарязваното зъбно колело. От там се получава и грешката в основната стъпка:

$$\Delta t_o = \Delta t_{oc} \cdot \cos \lambda_d \cdot \cos \lambda_d = \Delta t_n \cdot \cos \lambda_d \quad (2.9)$$

Грешката в профила на основното колело се определя от израза:

$$\Delta f = \Delta t_o \cdot \varepsilon \quad (2.10)$$

***Единична грешка в стъпката** - изкъртване на режещите ръбове от профилиращата повърхнина или отклонение на разстоянието между два едноименни режещи ръба от един гребен на фрезата от номиналното.

Тази грешка се получава от местно изместване на режещия ръб на фрезата в нормално направление. Това може да се получи поради следните причини:

- неравномерност на окръжната стъпка на стружковите канали;
- местна грешка в положението на режещия ръб от единична грешка в изработване на фрезата .

Ако големината на отклонение на окръжната стъпка на каналите по делителния цилиндър на фрезата от номиналната стойност ($t_{окр} = 2\pi \cdot r_d / k$) се приема равна на $\Delta t_{окр}$ предизвиканото изместване на режещия ръб на фрезата ще бъде по-малко от грешката на основната стъпка.

Връзката между тях се дава от израза (фиг. 2.4.):

$$\Delta t_{II} = t_{окр} \cdot \cos \lambda \cdot \text{tg} \Delta \lambda \quad (2.11)$$

Дадената по-горе грешка се измерва в направление на линията на обхождане.

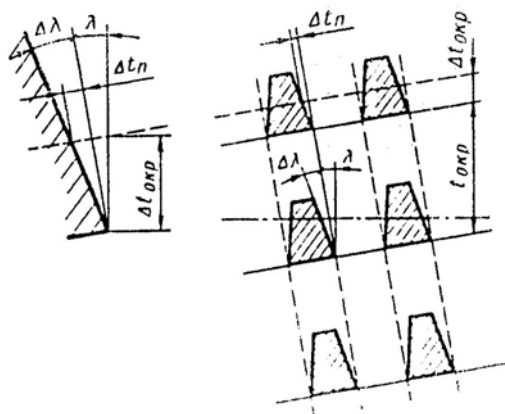
Големината на изместване на режещия ръб по нормала към профила се определя от израза:

$$\Delta t_U = t_{II} \cdot \cos \alpha_D \quad (2.12)$$

$$\Delta t_U = t_{окр} \cdot \cos \lambda \cdot \text{tg} \Delta \lambda \cdot \cos \alpha_D \quad (2.13)$$

Предизвиканата от това грешка в профила на наричаното зъбно колело може да се определи от уравнението

$$\Delta f = t_{окр} \cdot \cos \lambda \cdot \text{tg} \Delta \lambda \cdot \cos \alpha_D \cdot \varepsilon \quad (2.14)$$



Фиг. 2.4. Изместване на режещите ръбове на фрезата породено от отклонение в основната стъпка на стружковите канали

Местното изместване на режещия ръб на фрезата t_{ou} се отразява върху грешката на основната стъпка. Това може да се определи чрез измерването и с уред, чийто накрайници се допират до два едноименни профила в точки лежащи в различни пръстеновидни зони.

Изместването на режещия ръб може да се получи в следните направления:

- в "материала" на зъба на инструмента;
- извън "материала" на зъба на инструмента.

Различното направление на отклонение на режещия ръб предизвиква значително различаващи се грешки в основната стъпка.

По-големи измествания се получават при наличие на откъртвания на режещите ръбове на фрезата или местно изместване към материала на зъба. Подобно изместване на режещите ръбове внася изкривяване в зоната на чисто рязане и се срязва част от профила, образуван от припокриване на режещите ръбове на инструмента. Това води до получаване на праволинеен участък на голяма част от профила. Границите на разпространение на праволинейните участъци, получаващи се от местна грешка в положението на режещия ръб към материала на зъба са показани на фиг.2.5.

Приема се, че на местната грешка на положението на режещия ръб съответства на нарязвания участък от профила с ъгъл α . Дължината на радиуса на кривина на еволвентата в тази точка се определя по формулата:

$$\rho = r_o \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2.15)$$

За сметка на грешката в положението на режещия ръб дължината на радиус-вектора ρ ще се намали и ще бъде равна на:

$$\rho' = \rho - \Delta t_{ou} \quad (2.16)$$

където ρ е дължината на радиуса на кривина, mm; Δt_{ou} - грешка в профила, mm.

Режещия ръб се пресича с теоретична еволвента на зъба в две точки **a** и **b**, лежащи на дъги с радиуси R_a и R_b :

$$R_a = \frac{r_o}{\cos \alpha_a} \quad \text{и} \quad R_b = \frac{r_o}{\cos \alpha_b} \quad (2.17)$$

където: α_a и α_b , са ъгли на зацепване в съответните точки от еволвентата.

От друга страна разстоянието до тези точки е равно на:

$$R_a = \frac{\rho'}{\cos \varphi_a} \quad \text{и} \quad R_b = \frac{\rho'}{\cos \varphi_b} \quad (2.18)$$

където ъглите φ_a и φ_b имат следните стойности:

$$\angle \varphi_a = \pi / 2 - \alpha - \theta + \theta_a \quad ; \quad \angle \varphi_b = \pi / 2 - \alpha - \theta + \theta_b$$

Замествайки ъгъл φ в уравнение (2.18), съответно в точки **a** и **b** се получава:

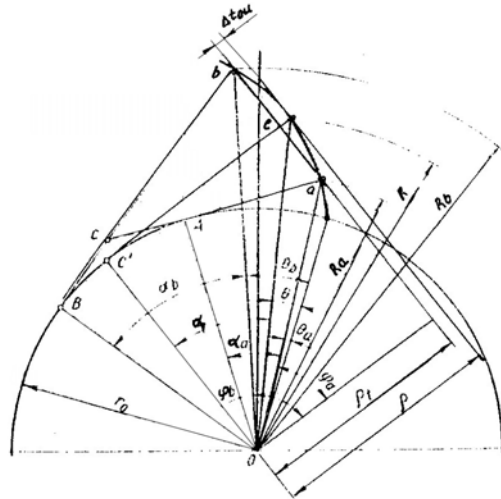
$$R_a = \frac{\rho'}{\cos(\pi / 2 - \alpha - \theta + \theta_a)} = \frac{\rho'}{\sin(\alpha + \theta - \theta_a)} \quad (2.19)$$

$$R_b = \frac{\rho'}{\cos(\pi / 2 - \alpha - \theta + \theta_b)} = \frac{\rho'}{\sin(\alpha + \theta - \theta_b)} \quad (2.20)$$

След като се заместят в уравнения (2.19) и (2.20), изразите за ρ' и след определени преобразувания се получават следните уравнения:

$$\cos \alpha_a = \frac{\sin(\alpha + \theta - \theta_a)}{\operatorname{tg} \alpha - (\Delta t_{ou} / r_o)} \quad (2.21)$$

