ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
doc.Z. Ramonas
2005 06 __

OPTIMALIŲ TOLERANCIJŲ SKAIČIAVIMAS NESUSIETOSE MATMENŲ GRANDINĖSE

Magistro darbas

Vadovas
doc. dr. J Rimkus
2005 06 __

Atliko
MM-3 gr.stud.
A. Kuzminskis
Recenzentas
2005 06 __

ŠIAULIAI, 2005

TURINYS

ĮŽANGA

Mechaninio apdirbimo metu gaunamos specifinės detalių matmenų paklaidos, kurios priklauso nuo apdirbimo tikslumo, kuris priklauso nuo staklių tikslumo, tvirtinimo tikslumo, įrankio, bazavimo tikslumo. Ruošiniai dėl savo konstrukcijos formos ypatumų, turintys skirtingą standumą, veikiant pjovimo jėgoms technologinio proceso metu patiria įvairius persislinkimus, kurie sąlygoje detalės formos netikslumus. Būtina pastebėti šiuos trūkumus gamybos metu nes jei to nepadarysime, jie vis tiek išaiškės surinkimo metu, kai pataisyti detalės jau bus neįmanoma. Tuomet būtinybė bus keisti jos konstrukciją, o jei to nepadarysime nukentės gaminio kokybė. Šiais laikais gaminių kokybė nedaug te atsilieka nuo savikainos, gaminį įvertinančių kriterijų lentelėje. Šiuo metu vyrauja didžiulė konkurencija tarp įmonių, siūlančių vienodą produkciją, gaminio kokybė turi būti kuo aukštesnė, o savikaina kuo mažesnė. Todėl detalės projektavimas ir jos tikslumo užtikrinimas technologinių operacijų metu užima labai svarbią vietą.

Darbo tikslai. Optimalių tolerancijų skaičiavimas nesusietose matmenų grandinėse:

— Nustatyti optimalias tolerancijų reikšmes, panaudojant optimalumo kriterijų apdirbimo savikainą.

— optimalių tolerancijų santykių nustatymas.

Darbo aprobavimas. Darbas buvo išdėstytas ir aptartas mokslinėje studentų konferencijoje "Studentų mokslinė konferencija", Šiauliai, 2005 gegužės 25d.

Darbo apimtis ir struktūra. Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, priedai. Darbo apimtis 40 psl., kuriuose yra 17 paveikslų, 1 lentelė.

1. Tikslumas mašinų gamyboje

1.1 Mašinos tikslumas

Detalės kokybę apsprendžia ruošinių kokybiškumas, kuris gali keistis. Todėl atskirais atvejais galime nagrinėti, kaip detalės tikslumą nulemia kitų reiškinių įtaka: matmenų netikslumas, ovališkumas, plokštumas, statumas ir kt.

Bendri teoriniai klausimai susiję su tikslumu technologiniuose procesuose, su teigiamais ir neigiamais faktoriais. Technologinių procesų tikslumas remiasi metodais: struktūrinių schemų analize, matricinės algebros, tikimybių teorija ir matematine statistika.

Detalių konstrukcijai keliami tokie technologiškumo reikalavimai:

a) mechaniškai apdirbami paviršiai turi būti kuo mažesni ir kuo plonesnis nuimamas medžiagos sluoksnis;

b) detalė turi būti pakankamai standi, kad jai galima būtų taikyti intensyvius apdirbimo režimus;

c) detalės formą parinkti tokią, kad detalę būtų galima gerai ir tvirtai įtvirtinti, kad būtų patogu prieiti prie apdirbamų paviršių pjovimo įrankiais. Jei patogių bazavimo paviršių nėra, reikia padaryti ruošiniuose dirbtines bazes-prielajas.

