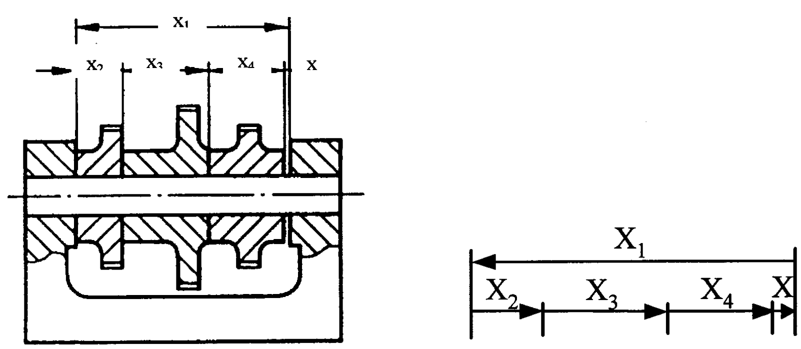
8. МЕРНИ ВЕРИГИ

8.1. Видови мерни вериги

Целта на задавањето на мерите и толеранциите е да се постигне потребната точност на заеманата положба на деловите заради остварување на нивната функција во склопот, при што трошоците за изработка треба да се сведат на минимум. Проверката на конзистентноста на зададените мери и толеранции не е едноставна задача, а евентуалните пропусти се откриваат обично дури при монтажа на деловите во склоп, што доведува до дополнителни трошоци за доработка на деловите и до појава на шкарт. Теоријата на мерни вериги ги дава основите за анализа и синтеза на економични толеранции.

Кога деловите се поставуваат еден до друг во склоп, отстапувањата на мерите се собираат. Потрбната точност на зајевите помеѓу деловите се проверува со примена на мерни вериги. **Мерна верига претставува низа од мери кои се надоврзани една на друга по затворена контура** и **кои ја одредуваат меѓусебната положба на геометриските елементи** (површини, оски и сл.). **Мерна верига може да се се формира за еден дел (мерна верига за еден дел) или за повеќе делови од склоп (монтажна мерна верига).** Поради затвореноста на мераната верига, постои зависност помеѓу толеранциите на членовите од веригата, што значи дека за да се пресмета толеранцијата на некоја мера од веригата треба да се земат предвид толеранциите на останатите мери од веригата.

На сл. 8.1 е прикажана мерна верига која се состои од четири члена X_1, X_2, X_3 и X_4 и *завршен член* X кој го претставува зјајот помеѓу куќиштето и главината. **Кај линиска мерна верига, сите членови од мерната верига се паралелни со завршниот член**. Освен линиска, кај делови и склопови со посложена геометрија може да се јави и просторна мерна верига.



Сл. 8.1. Монтажна мерна верига

Со пресметка на мерните вериги се обезбедува постигнување на пропишаното ниво на квалитет, потребниот степен на меѓусебна заменливост и економична изработка на деловите и склоповите од производот. Методите кои се применуваат при решавањето на мерните вериги се: *метод на* *потполна заменливост, метод на непотполна заменливост, метод на заменливост во рамките на група, метод на подесување и метод на регулирање*. Овие методи суштински се разликуваат според начинот на обезбедување на потребната точност на завршниот член на мерната верига.

При примена на методот на **потполна заменливост**, сите делови може да се монтираат и во случај кога се изработени со екстремни вредности на толеранциите. Тоа значи дека нема да се јави потреба за отфрлење или доработка на деловите, со што времето за монтажа се сведува на минимум. Овој метод се применува кога функционалните барања не условуваат примена на тесни толеранции.

Методот на **непотполна заменливост** се потпира на претпоставката дека веројатноста да се јават делови изработени со екстремни вредности на толеранциите е мала. Поради тоа, се дозволува примена на нешто пошироки толеранции отколку при методот на потполна заменливост, со што се намалуваат трошоците за изработка.