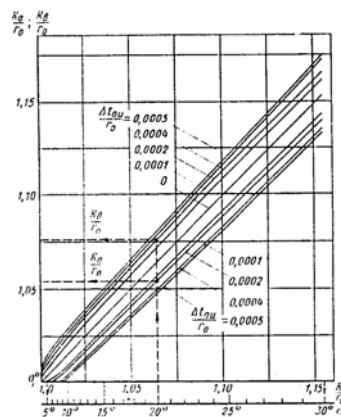
$$\cos \alpha_b = \frac{\sin(\alpha + \theta - \theta_b)}{\operatorname{tg} \alpha - (\Delta t_{ou} / r_o)} \quad (2.22)$$



Фиг. 2.5. Праволинеен участък в профила, получен от изкъртване на режещия ръб

Задавайки стойности на ъгъла и местни отклонения в разполагане на режещите ръбове Δt_{ou} , (Δt_u) при известен радиус на основната окръжност на наричаното зъбно колело r_o , може да се определят радиусите R_a и R_b , в границите на които са разположени праволинейните участъци, получени от един неправилно разположен режещ ръб (фиг.2.8.).

На фиг.2.6. е дадена зависимостта между стойности на радиуса R (при радиус на основната окръжност равен на единица), съответстващ на разстоянието от центъра на колелото до точка от профила, в която е необходимо да се допира режещия ръб на инструмента и радиуси R_a и R_b (при r_o равно на 1), равни на разстоянието от центъра на колелото до точката на пресичане, образуваща праволинеен профил с теоретичната еволвента.



Фиг. 2.6. Радиуси на окръжности ограничаващи праволинейните участъци от профила

Дължината на праволинейния участък на профила $I = a.b$, може да се определи от триъгълника abc при условие, че $ac = bc$ и $c'e$ е бисектриса на ъгъл acb , от тук може да се получи:

$$\Delta I = 2 \cdot \rho_i \cdot \text{tg}[(\alpha_b + \theta_b)/2 - (\alpha_a + \theta_a)/2] \quad (2.23)$$

След преобразувания се получава:

$$\Delta I = \left[\left(2 \cdot \text{tg} \alpha - \frac{\Delta t_{ou}}{r_o} \right) \cdot \text{tg} \frac{(\alpha_b + \theta_b) - (\alpha_a + \theta_a)}{2} \right] \cdot r_o \quad (2.24)$$

На практика неравномерността на окръжната стъпка на каналите на фрезата или голямо изместване на режещия ръб водят до нарязване на зъбно колело, в което страничните повърхнини на зъбите се състоят от няколко плоскости (равнини), пресичащи се помежду си по направление на контактните линии на колелото.

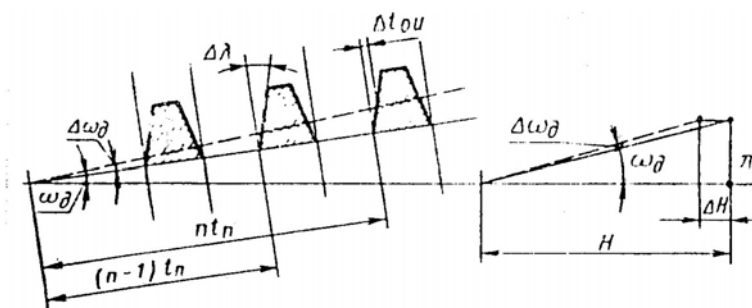
3) грешка в стъпката на винтовите стружкови канали:

Стружковите канали се изпълняват във вид на винтова повърхнина лежаща на делителния цилиндър на фрезата нормално към винтовата повърхнина на основния червяк.

От там се получава: $\varpi_{\partial} = \lambda_{\partial}$

Ако може да се предположи, че при изработване на фрезата ъгъла на наклона на винтовите канали ω_{∂} се изпълнява достатъчно точно, то при презаточване на инструмента се получават големи отклонения в този ъгъл [115, 120]. Тези отклонения могат да са значителни при презаточване на фрезата без използване на специализирани машини и приспособления.

Ако се приеме, че при заточване има отклонение на ъгъла на канала от зададения ъгъл ω_{∂} със стойност $\Delta\omega_{\partial}$, или грешка в стъпката на винтовите канали ΔH , може да се намери стойността на изменение на основната стъпка на фрезата между кои да е два режещи ръба (фиг. 2.7).



**Фиг.2.7. Грешка в осовата стъпка на фрезата от отклонение на ъгъла
или стъпката на винтовите канали**

Отклонението на ъгъла на канала свързано с грешка в стъпката на винтовите канали се изразява със зависимостта:

$$\Delta\omega_D = H / (H \cdot \sin \omega_D \cdot \cos \omega_D) \quad (2.25)$$

където H е големина на стъпката на винтовите канали, mm; ω_D - ъгъл на винтовите канали.

Изместването на режещите ръбове на n зъба от теоретичното положение, измерено по нормала към зъба се определя от израза:

$$n \cdot t_n \cdot \Delta\omega_D \cdot \operatorname{tg} \Delta\lambda \cdot \cos \alpha_D \quad (2.26)$$

Изместването на едноименни (леви или десни) режещи ръбове се получава от израза:

$$(n - 1) \cdot t_n \cdot \Delta\omega_D \cdot \operatorname{tg} \Delta\lambda \cdot \cos \alpha_D \quad (2.27)$$

По този начин отклонението на основната стъпка за всяка двойка изместени режещи ръбове, разположени по направление на един зъбен гребен се определя от израза:

$$\Delta t_{ou} = [n - (n - 1)] \cdot t_n \cdot \Delta\omega_D \cdot \operatorname{tg} \lambda_D \cdot \cos \alpha_D \quad (2.28)$$

или

$$\Delta t_{ou} = t_n \cdot \Delta\omega_D \cdot \operatorname{tg} \lambda_D \cdot \cos \alpha_D = t_o \cdot \Delta\omega_D \cdot \operatorname{tg} \lambda_D \quad (2.29)$$

Грешката в осовата стъпка при лошо заточване е значителна, което предполага да се обръща особено внимание при заточването на инструмента.

Получаващата се грешка в профила на нарязаното зъбно колело ще бъде по-голяма със стойност равна на степенята на припокриване при зацепване на фрезата с колелото.

$$\Delta f = \varepsilon \cdot t_o \cdot \Delta\omega_D \cdot \operatorname{tg} \lambda_D \quad (2.30)$$

Грешката в ъгъла винтовите канали $\Delta\omega_D$ може да се открие по конусността на цилиндъра на върховете на зъбите на фрезата.

Грешката в затиловане на фрезата има стойност $k = \Delta R_{eu}$ и се получава на един зъб, грешката в ъгъла на канала поражда конусност измервана по върховете на зъбите на фрезата за n стъпки. Тя може да се определи с израза:

$$\delta \Delta R_{eu} = n \cdot t_n \cdot \omega_D \cdot k / 2\pi R_e \quad (2.31)$$

4) грешка от износване на червячната фреза:

В процеса на рязане на точността на обработване влияе изменението на формата на режещите ръбове в резултат на износването на инструмента и образуване на наслойка. Това влияние в значителна степен е свързано с режима на рязане, механичните характеристики на обработвания материал и тяхното изменение в процеса на обработване на заготовката.