Šis darbas reikalingas tam, kad padėtume technologams nustatyti neigiamus faktorius, kurie apsprendžia apdirbimo tikslumą, o tai leis padaryti atitinkamas išvadas, kurių pagalba galėsime priimti efektyvius sprendimo būdus, padėsiančius išspręsti iškilusias problemas, o taip pat daug racionaliau žiūrėsime į tai, kai projektuosime naujus technologinius procesus. Klausimų susijusių su tikslumu gamyboje, sprendimui turi didelę įtaką detalus matematinis kiekvienos operacijos ir technologinio proceso aprašymas. Matematiniai modeliai gali būti naudojami kaip priemonė tiksliai apskaičiuoti kiekvieną operaciją, sudarančią visą technologinį procesą, taip pat neigiamų faktorių įtaką apdirbimo tikslumui. Pagrindiniai reikalavimai keliami pasirinktam modeliui, kad jis suteiktų, kiek galima maksimaliau, informacijos ir, kiek galima, būtų artimesnis nagrinėjamam procesui,t.y. matematinis aprašymas turi ypač tiksliai atvaizduoti ir papildomai suteikti objektyvių teiginių, susijusių su realiu technologiniu procesu, atmetus visus antraeilius įtakos faktorius. Sutapimo sąlygos tarp modelio ir realaus technologinio proceso turi būti aiškiai suformuluotos ir aprašytos. Technologiniams procesams, vienetinės ir serijinės gamybos, charakteringa tai, kad paėmus kiekvieną operaciją ar visą procesą atskirai, jie atliekami visiškai tokiais pat principais.

Vienetinės ir serijinės gamybos technologinių procesų matematinių modelių kūrimui galime naudoti dvejopus metodus; tikimybinius (teorinius) ir statistinius (eksperimentinius). Tikimybinis metodas taikomas tada, kai tiksliai yra žinomos funkcinės priklausomybės, vaizduojančios mechanines, fizines, chemines ir kitas technologinių procesų savybes. Statistiniai metodai leidžia su atitinkama aparatūros pagalba atlikti tam tikrus bandymus, iš kurių galime susikurti sąlygas, kurios bus reikalingos tolimesniems masinės gamybos modelio projektavimo darbams atlikti. Tikimybiniai ir statistiniai metodai yra glaudžiai susiję vienas su kitu tuo, kad teorinį modelį visada reikia eksperimentiškai patikrinti, o eksperimentinis modelis negalimas be teoriškai atlikto tyrimo.

1.2 Faktoriai, turintys įtaką į apdirbimo tikslumą

Detalės ir jų atskiri paviršiai charakterizuojami atsižvelgiant į tokius parametrus: atskirų paviršių matmenų tikslumą ; formos ir tarpusavio padėties tikslumą, banguotumą, paviršiaus šiurkštumą.

Detalės tikslūs parametrai formuojami per visas technologines operacijas: nuo ruošinio suformavimo iki detalės išbaigimo. Priimta, kad tikslumas vienos ar kitos technologinės operacijos charakterizuojamas paklaidos dydžiu, atsirandančiu toje operacijoje. Kuo mažiau paklaidų atsiranda apdirbimo metu, tuo detalė yra aukštesnio tikslumo. Projektuojant detalės apdirbimo technologines operacijas daugeliu atvejų nepavyksta apskaičiuoti norimo tikslumo. Tuo tikslu yra sudaromos tikslumo lentelės, turinčios skirtingų apdirbimo metodų statistinius duomenis; matmenų grandinės ar paklaidų medis.

Paklaidų formos technologinių matmenų skaičiavimo supaprastinimui ir jų išsidėstymas vadinamas erdvinėmis paklaidomis, kurios priklausomai nuo kontrolės būdo skirstomos į dvi grupes:

1) erdvinės paklaidos, esančios tarp kelių paviršių;
2) erdvinės paklaidos, neįeinančios į užlaidos dydį.