Кога се бараат тесни толеранции, често се применува методот на **заненливост на деловите во рамките на група**. Така на пример, цилиндрите и цилиндричните отвори во автомобилските мотори се изработуваат со толеранција која овозможува нивно економично производство. Изработените цилиндри и отвори во блоковите потоа се сортираат во групи според нивното отстапување од мерата. Со оваа постапка се овозможува користење на пошироки толеранции, а заменливоста е можна само во рамките на одредена група.

Кај **методот на подесување**, за да се постигне потребниот зјај помеѓу деловите, се уфрлаат листови или прстени со различна комбинација на мерки кои треба да го сведат постојниот зјај меѓу деловите на потребна големина.

При **методот на регулирање**, се применува навој или пружина кои ги компензираат варијациите на мерките од мерната верига.

Теоријата и пресметката на мерните вериги се применува на дава начина, за: 1) *синтеза на толеранции* - за одредување на коректни и економични толеранции на челеновите од мераната верига, така што толеранцијата на завршниот член да се наоѓа во рамките на пропишаното барање за точност, 2) *анализа на толеранции* - при утврдување на номиналната мера и толеранцијата на завршниот член кога се познати номиналните мери и толеранциите на останатите членови од мераната верига.

8.1. Метод на потполна заменливост

Основна карактеристика на методот на потполна заменливост е што мерата и толеранцијата за завршниот член се добиваат во зависност од останатите членови на мерната верига без никакви дополнителни услови.

Мерите се претставуваат како насочени надоврзани вектори, така што почетокот на наредниот вектор е во крајната точка на претходниот вектор (сл. 8.1а). Номиналната вредност на мерата на завршниот член се добива со собирање на интензитетите на проекциите на векторите на мерите врз насоката на завршниот член според формулата:

$X = \Sigma a_i \,.\, X_i$ каде:

- X е номиналната мера на завршниот член на веригата,
- a_i е предзнакот на насоката на векторот на и-тата мера, кој има вредност -1 за иста насока со завршниот член и 1 за спротивна насока од насоката на завршниот член,
- X_i е интензитетот на векторот на котата проектиран врз насоката на завршниот член.

Горното отстапување на мерата на завршниот член X_g се добива како сума на горните отстапувања на мерите X_{ig}, чиј единечен вектор на преокцијата е насочен спротивно од векторот на завршниот член и долните отстапувања на мерите X_{id}, чиј вектор е еднакво насочен со векторот на завршниот член.

$$X_g = \Sigma a_i \cdot X_{ig} \; (за\; a_i > 0) + \Sigma a_i \cdot X_{id} \; (за\; a_i < 0)$$

Долното отстапување на мерата на завршниот член X_d се добива како сума на долните отстапувања на мерите кои се обратно насочени од векторот на завршниот член и горните отстапувања на мерите кои се еднакво насочени со завршната мера.

$$X_d = \Sigma a_i \cdot X_{id} \; (за\; a_i > 0) + \Sigma a_i \cdot X_{ig} \; (за\; a_i < 0)$$

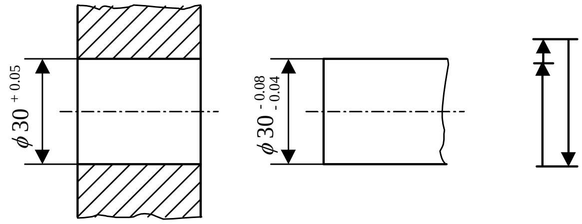
При примена на методот на потполна заменливост, вкупната толеранција на завршниот член на мерната верига е еднаква на збирот на толеранциите на сите членови на мераната верига.

$$\boldsymbol{T = X_g - X_d = \Sigma T_i}$$

Пример 1.

Спојот на отвор и осовина (сл. 8.2) може да се смета за едноставна мерна верига. Во задачата се бара да се одреди максималниот и минималниот зјај помеѓу оската и отворот според податоците на сликата.

$X_g = 30.05 - 29.92 = 0.13$ $X_d = 30.0 - 29.96 = 0.04$



Сл.8.2. Спој на отвор и осовина како едноставна мерна верига

Пример 2.