2.1.1.2. Грешки при зъбообработващата машина [86, 109]

Геометрични грешки

- 1) неуспоредност на преместване на супорта на фрезата спрямо оста на въртене на масата в надлъжно и напречно направление;
- 2) радиално биене на дорника, установен между центрите на машината;
- 3) осово биене на масата;
- 4) биене на дорника за фрезата;
- 5) осово биене на вретеното на фрезата.

Кинематична грешка (неточност)

- 1) верига на фрезването (обхождането);
- 2) зъбна предавка на диференциала;
- 3) зъбна предавка (верига) на подаването.

Грешки от нестабилност на елементите на машината

- 1) грешки от деформацията на предно и задно седло;
- 2) грешки от деформация на вретеното.

В реални условия особено при недостатъчна стабилност на технологичната система МПВД (машина, приспособление, инструмент, детайл) се появява динамично влияние в резултат на периодично натоварване на системата с променлива по стойност сила на рязане в зависимост от ъгъла на завъртане.

Най-голямо влияние върху точността оказва кинематичната верига за предаване на въртящо движение на инструмента. Отчитането на влиянието на силите на рязане върху точността зависи от стойността на еластичните деформации в на режешите ръбове на профилиращия зъб. Това води до изменение на положението на обработвания зъб на величина Δ , определяща се от израза [103]:

$$\Delta = P/J \quad (2.32)$$

където P е действащата сила, N ; J – стабилност на технологичната система (ТС) в направление на действие на силата, N/m .

Отклонението за времето на един оборот на инструмента води го грешка в профила, която се определя с формулата:

$$f_{f_r} = \Delta y \sin \alpha \quad (2.33)$$

В резултат на неравномерност на прибавката и радиалното биене на фрезата се получава неравномерност в натоварването на ТС. Това води до изменение на силата рязане 1,5 – 2 пъти, а от там и положението на инструмента относно колелото в различни етапи на

профилиране на един зъб. Това влияние се увеличава с увеличаване на дълбочината на рязане и подаването.

При грубото фрезозане на зъбите има голяма разлика в силите на рязане, а от там се променя и стойността на въртящия момент за един оборот на фрезата при обработване на различните зъби.

Неравномерността на натоварване на ТС при чисто фрезозане води до допълнително завъртане на фрезата около своята ос, което е източник на циклични грешки. Наблюдават се колебания в кинематичната верига за въртеливо движение на инструмента, които се увеличават с увеличаване на дълбочината на рязане и подаването и намаляне на оборотите на инструмента.

2.1.1.3. По установяването на заготовката и инструмента

1) Челно и радиално биене на заготовката (от грешката от установяване), относно монтажната база за сглобяване на зъбното колело:

В зависимост от вида на зъбното колело се използват различни схеми на базиране при обработване на неговите зъби(раздел 1.1., глава 1).

В зависимост от избрания технологичен процес за обработване на зъбното колело се поставят определени изисквания към външния диаметър на заготовката. Тези случаи са следните:

а) външният диаметър на заготовката се използва за центроване при установяване на заготовката на машината. При този случай се ограничава радиалното биене на външната ротационна повърхнина относно работната ос на колелото;

б) външният диаметър на заготовката не се използва като базова повърхнина за установяване на зъбното колело при обработване.

Неперпендикулярността на базовото чело на заготовката спрямо работната ос на колелото води до неточност при обработването, която най-много се отразява на отклонението на направлението на зъба или на отклонение на осовата стъпка при широки зъбни колела.

Челното биене поражда противоположно по направление отклонение на направлението на зъба в различни участъци на зъбния венец.

Радиалната грешка от базиране на заготовката създава в зъбното колело геометричен ексцентрицитет, който води до допълнително изместване по лявата и дясна линия на зацепване. Това може да се определи по формулата:

$$\Delta_{r_F} = \pm \frac{e_r}{2} \sin(\varphi \pm \alpha) \quad (2.34)$$

където φ е текущият ъгъл на завъртане на колелото; знак + за лявата линия на зацепване; знак – за дясната линия на зацепване.

Разликата в значението на тази функция при ъгли $\left(\varphi \pm \frac{\gamma}{2}\right)$ ще даде отклонението от окръжната стъпка от номиналното значение :

$$\Delta t_i = \frac{e_r}{2} \left[\sin\left(\varphi + \frac{\gamma}{2} + \alpha_o\right) - \sin\left(\varphi - \frac{\gamma}{2} + \alpha_o\right) \right] \frac{r_{изм}}{r_o} \quad (2.35)$$

където $\frac{\gamma}{2}$ е половината ъглова стъпка.

Множителят във формула 2.35 $\frac{r_{изм}}{r_o}$ привежда отклонението на основната стъпка по основната окръжност към окръжността, за която се правят измервания. Най-голямо отклонение на окръжната стъпка, получено от геометричен ексцентрицитет ще бъде при ъгъл $\varphi + \alpha = \pi$ и ще е равно на :

$$\Delta t_{\max} = \frac{e_r}{2} \left[\sin\left(\pi + \frac{\gamma}{2}\right) - \sin\left(\pi - \frac{\gamma}{2}\right) \right] \frac{r_{изм}}{r_o} \quad (2.36)$$

$$\text{Или } \Delta t_{\max} = e_r \sin \frac{\gamma}{2} \frac{r_{изм}}{r_o} \quad (2.37)$$

Разликата в съседните окръжни стъпки породени от сумарния ексцентрицитет e_r , се изразява чрез разликата от отклонението на окръжната стъпка от номиналната стойност, за две последователно разположени стъпки. Тя може да се определи по формулата:

$$\Delta t_c = \frac{e_r}{2} \left[2 \sin(\varphi + \alpha) - \sin(\varphi + \alpha + \gamma) - \sin(\varphi + \alpha - \gamma) \right] \frac{r_{изм}}{r_o} \quad (2.38)$$

$$\text{Или } \Delta t_c = e_r \sin(\varphi + \alpha) (1 - \cos \gamma) \frac{r_{изм}}{r_o} \quad (2.39)$$

2) Радиално биене и наклон на фрезата върху дорника на машината:

Биенето на основния цилиндър на фрезата при нейното въртене с дорника на зъбофрезната машина се получава в резултат на три причини:

- 1) биене на основния цилиндър при изработване на фрезата относно контролните страни;
- 2) биене на дорника на машината относно оста на въртене;
- 3) несъосност между отвора на фрезата и дорника от наличието на хлабина между тях.

Всички тези причини съставят общото биене и фрезата се върти не около оста на основния цилиндър, която трябва да съвпада с оста на отвора, а около друга произволна ос.