Inžinierius projektuodamas technologines operacijas nurodo ne tik operacijos atlikimo būdą, bet ir kontrolės būdą, nes tai leidžia nustatyti vienokią ar kitokią erdvinę paklaidą. Tokio paskirstymo būtinumas taps akivaizdus, kuomet bus atliekamas matmenų skaičiavimas. Norint užduoti techninius reikalavimus gaminiui atsižvelgiant į jo paviršių išsidėstymą, tai galime padaryti dviem etapais: *pirma* – užlaidų dydžių parinkimas pagal statistinio tikslumo lenteles; *antra* – būtinų ir pakankamų techninių reikalavimų paskyrimas, vienareikšmiškai nusakantis kiekvienoje operacijoje atsirandančių paviršių padėtį. Jei šių sąlygų nevykdoma, tai neįmanoma prognozuoti technologinio proceso tikslumą, ir detalės kokybė, paremta šiuo procesu, negarantuojama.

Techninės reikalavimai gali būti žymimi sutartiniais simboliais arba tekstu. Remiantis techniniais reikalavimai apdirbtas paviršius turi užimti apibrėžtą padėtį bazės atžvilgiu. Techninių reikalavimų kiekis neturi būti pateiktas per didelis ar per mažas, nes viena ar kita veda prie paviršiaus padėties neapibrėžtumo.

1.3 Užlaidų nustatymas technologinėse operacijose

Užlaidų nustatymas technologinėse operacijose turi svarbią reikšmę ir daro esminę įtaką technologinio proceso kokybei bei detalės ar mašinos savikainai. Nagrinėjant matmenų tikslumą, technologinėse operacijose paprastai naudojama paklaidos sąvoka. Konstruktoriniame bei technologiniame darbe naudojama sąvoka užlaida. Parenkant užlaidą reikia numatyti ribas, kuriose turi tilpti paklaidos. Užlaidų dydis priklauso nuo detalės paskirties.

Galutiniu kriterijumi, parenkant užlaidą, technologinėse operacijose tampa detalės atitikimas brėžinyje nurodytiems techniniams reikalavimams. Tačiau būtina numatyti, kad įrenginys užtikrintų norimą užlaidą. Jeigu kiekvienas matmuo ar techniniai brėžinio reikalavimai būtų atliekami per vieną technologinę operaciją, tai nesukeltų didelių sunkumų. Užtektų tik atsirinkti atitinkamus įrengimus pagal tikslumo charakteristikas, ir uždavinys būtų išspręstas. Tai galima padaryti tik nedaugeliu atveju. Paprastai vienas ar keli detalės matmenys ir techniniai reikalavimai tiesiog neatliekami, o gaunami kaip rezultatas kitų matmenų, kurie tiesiog surišti per matmenų grandinę. Bandymas pakeisti tokį matmenų sąryšį paprasčiausiais variantais priveda prie to, kad reikia papildomai įvesti operacijas, kas brangina technologinį procesą.

Po užlaidų parinkimo, atitinkančias įrengimų galimybes, reikia išbandyti, ar pasirinktas variantas atitiks visas brėžinio keliamas sąlygas. Tai reikalinga tam, kad, vykdant technologines operacijas, būtų aiškus matmenų pasikeitimas. Apibendrinant galima pasakyti, kad parenkant užlaidos dydį bet kokioje technologinėje operacijoje, turi būti laikomasi šios sąlygos:

$$T_A \geq W_A; \tag{1.3.1}$$

kur:

T_A - parinktos užlaidos dydis operacijoje matmeniui A;

W_A - matmens A paklaida, kuri gali atsirasti šioje operacijoje.

Nagrinėjant užlaidų dydžio parinkimo taisykles, būtina išsiaiškinti du atvejus:

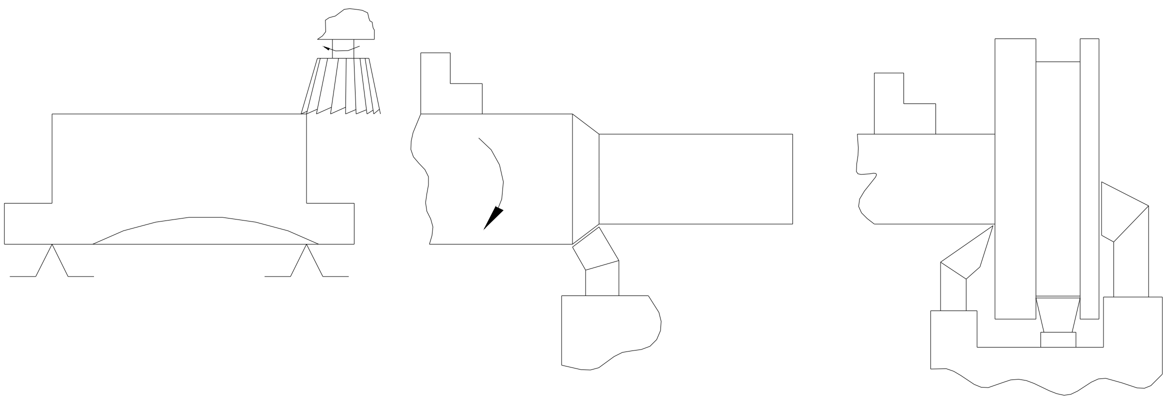
1. $T_A = W_A$. Tai pats paprasčiausias atvejis. Pagal tikslumo lenteles arba pagal techninius žinynus užlaidos dydis lygus paklaidos dydžiui.

2. $T_A > W_A$. Šis atvejis pasitaiko dažniausiai, nes techniškai lengviausiai pasiekiamas.

Plečiant užlaidos dydžio ribas, technologinės operacijos savikaina gali ir mažėti. Tai įvyksta todėl, kad didinami apdirbimo režimai, sugaištama mažiau laiko derinant stakles, trumpesnis įrankio tvirtinimo-derinimo laikas, mažesnė darbininkų kvalifikacija ir t.t., tačiau užlaidos ribų padidinimas kokioje nors operacijoje gali didinti vidurines užlaidas, o tuo pačiu ir ruošinio matmenis bei savikainą.

Tikslumo lentelės sudarytos remiantis duomenimis, gautais realiose gamybos sąlygose. Sudarant šias lenteles, buvo analizuojami duomenys tokių operacijų, kurių nustatymo bazės sutapo su matavimo bazėmis (bazavimo paklaida $\varepsilon_h = 0$) ir kuomet matavimo bazės turėjo minimalias erdvines nuokrypas.

Tačiau ne visais atvejais, projektuojant technologines operacijas, galime užtikrinti tokias sąlygas. Norint išsiaiškinti klausimą, kokį užlaidos dydį parinkti, reikalinga peržiūrėti atskirų operacijų ypatumus, nes sprendimas atskirais atvejais būna skirtingas.

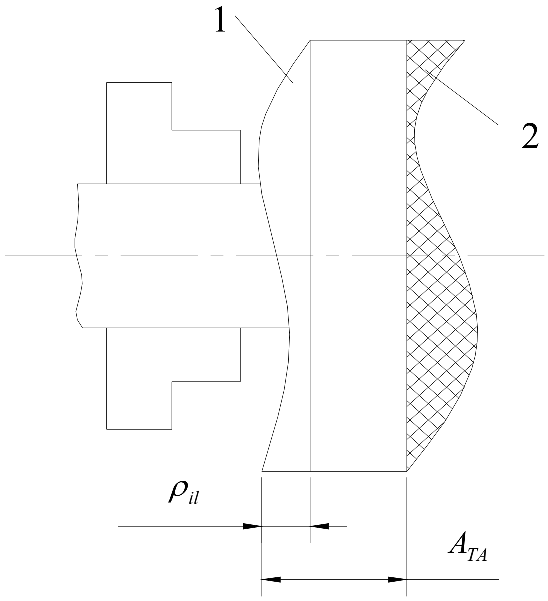


a) b) c)

1.3.1pav. Paviršiaus formavimo būdai staklėse

Pagal paviršiaus formavimo būdą staklėse galima išskirti tris atvejus(1.3.1pav.):

a) neuždaras paviršius, plokščių paviršių formavimas, pvz., frezavimas;
b) uždaras paviršius, apvalių paviršių formavimas, pvz., tekinimas;
c) kombinuoto paviršiaus formavimas, kuomet paviršius suformuojamas per vieną detalės nustatymą.