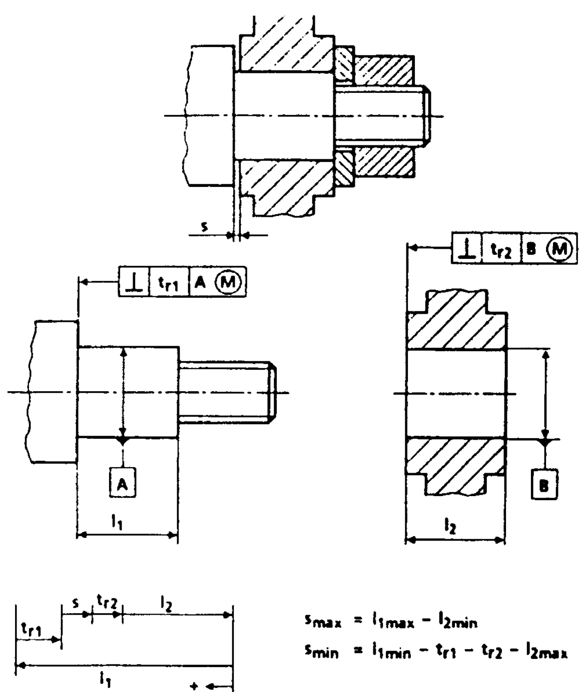
Да се одреди големината на зјајот и неговото горно и долно отстапување за мерната верига од сл. 8.1, ако мерите и толеранцијата на членовите на мерната верига се $X_1 = 90^{\pm 0.3}$, $X_2 = 40^{-0.2}$, $X_3 = 32^{-0.1}$ и $X_4 = 17^{\pm 0.1}$.

$X = 90 - 40 - 32 - 17 = 1$ $\quad\quad$ $T = 0.6 + 0.2 + 0.1 + 0.2 = 1.1$

$X_g = 90.3 - 39.8 - 31.9 - 16.9 = 1.7$ $\quad$ $X_d = 89.7 - 40.0 - 32.0 - 17.1 = 0.6$

Мерата и отстапувањето на зјајот се: $1^{+0.7}_{-0.4}$

Претходните примери се однесуваа на одредување на мерата и толеранцијата на завршниот член кога се земаат предвид само отстапувањата на мерите. Освен отстапувањата на мерите, **деловите можат да имаат и геометриски толеранции кои исто така влијаат врз големината на завршниот член**. На сл. 8.3 е зададена геометриската толеранција на нормалност, каде дозволеното геометриско отстапување на страничната површина е 0.1 при максимум материјал. Во ваков случај може да се јават проблеми при монтажа на деловите, ако не се земе предвид ова отстапување. На сл. 8.3 е прикажана и мерната верига во која се вклучени и толеранциите на нормалност на страничните површини од двата дела.



Сл. 8.3. Пресметка на мерна верига со земање предвид на геометриските толеранции на нормалност

Предности на методот на потполна заменливост се:

- Едноставно определување на толеранцијата на завршниот член.
- Деловите лесно се монтираат во машини без пребирање или дотерување.