Това изместване се променя по стойност и направление по синусоидален закон в зависимост от ъгъла φ_u на завъртане на фрезата. Големината на изместването се определя по формулата:

$$\Delta f = \Delta_{ab} / (2 \cdot \sin \alpha_D \cdot \sin \varphi_u) \quad (2.40)$$

където: Δ_{ab} е радиалното биене на опорното стъпало.

Периодичното изместване на режещите ръбове от теоретичното им положение води до изкривяване на зъба на нарязваното зъбно колело. При това грешката в профила при разгъване се изменя също по синусоида. Тъй като по време на чистото рязане на един профил на зъбното колело се получава завъртане на фрезата на ъгъл φ_u , равен на $2\pi\varepsilon$, то и получените отклонения в профила ще се изразяват със синусоидален закон с указания ъгъл. Синусоидата ще се измества с различна фаза, в зависимост от това кой режещ ръб ще започне чисто рязане на профила на зъба на зъбното колело. Характера на изменение на профила на зъба в увеличен вид, породен от биенето на фрезата, е показан на фиг.2.8.

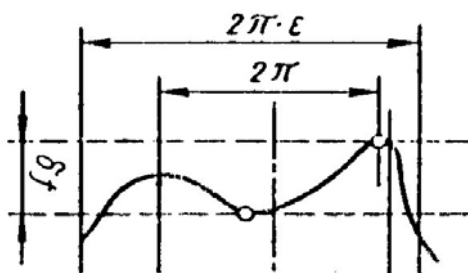
Подобни диаграми на грешки в профила се получават при проверка на колелото на еволвентомер, ако при нарязване на зъбното колело има биене на основния цилиндър на фрезата.

Величината на изместване на режещите ръбове се колебае в границите:

$$\Delta f_{\min} = -\Delta a_\sigma / 2 \sin \alpha_D \text{ до } \Delta f_{\max} = \Delta a_\sigma / 2 \sin \alpha_D \quad (2.41)$$

Грешката в профила ще бъде равна на алгебричната разлика в максималните измествания:

$$\delta f = \Delta a_\sigma \cdot \sin \alpha_D \quad (2.42)$$



Фиг. 2.8. Грешка в профила получена от биене на фрезата

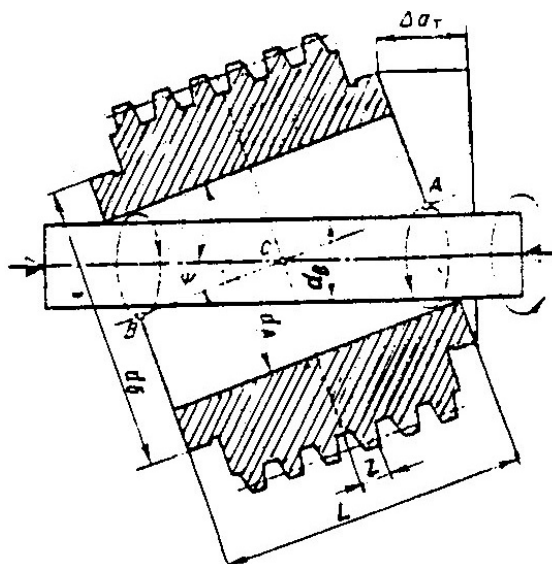
По-големи изкривявания в профила се получават, ако оста на фрезата и дорника се пресичат. Получава се конусно биене относно оста на въртене вместо разгледаното цилиндрично биене.

Наклона на оста на фрезата лесно може да се открие по челното биене на страничните бортове a_r или по разликата в биенето на борта на една образуваща на фрезата.

$$\Delta a_{\sigma r} = \Delta a_r \cdot \frac{1}{d_\sigma} \quad (2.43)$$

където: d_6 е диаметърът на борта на фрезата, mm.

Пресичането (наклона) на оста на фрезата и дорника може да се получи от неуспоредност на двете чела на инструмента, а също така и от притискащата шайба, пораждаща деформация на дорника или завъртане на инструмента върху дорника в границите на хлабината между дорника и отвора.



Фиг. 2.9. Ъгъл на наклона на фрезата

При това оста на въртене на фрезата е завъртяна на определен ъгъл спрямо геометричната ос на основния червяк.

Ъгълът между оста на въртене и геометричната ос на фрезата, съответстващ на ъгъла на пресичане, се намира от съотношението (фиг.2.9.):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{d_A - d_B}{2} \cdot \frac{2}{L} = \frac{c}{L} \quad (2.44)$$

където c е големина на хлабината между дорника и инструмента, mm.

Точка А лежаша на геометричната ос на фрезата извършва въртеливо движение по окръжност, лежаша в равнина перпендикулярна на оста на въртене.

За откриване на неточностите на наричаното зъбно колело, получаващи се от такова въртене на оста на фрезата, движението се разлага на три съставящи (фиг.2.10.):

- 1) завъртане на фрезата около оста на въртене на дорника на ъгъл φ ;
- 2) завъртане на фрезата в осова равнина I на ъгъл $\varphi_{\text{ср}}$;
- 3) завъртане на фрезата в равнина II, перпендикулярна на равнина I на ъгъл ψ_2 .

Сумата от тези три движения дава сложното движение на инструмента при изкривяване на фрезата върху дорника. Само последните две движения създават грешка в детайла, тъй като те се отличават от правилното въртене на фрезата получено от пресичане на осите.

Завъртането на фрезата в осова равнина **I** се извършва на ъгъл φ_1 и се определя от съотношението:

$$\operatorname{tg} \psi_1 = -\overline{OA} \cdot \cos \varphi / \overline{OC} \quad (2.45)$$

където: $\overline{OA} = L/2 \sin \psi$; $\overline{OC} = L/2 \cos \psi$; $\overline{AC} = L/2$

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \operatorname{tg} \psi \cdot \cos \varphi \quad (2.46)$$

Завъртането на фрезата в равнина **II** става на ъгъл ψ_2 и се определя от израза:

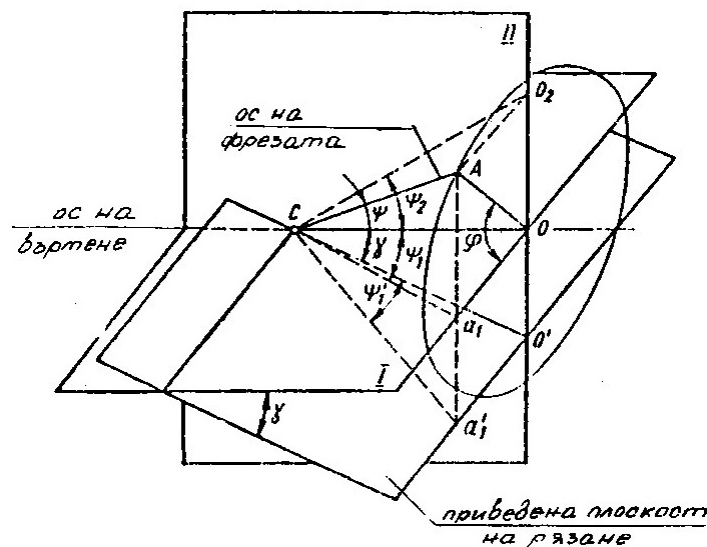
$$\operatorname{tg} \psi_2 = \operatorname{tg} \psi \cdot \sin \varphi \quad (2.47)$$

За намиране на грешките, получени от допълнителното завъртане оста на фрезата в осовата равнина **I** на ъгъл ψ_1 се намира проекцията на този ъгъл върху приведената равнина на рязане, успоредна на челната равнина на детайла. Тази равнина образува ъгъл γ с осовата равнина **I**.