1.3.2pav. Apdirbamos detalės užlaidos įvertinimas

Panagrinėkime 1.3.2pav. pavaizduotą atvejį. Parengtinėje operacijoje detalė turėjo flanšo įlinkį sūklio atžvilgiu. Tekinimo operacijos metu, apdirbus galinį paviršių 2, flanšo storis bus nepastovaus dydžio, nes atsiranda paklaida (W_A) netikslaus apdirbimo metu. Atsiranda todėl, kad galinis paviršius 1 taip pat turėjo įlinkį ρ_{il} ribose (matavimo bazės erdvinė nuokrypa, kuri atsiranda prieš tai buvusioje operacijoje). Akivaizdu, kad šiuo atveju reikia įvertinti operacinę paklaidą:

$$T_A = W_A + \rho_{il}; \tag{1.3.2}$$

kur: ρ_{il} - matavimo bazės erdvinė nuokrypa.

Nagrinėjant atvejus matyti, kad dydžio ρ_{il} įvertinimas būtinas ne tik apdirbant detales suderintose staklėse, bet ir atliekant bandomuosius praėjimus. Kai kada nustatytam matmeniui užlaida parenkama neįvertinant dydžio ρ_{il}. Tais atvejais, kada nenurodomas dydis ρ_{il}, technologinio proceso apdirbimo maršrute daromos specialios pastabos apie kontrolės metodą.

1.4 Apdirbimo tikslumo didinimo būdai

Būtina atlikti tikslumo analizę, kurios dėka išaiškinamos efektyviausios priemonės atskirų operacijų tikslumui padidinti. Tikslumo analizę galima atlikti ne tik vienos ar dviejų apdirbimo operacijų, bet ir viso apdirbimo proceso.

Technologinio proceso tikslumas nustatomas tokia tvarka:

a) atliekama smulki technologinio proceso visų operacijų ir praėjimų analizė, siekiant išsiaiškinti, kokių gali atsirasti pirminių paklaidų dėl atskirų technologinių veiksnių;
b) pagal normatyvus apskaičiuojamos arba nustatomos suminės bei dedamosios paklaidos, nustatoma jų įtaka tikslumui ir kitoms gaminio charakteristikoms;
c) sumuojamos pirminės paklaidos, siekiant išsiaiškinti kiekvienos apdirbimo operacijos tikslumą;
d) remiantis analizės ir skaičiavimo duomenimis, išsiaiškinama, kokios yra galimybės sumažinti ar pašalinti pirmines paklaidas, ir numatomos priemonės atskirų operacijų tikslumui padidinti.

Vykdomojo technologinio proceso analizę dar galima atlikti ir statistiniais būdais. Sudarius tikslumines-taškines diagramas, galima išsiaiškinti pastovias ir dėsningai kintančias sistemines paklaidas. Tą patį galima išsiaiškinti, palyginus bandinių vidurkių kreives.

Kai įrankį priartinti prie dirbinio arba jį atitraukti naudojama sudėtinga, daug grandžių turinti kinematinė grandinė, susidaro didelės matmenų paklaidos. Dėl sujungimuose esančių tarpelių kiekvieną kartą gaunamas vis kitoks matmuo. Tarpeliams panaikinti tarp sraigto ir veržlės daroma įvarža. Tiksliausi rezultatai gaunami naudojant standžias suporto ar stalo atramas su papildomu hidrauliniu arba kitokiu tų atramų prispaudimu eigos pabaigoje. Tas principas taikomas įvairioms tekinimo šlifavimo staklėms, turinčioms radialinę pastūmą.