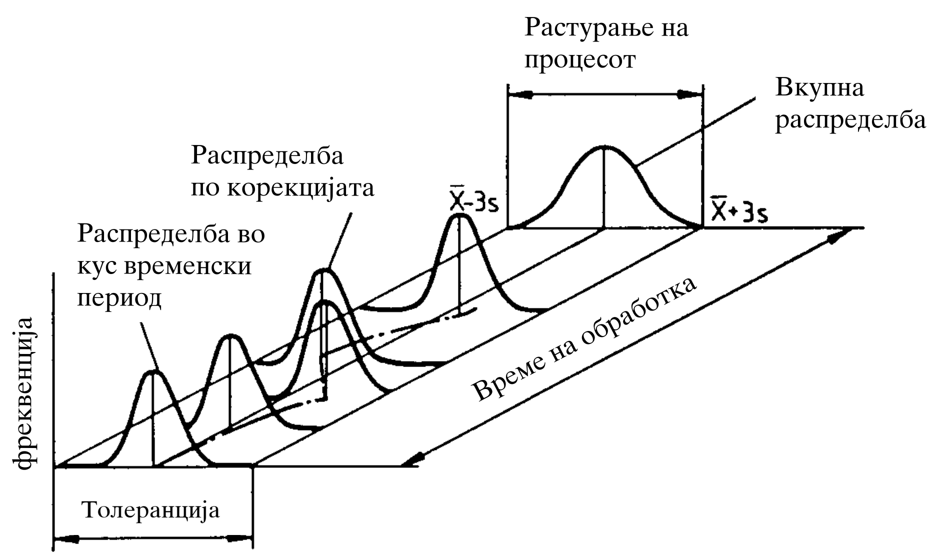
- Се постигнува висок степен на кооперативност на различни претпријатија или погони при изработка на делови и потсклопоови кои се вградуваат во ист производ.

Покрај овие и други предности, методот на потполна заменливост ретко се пименува. Голем недостаток на овој метод е што толеранциите на членовите на мерната верига се доста помали отколку при примена на други методи. Тоа ја поскапува цената на изработката на деловите, а се случува и да не може да се постигне бараната прецизност со расположивите машини и технологија. Овој метод се применува воглавно кај куси мерни вериги (2 до 3 члена) и кај делови кај кои се бара висок степен на заменливост.

8.2. Метод на непотполна заменливост

Во пракса ретко се јавуваат најлошите случаи, односно сите мери кои ја формираат мерната верига да бидат со максимална вредност или пак сите да бидат со минимална вредност. Теоријата на веројатност вели дека можноста да се случи таква комбинација на мери е многу мала.

Распределбата на мерите добиени со некој од процесите на машинска обработка се однесува како на сл. 8.4. Да претпоставиме дека се работи за стружење на определен дијаметар. Врвот на алатот со време се истрошува, па се јавува тенденција кон изработка на се поголеми дијаметри. Од време на време мора да се изврши корекција на положбата на алатот или пак негова замена. Затоа, кога се зборува за можностите на процесот за изработка на мери со одредена точност, треба да се следат мерите добиени во подолг временски период. При голем број на примероци (повеќе од 30) се забележува одредена правилност на групирањето на мерите што може да се опише со кривите дадени на сл. 8.4.

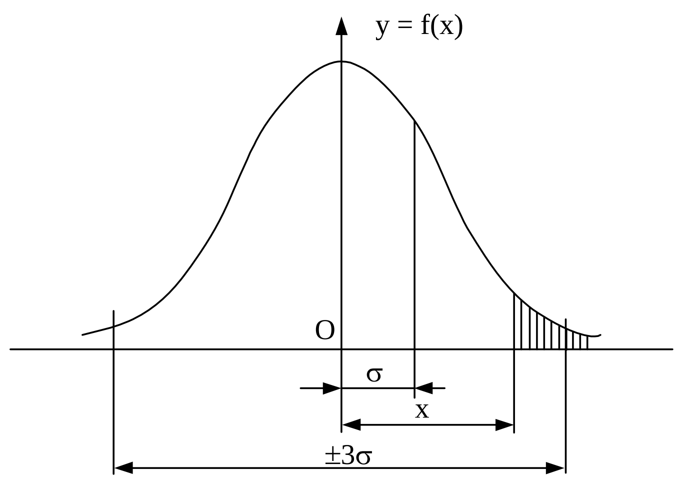


Сл. 8.4 Распределба на мерите добиени со некој од процесите на обработка

Вистинските мери на деловите зависат од многу фактори и се случајни големини кои се распределени во одреден интервал. Мерите добиени со процес на машинска обработка нејчесто се распределуваат според нормалната распределба, односно Гаусовата распределба. При нормалната распределба, најмногу мери се јавуваат со големина блиска до една средна мера (средина на распределбата), а колку се оди подалеку од средината на интервалот, зачестеноста на појавата на мерите со поголеми отстапувања опаѓа. Бидејќи веројатноста за појава на мери со екстремни вредности на толеранциите е многу мала, со одреден ризик можат да се прошират границите на толерантното поле на мерите.