Ъгълът на допълнителното завъртане в приведената равнина на рязане е равен на:

$$\operatorname{tg} \psi'_1 = \overline{A'_1O} / \overline{O'C} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \psi_1 = \overline{A_1O} / \overline{OC}$$

$$\overline{A'_1O} / \overline{A_1O} \quad \text{и} \quad \overline{OC} / \overline{O'C} \cdot \cos \gamma$$



**Фиг. 2.10. Съставящите движения по три равнини
получени от изкривяване на фрезата**

Откъдето се получава:

$$\operatorname{tg} \psi'_1 = \operatorname{tg} \psi_1 \cdot \cos \gamma \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \psi'_1 = \operatorname{tg} \psi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \alpha \quad (2.48)$$

Завъртането на фрезата в приведената равнина на рязане на ъгъл ψ'_1 поражда изместване на всички режещи ръбове на инструмента от правилното им положение в тази

равнина. Това изместване е толкова по-голямо, колкото дадения режещ ръб е по-изместен от средата на дължината на фрезата.

На фиг.2.11. е показано изместването на даден режещ ръб, намиращ се на разстояние I от средата на фрезата. На фигурата разстоянието I' е проекция на отсечката I върху приведената равнина на рязане.

$$I' = I \cdot \cos \gamma \quad (2.49)$$

Допълнителното завъртане на оста на фрезата около точка C на ъгъл ψ'_1 (фиг.2.11. и фиг.2.12.) измества режещия ръб от точка a в точка b . Дъгата ab се определя от израза

$$ab = \sqrt{I'^2 + r^2} \cdot \psi'_1 \quad (2.50)$$

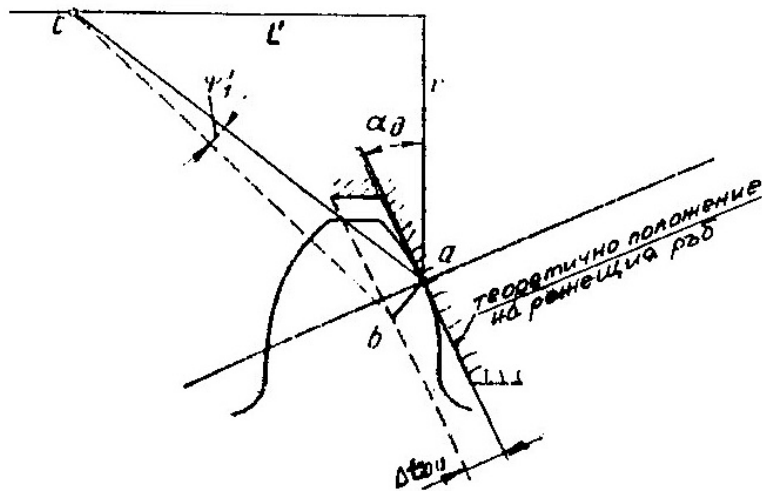
където r е разстоянието от оста на фрезата до точката на допиране на режещия ръб с профила на зъба, mm.

Изместването на този ръб по линията на зацепване води до грешка в профила на нарязваното зъбно колело, която се определя по формулата:

$$\Delta f = \sqrt{I'^2 + r^2} \cdot \psi'_1 \cdot \cos \left(\arctg \frac{I'}{I} - \alpha_D \right) \quad (2.51)$$

В частния случай когато разглежданото изместване на ръба се намира в средата на дължината на фрезата, (I' равно на 0) се получава:

$$\Delta f = r \cdot \psi'_1 \cdot \cos \alpha_D = r \cdot \psi_1 \cdot \cos \gamma \cdot \cos \alpha_D \quad (2.52)$$



Фиг.2.11. Изместване на произволен режещ ръб

Изместването на режещия ръб предизвикано от изкривяване на фрезата за средното сечение е Δf равно на $\pm 0,021$ mm. Може да се приеме, че това изместване е числено равно на хлабината между дорника и инструмента.

При разглеждане на другото движение се получава завъртане на ъгъл ϕ_2 в осовата равнина II. Това завъртане също измества режещия ръб и може да се определи от зависимостта:

$$\Delta f = I' \cdot (1 - \cos \psi_2) \cdot \cos \alpha_D = I' \cdot \frac{\psi_2^2}{2} \cdot \cos \alpha_D \quad (2.53)$$

При чисто рязане разстоянието I' е много малко, тъй като рязането става със средната част на фрезата. Отчитайки, че ъгъл ϕ_2 е много малък (например $\psi_{2\max}$ равен на I' и 35") и в уравнението той е на квадрат, може да се приеме, че изместването на режещия ръб в осовата равнина II е близка до нула. По този начин изкривяването на фрезата върху дорника на машината води до изместване на режещите ръбове в приведената равнина на рязане.

Големината на това изместване зависи от големината на изкривяването. Това периодично изменение на изместването на профила води до такива грешки в профила на зъбното колело, както в случай на биене на фрезата на дорника на машината.

Привеждане грешките на червячната фреза

Разглеждайки по отделно влиянието на всички неточности от изработването, заточването и установяването на червячната фреза върху нарязаното зъбно колело, може да се получи сумарната грешка, създавана от инструмента [105, 106].

Грешката в геометрията или положението на инструмента оказва влияние само на основната стъпка на нарязаното зъбно колело и неговия профил. Натрупаната грешка в стъпката, винтовата линия на страничните повърхнини на зъба или направлението на зъба при зъбни колела с прави зъби няма да имат отклонения, зависещи от точността на установяване на фрезата.

Поради това всички влияния от неточност на фрезата могат да бъдат приведени към две грешки:

- приведена грешка на основната стъпка;
- приведена грешка на профила на зъбното колело.