Taikant lėtas suportų ir stalų pastūmas mažais intervalais arba tiksliųjų staklių pozicionavimą, dėl tarpelių ir trinties koeficiento keitimosi (ilgiau pastovėjus, iš pradžių trintis esti sausoji) judesys yra netolygus ir trūkčiojantis. Tam reiškiniui išvengti mažinamas trinties koeficientas: taikomos oro pagalvės ir kitos priemonės (panaudojamas suslėgtas oras į kreipiančiąsias – taip išvengiama sausos trinties).

Gana tiksliai apdirbama naudojant standžius įrankius, tokius kaip plėstuvai, gilintuvai skylėms apdirbti, nes čia radialinės pjovimo jėgos veikia priešingomis kryptimis.

Tekinamų, ištekinamų ir šlifuojamų detalių apskritumui pagerinti vietoj sūklio slydimo guolių naudojami preciziniai riedėjimo guoliai, nes jų mažesnis pasipriešinimas trinčiai.

Vienetinėje gamyboje staklės suderinamos kiekvienai detalei atskirai, atliekant bandomuosius perėjimus ir kas kartą pamatuojant bei patikslinant gautą matmenį. Šiuo atveju matmens tikslumas priklauso nuo darbininko kvalifikacijos, nuo pjovimo įrankio nustatymo tikslumo, nuimamo sluoksnio storio. Skylės padėtis, ištekinant ją, priklauso nuo peilio nustatymo tikslumo apdirbamo ruošinio atžvilgiu. Taigi šios paklaidos subjektyvaus pobūdžio. Jų išvengiama, pavedant darbą kvalifikuotam darbuotojui.

Formos nuokrypos ir paklaidos dėl įrankio dilimo gali būti gana didelės – lygios 2 – 3 tikslumo klasės tolerancijoms. Patyręs darbininkas jų išvengia, periodiškai pakoreguodamas pjovimo gylį. Mažoms detalėms šios nuokrypos nesvarbios, nes jų deformacijos labai mažos, o pjovimo gylis kiekvienai detalei nustatomas bandomaisiais praėjimais, matuojant po kiekvieno dalinio praėjimo.

Staklių geometriniai netikslumai turi įtakos formos nuokrypoms, bet ne linijinių matmenų tikslumui, išskyrus koordinatinėmis staklėmis apdirbamų detalių skylių tarpcentrinių atstumų matmenis.

Šiluminės deformacijos vienetinėje gamyboje turi įtaką paviršių formai darbo dienos pradžioje, kol temperatūra sistemoje nenusistovėjusi. Mažoms detalėms, kai mašininiai laikai maži, šios deformacijos ir paklaidos dėl jų nežymios.

Formos paklaidų gali atsirasti ir dėl didelių ruošinio prispaudimo jėgų. Dėl to reikia parinkti įtvirtinimo schemą ir sudaryti kuo mažesnes prispaudimo jėgas, tačiau tokias, kad garantuotų apdirbamos detalės stabilumą. Staklių stovai gali būti drožiami ir neprispausti. Kai pjovimo jėgos nedidelės, pakanka atramos.

Formos paklaidos, apdirbant dideles mašinų detales, dažnai sudaro apie 60% tolerancijos lauko. Tokiais atvejais reikia išsiaiškinti svarbiausias paklaidų priežastis ir jas pašalinti.

Serijinėje ir masinėje gamyboje, kai metmenys gaunami automatiškai, technologinių veiksnių įtaka yra kitokio pobūdžio, negu dirbant bandomųjų praėjimų metodu. Staklės derinamos detalių partijai taip, kad matmuo neišeitų iš tolerancijos ribos δ_A.