Карактеристика на методот на непотполна заменливост е што се земаат поголеми вредности на толеранциите на мерите со свесно прифаќање на одреден ризик при некоја комбинација на мери да се појави проблем при монтажата. Веројатноста за појава на незгодна комбинација на мери се зема да биде доволно мала за да не се отежнува процесот на монтажа. Од друга страна, значително се зголемуваат толеранциите на мерите на членовите од мерната верига со што се поевтинува изработката на деловите.

Графикот на нормалната распределба е прикажан на сл. 8.5 за случај кога центарот на распределбата (средината на толерантното поле) е поставен во координатниот почеток $\mu=0$, а стандардната девијација е $\sigma=1$. Нормалната распределба е експоненцијална крива (равенка 1). Вкупната површина под кривата е еднаква на 1 и одговара на веројатност 100%.



Сл. 10.5. Дијаграм на нормална распределба

Според законите на статистиката, во интервалот $\pm 3\sigma$ *се наоѓаат 99,73% од деловите за кои се контролира дадената мера, а само 0.27 % се вон од границите на овој интервал.* Овој процент на прифатени делови е задоволителен во повеќето случаи во техниката, поради што границата на варијација на некоја големина се ограничува во интервалот $\pm 3\sigma$. Тоа значи дека од 1000 делови или склопови, кај приближно три треба да очекуваме проблеми заради отстапувања на мерите. Во интервалот $\pm 2\sigma$ се наоѓа

95.44%, а во интервалот ± 1σ се наоѓа 68.26%, од површината под кривата. Во поново време, поради пострите барања за квалитет, се бара точност ±4σ (6 проблема на 100 000 пати), ±5σ (6 на 10 000 000) или ±6σ (2 на 1 000 000 000), што е резултат и на користењето на поквалитетни машини алатки подобри постапки за контрола.

Во равенката (1) на кривата на нормалната распределба, x претставува оддалеченост од средната вредност на распределбата. Изразот σ^2 претставува карактеристика на растурањето на мерите за одреден процес. Кога растурањето е помало, кривата е потесна и повисока, и обратно, при поголемо растурање на мерите, кривата е потапа и поширока.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2\sigma^2} \qquad (1)$$

Површината надвор од границите на ± x е дефинирана со равенката:

$$q = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-x^2/2\sigma^2} dx \qquad (2)$$

Вредноста на *q* може да се изрази и како разлика од вкупната површина под кривата и површината под кривата во границите на ± x. Ако се замени $t=x/\sigma$ каде *t* е параметар, равенката (2) станува:

$$q = [1 - 2\phi(t)] \cdot 100\ [\%] \qquad \text{каде:} \quad (3)$$

$$\phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-t^2/2} dt \qquad (4)$$

Ако центарот на распределбата се наоѓа во средината на толерантното поле, вредноста ± x ја определува големината на толерантното поле. Ако ја знаеме девијацијата σ за одреден процес, тогаш широчината на толерантното поле се зема за биде приближно ± 3σ, односно 6σ за вообичаена точност, со што се очекува прифаќање на 99,73% од избраните делови.

8.2. Примери

Пример 1.

За една осовинка е зададена мера со толеранција $\phi 10^{\pm 0.1}$. Процесот со кој се изработува осовинката се карактеризира со стандардна девијација σ=0.05. Средината на отстапувањето е при мерата μ=10. Да се определи кој процент од деловите ќе биде изработен вон од дозволените граници и процентот на прифатените делови.