Приведената грешка на основната стъпка се създава от следните грешки, получени при изработване, заточване и установяване на червячната фреза:

- 1) грешка в ъгъла на профила на фрезата:

$$\Delta_1 t_o = \pi \cdot m \cdot [\cos(\alpha_D + \Delta \alpha_D) - \cos \alpha_D] \quad (2.54)$$

- 2) местна грешка в профила:

$$\Delta_2 t_o = \Delta f_u \quad (2.55)$$

- 3) грешка от отклонение от нерадиалност на предната повърхнина на режещия ръб:

$$\Delta_3 t_o = \pi \cdot m \cdot \left\{ \cos \left[\alpha_D + (\Delta r \cdot \Delta \lambda \cdot \cos \alpha_D / 2(f'_o + c) \cdot m) \right] - \cos \alpha_D \right\} \quad (2.56)$$

4) местно изместване на режещия ръб:

$$\Delta_4 t_o = \Delta t_n \cdot \cos \alpha_D \quad (2.57)$$

5) отклонение в средната стъпка:

$$\Delta_5 t_o = \Delta t_{ou} \quad (2.58)$$

6) грешка (неточност) в ъгъла на винтовите канали:

$$\Delta_6 t_o = t_o \cdot \Delta \omega_D \cdot \operatorname{tg} \Delta \lambda \quad (2.59)$$

За определяне на вероятната величина на отклонение на основната стъпка на нарязваното зъбно колело се приема методът на квадратичното сумиране, който е подходящ поради точността си. Отклонението на основната стъпка, зависещо от инструмента ще се определи от уравнението:

$$\Delta_{\Sigma} t_o = \sqrt{\sum_{n=1}^6 (n \cdot t_o)^2} \quad (2.60)$$

Приведената грешка в профила, зависеща от фрезата, може да се намери като сума от следните неточности:

1) неточност от страничното затиловане:

$$\Delta_1 f = \Delta f_s \quad (2.61)$$

2) местни грешки в профила на фрезата:

$$\Delta_2 f = -\Delta f_u \quad (2.62)$$

3) неточност в ъгъла на профила на фрезата:

$$\Delta_3 f = \pi \cdot m \cdot [\cos(\alpha_D + \Delta \alpha_D) - \cos \alpha_D] \cdot \varepsilon \quad (2.63)$$

4) грешка от отклонение от нерадиалност на предните режещи ръбове:

$$\Delta_4 f = \pi \cdot m \cdot \left\{ \cos \left(\alpha_D + \frac{\Delta r \cdot \Delta \omega_D \cdot \cos \alpha_D}{2 \cdot (f'_o + c) \cdot m} \right) - \cos \alpha_D \right\} \cdot \varepsilon \quad (2.64)$$

5) отклонение в средната стъпка:

$$\Delta_5 f = \varepsilon \cdot \Delta t_n \cdot \cos \alpha_D \quad (2.65)$$

6) неравномерност на окръжната стъпка:

$$\Delta_6 f = \Delta t_{окр} \cdot \cos \lambda \cdot \operatorname{tg} \Delta \lambda \cdot \cos \alpha_D \cdot \varepsilon \quad (2.66)$$

7) местно преместване на режещите ръбове:

$$\Delta_7 f = \Delta t_{ou} \quad (2.67)$$

8) неточност на ъгъла на винтовите канали:

$$\Delta_8 f = \varepsilon \cdot t_o \cdot \Delta \omega_D \cdot \operatorname{tg} \Delta \lambda \quad (2.68)$$

9) биене на основния цилиндър на фрезата:

$$\Delta_9 f = \Delta a_o \cdot \sin \alpha_D \quad (2.69)$$

10) наклон на фрезата:

$$\Delta_{10} f = r \cdot \psi_1 \cdot \cos \gamma \cdot \cos \alpha_D \quad (2.70)$$

11) осово биене на фрезата:

$$\Delta_{11} f = e_{uoc} \cdot \cos \alpha_D \quad (2.71)$$

Вероятната стойност на отклонение на профила на нарязваното зъбно колело, зависеща от неточността на инструмента, се определя от израза:

$$\Delta_{\Sigma} f = \sqrt{\sum_{n=1}^{11} (\Delta_n \cdot f)^2} \quad (2.72)$$

От изброените по-горе грешки е видно, че неточността на профила е голяма, което е характерно за зъбофрезване с червячна фреза. Постига се клас на точност, който съответства на класа на точност на изработване на инструмента: КА – 7 степен на точност, А – 8 степен на точност, В – 9 степен на точност и С – 10 степен на точност [136,137]

3) Грешка в ъгъла на установяване на фрезата карета

2.1.1.4. По настройване на машината

1) Грешки, (неточност) при настройване на веригата за делене и диференциала

Грешката води до неточност на ъгловото завъртане на обработваното зъбно колело

Съвместното действие на всички изброени по-горе грешки предизвиква кинематична неточност на зъбното колело и намалява неговите експлоатационни качества.

Изучаването на комплексната грешка на зъбните колела има важно значение за оценката на експлоатационните качества на зъбната предавка. Откриването на отделните грешки е важно и от гледна точка на технологичния контрол. Той трябва да дава възможност да се установи технологичната причина за възникване на грешка. по резултатите от измерването. Фокус на по-нататъшната работа е разглеждането и симулирането на грешките от влиянието на инструмента и оборудването

2.1.2. Периодични грешки при зъбообработване

Всеки технологичен процес на формообразуване на зъбното колело е периодичен. В него има голям брой източници на елементарни хармонични грешки, които при своето сумиране създават периодични грешки върху изделието. Кинематичната верига на зъбообработващата машина се състои от въртящи се зъбни колела, валове, винтове, червяци и т.н., грешките в които се явяват източници на синусоидални колебания. Такива колебания

се пораждат и от ексцентрично установяване на заготовката и инструмента на машината [50, 88, 122].

Грешки във формата получени при предходни операции, водят до колебание на силата на рязане, от там и до различни деформации на технологичната система и това също се явява източник на синусоидално изменящи се грешки.

Практиката показва, че в реалните зъбни колела най-често се проявяват ограничен брой хармонични колебания, предизвикани от:

- 1) грешки от установяване на зъбното колело при обработване;
- 2) биене на делителните зъбни колела в машината;
- 3) биене в червячната делителна предавка;
- 4) биене на зъбонарезния инструмент;
- 5) осово биене на ходовия винт.

Тези грешки (неточности) могат да се открият по:

- 1) радиално биене на зъбния венец;
- 2) натрупана грешка в окръжната стъпка, измерена от базата при зъбообработването;
- 3) по синусоидално променящата се грешка в профила.

Другите периодични грешки в нормални условия оказват малко влияние и се проявяват само в случаите когато техните стойности значително превишават технически допустимите норми.

Съвременните зъбообработващи машини имат голяма стабилност на кинематичната верига и се отличават със своята точност при чисто обработване. Проведените експериментални изследвания на зъбофрезови машини показват, че стабилността на кинематичните вериги е достатъчна и динамичните грешки може да не се отчитат.

В резултат на това зъбното колело се явява носител на периодични грешки, съставлящите, на които могат да бъдат приети като хармоничен ред от колебания. Това значи, че съставлящите колебания образуват ред от синусоидално изменящи се величини. Една от тях има най-голям период, равен на периода на функцията (обикновено оборота на зъбното колело), а всички останали периоди са по-малки от периода на основното колебание.

Постепенното намаляване на периода на колебание по отношение на основното образува хармоничен ред (1, 1/2, 1/3, 1/4,). По този начин периодите на всички съставлящи на колебанието са пропорционални на периода на основната функция. Ако се означи периода на съставлящите колебания с T може да се запише израза:

$$T_1 = 2T_2 = 3T_3 = 4T_4 = \dots = iT_i \quad (2.73)$$

където T_1 , е период на основното колебание на $2\pi n$, сек.