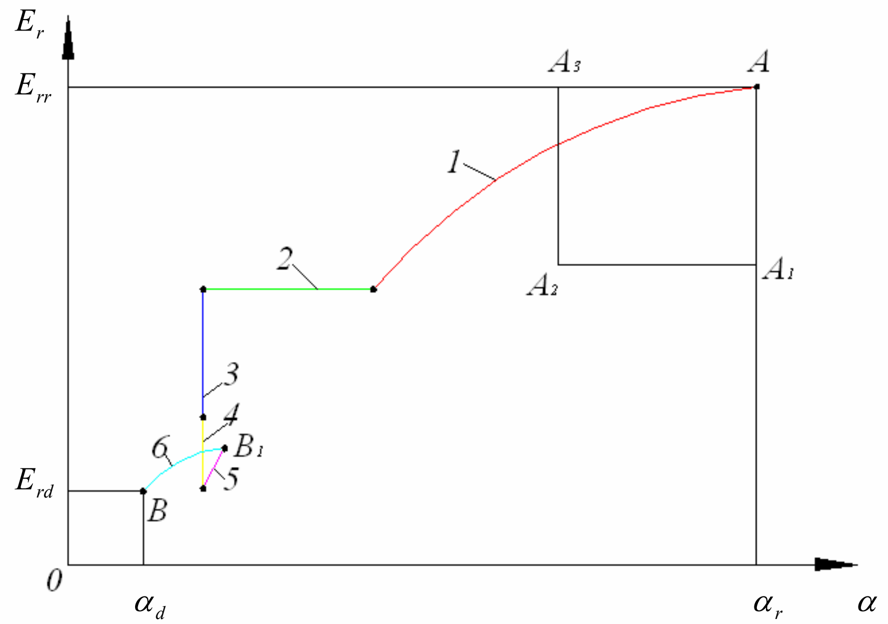
Dirbant su iš anksto suderintomis staklėmis, darbininko įgūdis tikslumui ir kokybei beveik neturi įtakos. Paklaidų gali atsirasti tik suderinant arba perderinant stakles ir tvirtinant ruošinius. Naudojant pneumatines ir automatines prispaudimo priemones, tvirtinimo jėga yra pastovi, todėl išvengiama įtvirtinimo paklaidos svyravimų.

2. Technologinių procesų optimizavimas

2.1 Bendros prielaidos

Technologinis procesas – procesas kai ruošinys apdirbimo metu virsta į užbaigtą detalę. Kiekvienoje stadijoje detalės pusfabrikatis gali būti apibūdintas įvairiomis charakteristikomis – paviršių kiekis, matmeninis, geometrinių formų tikslumas ir tų paviršių šiukštumas, tarpusavio padėties tikslumas, atskirų metalo sluoksnių fizikinės – cheminės savybės.

Kiekvienoje technologinėje operacijoje šių charakteristikų (visų arba dalies) dydžiai keičiasi. Panagrinėkime charakterizuojančius duomenų pasikeitimus dviejose srityse apdirbant krumpliaračio ruošinį su įvalcuotais krumpliais - krumpliaračio krumplių vainiko radialinio mušimo E_r atžvilgiu tvirtinamos kiaurymės ašies ir tvirtinimo kiaurymės cilindriškumo nukrypimas. α .



2.1.1 pav. Krumpliaračio pagaminimo technologinio proceso kreivių grafikas

2.1.1 pav. visas technologinis procesas pavaizduotas kreivėmis, kurios reiškia:

1. Skylės gręžimas.
2. Skylės pratraukimas.
3. Krumplių frezavimas.
4. Krumplių ševingavimas.
5. Terminis apdirbimas.
6. Tvirtinimo skylės šlifavimas.

2.1.1pav. grafiškai pavaizduoti užduoties atlikimas nustatytam terminui, kreivės pradžios taškas žymimas A, atitinkantis blogiausią ruošinį, kreivės pabaigos taškas žymimas B, atitinkantis blogiausią detalę. B gamybos sąlygose ruošinio būseną gali atitikti bet kurį tašką srityje $AA_1A_2A_3$, o detalės turi atitikti bet kurį tašką iš srities $OE_{rd}B\alpha_d$. Užduotis – nustatyti tokią trajektoriją, kuri užtikrintų gamybos procesą ir nepažeistų nė vienos technologinio proceso sąlygos.