Вредноста на x одговара на половина од толерантното поле, па со замена во ревенката, за параметарот *t* се добива:

$t = x/\sigma = 0.1/0.05 = 2$

Од табела 8.1 за $t = 2$ се отчитува веројатноста за појава на шкарт, која во примеров изнесува $q = 4.55$ %. Во границите на дозволената толеранција ќе бидат изработени 100 - 4.55 = 95.5% од осовинките.

Табела 10.1.

t	q [%]	t	q [%]	t	q [%]	t	q [%]	t	q [%]
0.0	100	0.9	36.81	1.8	7.19	2.7	0.69	3.6	0.032
0.1	92.03	1.0	31.73	1.9	5.73	2.8	0.51	3.7	0.022
0.2	84.15	1.1	27.13	2.0	4.55	2.9	0.37	3.8	0.014
0.3	76.42	1.2	23.01	2.1	3.75	3.0	0.27	3.9	0.010
0.4	69.92	1.3	19.36	2.2	2.78	3.1	0.19	4.0	$6.3 \cdot 10^{-3}$
0.5	61.71	1.4	16.15	2.3	2.14	3.2	0.14	5.0	$5.7 \cdot 10^{-5}$
0.6	54.85	1.5	13.36	2.4	1.64	3.3	0.10	6.0	$2 \cdot 10^{-7}$
0.7	48.39	1.6	10.96	2.5	1.24	3.4	0.06	7.0	$3 \cdot 10^{-10}$
0.8	42.37	1.7	8.93	2.6	0.93	3.5	0.047	8.0	$1 \cdot 10^{-13}$

При анализа на мерни вериги по методот на потполна заменливост, толеранцијата на завршниот член на мерната верига е збир од толеранциите на сите членови на мерната верига.

$$T = T_1 + T_2 + \ldots + T_n$$

При примена на методот на непотполна заменливост, толеранцијата на завршниот член на мерната верига се определува според равенката:

$$T_s = \sqrt{T_{s1}^2 + T_{s2}^2 + \ldots + T_{sn}^2}$$

Пример 2.

Ако толеранциите на сите 4 членови од мерната верига на сл. 8.1 се еднакви, на пример ±0.05, толеранцијата на завршниот член треба да биде:

- при потполна заменливост $T = 0.1+0.1+0.1+0.1= 0.4$
  поединечните толеранции се $T_i = T/4 = 0.25\,T$
- при непотполна заменливост $T_s = \sqrt{0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2 + 0.1^2} = \sqrt{0.04} = 0.2$
  поединечните толеранции се $T_i = T_s/2 = 0.5\,T_s$

Со анализа на вредностите може да се заклучи дека при примена на методот на непотполна заменливост во овој пример отстапувањето на завршниот член е реално два пати помало за исти вредности на толеранциите на членовите на веригата.

Поинаку гледано, ако толеранцијата на завршниот член треба да биде 0.4, тогаш при примена на методот на непотполна замеливост можеме двојно да ги прошириме толеранциите на членовите на мерната верига, односно:

$$T_s = \sqrt{0.2^2 + 0.2^2 + 0.2^2 + 0.2^2} = \sqrt{0.16} = 0.4$$

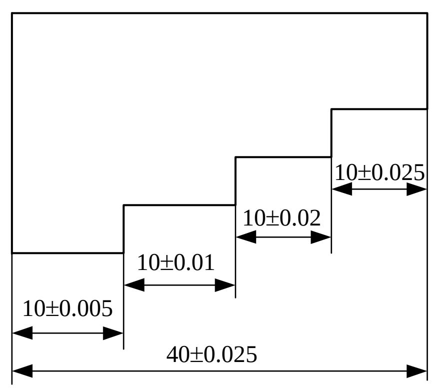
Притоа треба да сметаме дека ќе се јават 3 склопа од 1000, кај кои ќе се јават проблеми при монтажа (треба да се промешат делови).