Разглеждането на грешките в зъбното колело като периодична функция позволява по новому да се подходи към редица практически задачи.

Най-важни от тях се явяват:

- намиране на грешки в изделието по частните синусоидални колебания, действащи при изработване на зъбното колело;
- определяне на правилни методи за измерване на общата периодична грешка и разлагането и при технологичен анализ в ред от отделни хармонични съставлящи за определен период;
- определяне на амплитудата и началната фаза с цел откриване на причината (първоизточника) на общата периодична грешка;
- намиране на връзка между периодичната грешка в изделието и проявяването и при работа на даденото зъбно колело в предавка (увеличаване на шума, вибрациите и динамичните натоварвания).

2.1.3. Видове грешки при зъбообработването в зависимост от разположението на детайла и инструмента

Действието на отделните грешки при зъбообработване може да се сведе към четири основни вида (фиг. 2.12):

- 1) Изменение на радиалното разстояние между инструмента и заготовката - радиални грешки при обработването;
- 2) Нарушение на обхождането на инструмента спрямо заготовката или неточност на делението - тангенциални грешки на обработването;
- 3) Грешки от преместването на инструмента по направление на оста на детайла - осови грешки при обработването;
- 4) Грешки в профилиращата повърхнина на инструмента - грешки от профилиращата повърхнина.

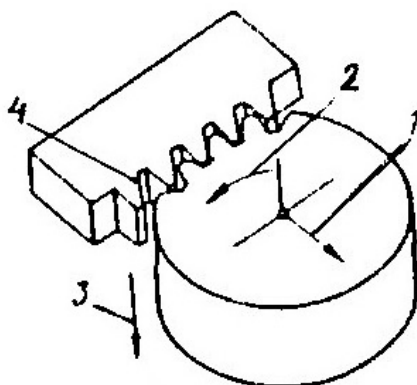
Тези грешки са обект на разработване на модел и симулиране.

Радиалните грешки се пораждат от грешка от базиране на детайла върху машината, радиално биене на инструмента и периодично колебание на положението на вретеното на детайла или инструмента. За радиалните грешки е характерно, че те остават постоянни във всяко осово сечение на колелото.

Грешки от базиране на заготовката върху машината може да се предизвикат от несъвпадане на монтажната и технологична база и от радиалното биене, проявяващо се в:

- 1) биене на центрите на машината относно оста на въртене;

2) биене на центровите отвори на заготовката относно нейните шийки за сглобяване;



Фиг. 2.12. Видове грешки при зъбообработване

1 - радиални; 2 - тангенциални; 3 - осови; 4 - от профилиращата повърхнина

- 3) биене на дорника на масата на машината относно оста на въртене;
- 4) биене на детайла от наличието на хлабина между диаметъра на отвора и на дорника.

Радиално биене може да се породи и при инструментите:

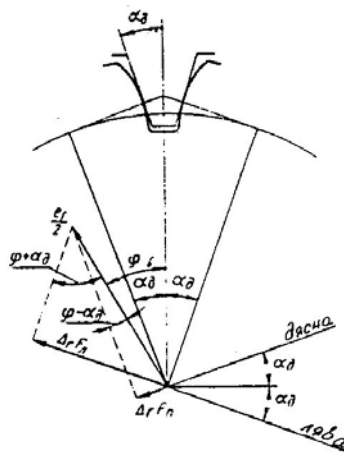
- 1) биене на повърхнината за установяване на инструмента на вретеното;
- 2) радиално биене на дорника за инструмента;
- 3) хлабината между инструмента и шийката на дорника;
- 4) грешки при изработването на инструмента.

Радиалната грешка от базиране на заготовката на машината създава в детайла геометричен ексцентрицитет, който се отразява по лявата и дясна линия на зацепване и има вида (фиг. 2.13.).

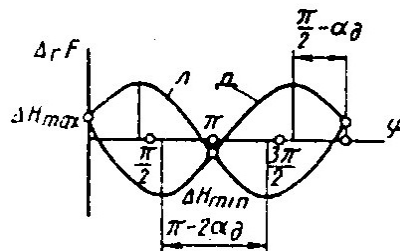
$$\Delta rF = \pm \frac{e_f}{2} \cdot (\sin(\varphi \pm \alpha_d)) \quad (2.74)$$

където ъгъл φ е текущият ъгъл на завъртане на колелото: знак (+) за лява линия на зацепване; знак (-) за дясна линия.

На фиг.2.14. е показана графика за изменение на кинематичната точност в зависимост от геометричния ексцентрицитет. Както се вижда от графиката точките на максималната грешка на лявата и дясна линия на зацепване на колелото са изместени на ъгъл $(\varphi - 2\alpha_d)$. Точките на максимално и минимално биене ΔH са изместени от точките на максимума на функцията на кинематична грешка ΔF на ъгъл $(\varphi/2 - \alpha_d)$.



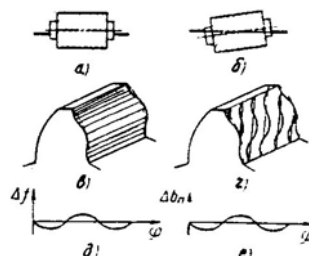
Фиг. 2.13. Изместване по линията на зацепване в зависимост от геометричния ексцентрицитет



Фиг.2.14. Графика за кинематичната грешка в зависимост от геометричния ексцентрицитет

По този начин мястото на разположение на точките, съответстващи на най-голямото радиално биене на колелото, е изместено от мястото на най-голямо проявяване на тази грешка при работа на колелото на ъгъл 70° (при $\alpha_d = 20^\circ$).

Голямо влияние оказва радиалното биене на инструмента при зъбофрезозане и зъбодълбане. При зъбофрезозане е възможно да се получи чисто радиално биене (фиг.2.15.а.), а също така и кръстосване на оста на инструмента и на дорника (фиг.2.15.б.). Кръстосаността на осите оказва три пъти по-голямо влияние от биенето на инструмента.

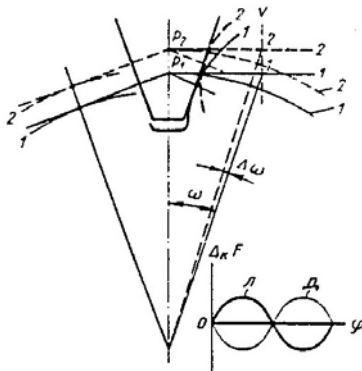


Фиг. 2.15. Радиално биене и кръстосаност на осите

Тангенциалните грешки (ТГ) се предизвикват от нарушаване на схемата на обхождане на инструмента и детайла (при машини работещи по метода на обхождане) или от

грешки в деленето. Източник на тангенциалните грешки се явяват грешките в кинематичната верига на машината и най-вече крайните червячни двойки или делителни дискове; ходовите дискове, ако влияят във веригата на обхождането. Тангенциалните грешки остават постоянни по всяка линия на зацепване.

Кинематичната грешка на делителното колело на машината поражда допълнително завъртане на заготовката в процеса на обработване на зъба, което е показано на фиг.2.19. Това се поражда от променящата се ъглова скорост на въртене на колелото.



Фиг. 2.16. Кинематична грешка на делителното колело

На фиг. 2.16. се вижда, че ако ъгловата скорост на обхождане се характеризира с лъча **1**, а линейната скорост на режещия ръб на инструмента и с вертикалната линия **v**, полюсът на зацепване при нарязване ще бъде в точка **P₁**. Тази точка се получава при пресичане на хоризонталната права прекарана през точка **1** с линията **v**. На друг участък от нарязване на зъбното колело се получава увеличаване на ъгловата скорост $\Delta\omega$. Тя се изобразява с лъча **2** и полюса на зацепване се замества в точка **P₂**.

В резултат на това по левия и десния профил ще се породят равни, но противоположни по направление кинематични грешки, които ще предизвикат неравномерност на въртене на колелото в предавката. Този процес може да се представи като осово периодично колебание на инструмента с честота съответстваща на честотата на въртене на нарязваното колело.

От направения обзор и анализ на видовете грешки, получавани при обработването на зъбни колела, може да се направи извода, че те се изучават от чисто геометрична страна. Често пъти има припокриване на грешки, които са разглеждани при различните класификации. Например има повторение на грешките от периодичен характер и тангенциалните грешки. Те са по същество един и същ тип грешки, но различните автори ги разглеждат в различни класификации. Същото важи и за радиалните грешки и грешките от базиране на заготовката и инструмента. Те са разгледани един път в раздела за грешка от установяване на заготовката и инструмента, а втори път в раздела от грешки в зависимост от разположението на детайла и инструмента.

Грешката от нестабилност на елементите на машината, разгледана в раздела за грешки на зъбообработващата машина, може да има периодичен характер поради периодичната промяна на силата на рязане. Тя не фигурира обаче при разглеждане на класификацията на периодичните грешки.

Повторение на грешки има и при разглеждане на тези породени от зъбообработващата машина (кинематична грешка) и тангенциалната грешка, разгледана в раздела за грешки в зависимост от разположението на детайла и инструмента.

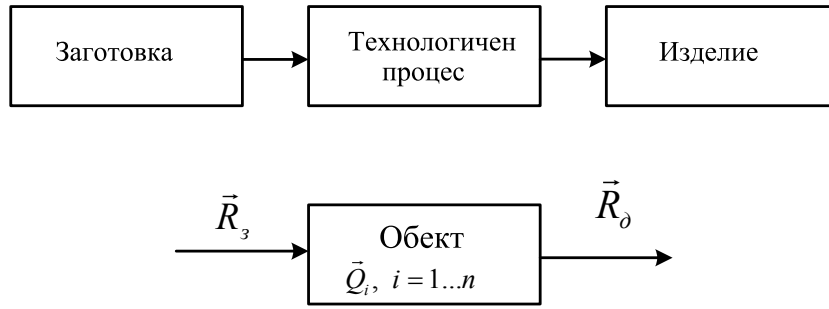
За вероятно сумиране на грешките се предлага така нареченото квадратично сумиране (уравнения 2.60, 2.72). Тези формули са верни обаче само при условие, че законите на разпределение на аргументите и функцията са идентични. Най-често различните грешки имат различни закони на разпределение и сумирането им трябва да се извършва по зависимости, отчитащи този факт.

2.2. Информационен модел на технологичния процес. Класифициране на грешките

От дадения по-горе обзор и анализ може да се направи извод, че липсва стройна система, по която да се извърши класификация на грешките при обработване на зъбни колела, без те да се повтарят в дадени раздели. За да може да се направи такава класификация на грешките, ще използваме информационния модел на технологичния процес разгледан в [26, 27]. Класификационен признак в този модел са причините, които пораждат грешките. В този модел технологичния процес се разглежда като преобразовател на информация (фиг. 2.17.). В равновесно състояние на входа на преобразователя на информация постъпва сигнал \vec{R}_3 , описващ състоянието на заготовката (в частност, на обработвания детайл). Този сигнал се преобразува от „обекта“ с параметри \vec{Q}_i , $i = 1 \dots n$. В резултат на това преобразуване на изхода на обекта се изработва сигнал \vec{R}_0 , описващ състоянието на обработения детайл (в частност, на изделието).

За идеален обект, без конструктивни и производствени отклонения, зависимостта между сигналите \vec{R}_3 и \vec{R}_0 се определя от идеалната функция на преобразуване на информацията F_0 :

$$\vec{R}_{00} = F_0(\vec{R}_3, \vec{Q}_i), (i = 1 \dots n). \quad (2.75)$$



Фиг. 2.17. Информационен модел на технологичен процес

В реалния обект конструктивните параметри имат определени отклонения $\Delta\bar{Q}_i$, сигналът \bar{R}_3 има отклонение $\Delta\bar{R}_3$. Функцията на преобразуване F се отличава от идеалната F_0 . За реалния обект връзката между сигналите на входа и изхода е следната:

$$\bar{R}_0 = F(\bar{R}_3 + \Delta\bar{R}_3, \bar{Q}_i + \Delta\bar{Q}_i), (i = 1...n). \quad (2.76)$$

Функцията (2.76) може да се разложи в ред на Тейлор, като с достатъчна точност може да се работи само с производните от нулева и първа степен:

$$\bar{R}_0 = F(\bar{R}_3, \bar{Q}_i) + \frac{\partial F}{\partial \bar{R}_3} \Delta\bar{R}_3 + \sum_1^n \frac{\partial F}{\partial \bar{Q}_i} \Delta\bar{Q}_i. \quad (2.77)$$

Разликата $\Delta\bar{R}_0$ между изходния сигнал \bar{R}_0 за реалния и \bar{R}_{00} идеалния обект определя грешката $\Delta\bar{R}_0$ на този сигнал:

$$\Delta\bar{R}_0 = \bar{R}_0 - \bar{R}_{00} = [F(\bar{R}_3, \bar{Q}_i) - F_0(\bar{R}_3, \bar{Q}_i)] + \frac{\partial F}{\partial \bar{R}_3} \Delta\bar{R}_3 + \sum_1^n \frac{\partial F}{\partial \bar{Q}_i} \Delta\bar{Q}_i \quad (2.78)$$

Първото слагаемо в уравнение (2.78) определя големината на структурната (методична) грешка, възникваща в резултат на използване в конструкцията на обекта не на идеална, а на приближена зависимост на \bar{R}_0 от \bar{R}_3 . Такива грешки възникват при използване на приближени закони за движение в технологичните системи, при обработване с неточно профилирани инструменти и др.

Второто слагаемо определя влиянието на грешката $\Delta\bar{R}_3$ на входния сигнал \bar{R}_3 . Тази грешка се отчита само при разглеждане на обекта като елемент на система обекти. Тя се отчита при изследване на формиране качеството на изделието в хода на целия ТП.