Ако истиот пример се прошири за мерни вериги со различен број членови, тогаш може да се анализира факторот за кој може да се зголеми широчината на толерантното поле на членовите од мерната верига при ист завршен член, при примена на методот на непотполна заменливост. Тој фактор изнесува колку квадратниот корен од бројот на членови на веригата (1.41 за 2 члена, 1.73 за 3 члена, 2.0 за 4 члена, 2.23 за 5 члена, 2.45 за 6 члена).

Пример 3.

За делот од сл. 8.6 треба а се одреди:

- колкава треба да биде толеранцијата на мерата 40 во случај на потполна заменливост,
- колкава треба да биде толеранцијата на оваа мера во случај на непотполна заменливост и
- процентот на прифаќање на мерата 40 ако нејзината толеранција е ±0.025 .



Сл. 8.6. Мерна верига за еден дел

- $T = 0.01+0.02+0.04+0.05 = 0.12$
- $T_s(\pm 3\sigma) = \sqrt{0.01^2 + 0.02^2 + 0.04^2 + 0.05^2} = 0.0678$
- $\sigma = 0.0678/6 = 0.011$

  $t = x/\sigma = 0.25/0.011 = 2.21$

  За t = 2.2 од табела 10.1 се отчитува q = 2.78, а процентот на прифатените делови изнесува:

  100-2.78 = 97.22 %

Пример 4.

Номиналниот дијаметар на осовината и отворот прикажани на сл. 10.7 треба да биде 10 mm, а зјајот помеѓу нив треба да се движи во границите од z_{min}=0.05 до z_{max}=0.2.

Да се определат толеранциите на осовината и отворот во случај на :

- примена на методот на потполна заменливост,
- примена на методот на непотполна заменливост.

Средната големина на зјајот е:

$$\overline{z} = \frac{z_{\min} + z_{\max}}{2} = \frac{0.05 + 0.2}{2} = 0.125$$

Средното отстапување на зјајот е:

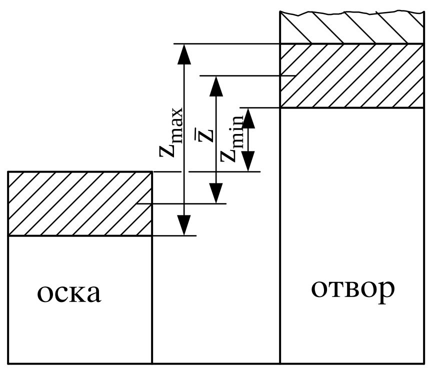
Зјајот може да се претстави како мера со толеранција:

$$\Delta z = \frac{z_{max} - z_{min}}{2} = \frac{0.2 - 0.05}{2} = 0.075$$

$$z = 0.125 \pm 0.075$$

При 100% заменливост, толерантното поле на отворот и на осовината треба да биде по 0.075 (ако се распредели подеднакво на двата дела). При примена на ситемот заеднички отвор, мерата на отворот треба да се движи во границите 10 до 10.075, а мерата на осовината во границите 9.875 до 9.95.

При 99.73 % заменливост, односно при толерантно поле со големина $\pm 3\sigma$, толерантното поле на осовината и на отворот изнесува $0.075 \cdot 1.41 = 0.1$. Ако толерантните полиња се распоредат по системот заеднички отвор, мерата на отворот треба да е во границите 10.0 до 10.1, а мерата на осовината 9.875 до 9.975.



Сл.10.7. Синтеза на толеранции за оска и отвор при познат зјај

Заклучоци:

- Примената на геометриските толеранции овозможува поедноставно остварување на бараната функција со примена на пошироки толеранции.
- Треба да се применуваат колку е можно повеќе заеднички референции при изработка, контрола и монтажа.
- Зададените мери и толеранции треба да се достапни и мерливи.
- Со примена на условот на максимум материјал се постигнуваат дополнителни заштеди.
- Со примена на геометриските толеранции делумно се одредува редоследот на обработка на површините од делот.
- Непотребна контрола на толеранциите го поскапува процесот на изработка, а не придонесува за зголемен квалитет на производот.
- Отстапувањето на мерата на завршниот член е поголемо кај мерни вериги со поголем број членови.