Priimtas kokybės rodiklis bus ekstremalaus (didžiausio arba mažiausio) dydžio. Jei uždavinį papildysime dar viena kreive D- tvirtinamos skylės koordinatė, tai, išskyrus matmenų padidėjimas, keičiasi ir pradinės užduoties sąlygos, kaip ir skylės skersmuo ruošinyje. Skylės skersmuo nėra užduotas, todėl tampa pagrindiniu optimizacijos veiksniu.

Kiekvienoje vystymosi srityje, kuri remiasi mokslu ir skaičiavimo metodikomis, visada galime apibendrinti techniškai – ekonominę užduotį, net, jei ir praleidus matematinę dalį, ji atrodo neįgyvendinama arba neracionali. Toks uždavinys gali būti keliamas, kai norime optimizuoti visą technologinį procesą, reikalingą gaminti detalę. Po to galime kelti uždavinį jos konstrukcijoms optimizacijai nustatyti. Kiekviena kreivė 2.1.1pav. charakterizuojama technologinių operacijų rinkiniu, naudojamų technologinių bazių, pjovimo įrankių ir technologine technika, apdirbimo technika.

Optimizacijos uždavinys yra išrinkti patį optimaliausią variantą. Bet ir tai nėra aišku ar tarp mūsų pasirinktų variantų yra tas, kuris užtikrins minimaliausius detalės pagaminimo kaštus.

Ši metodika paremta statistiniais duomenimis, taip pat ekonomišku požiūriu, kaip efektyviai bus apdirbama detalė ant atskirų staklių.

Šie duomenys vaizduoja gamybinės patirties laipsnį, visgi šie duomenys negali tiksliai nusakyti konkrečios detalės ar operacijos naudą.

Technologiniame matmeniniame analizavime didelis dėmesys skiriamas gauti kuo tikslesnius matmenis ir paviršių tarpusavio padėties tikslumą.

Tokie kokybės duomenys, kaip geometrinių formų taisyklingumas, paviršiaus šiurkštumas, fizikinės-cheminės ruošinio charakteristikos, nulemia apdirbimo metodo pasirinkimą.

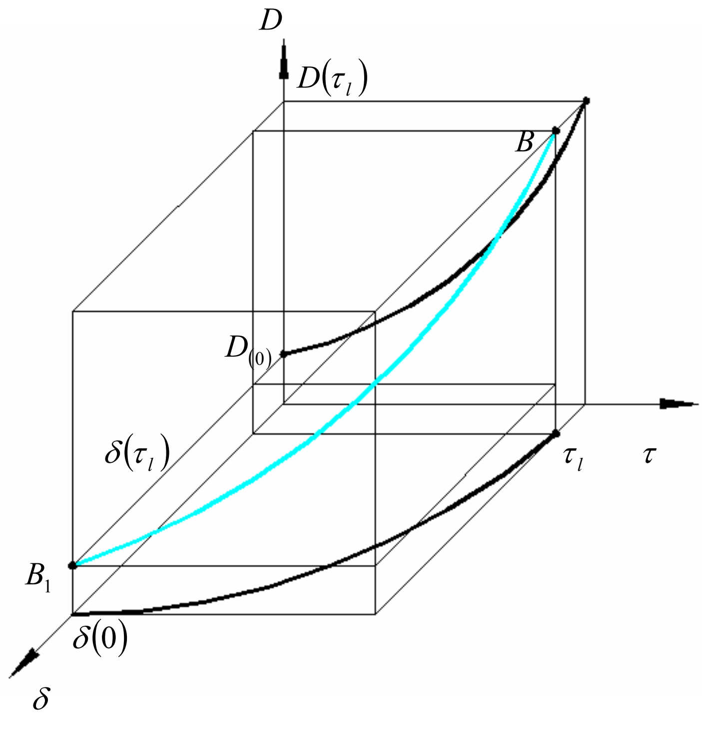
Be to yra žinoma, kad apdirbimo rėžimai ir apdirbamos detalės kokybės rodikliai yra glaudžiai susiję.

Tarkime, kad kreivės (AB) srities ribos pirmiausia išrinktos statistinių duomenų pagrindu (žiūrime į 2.1.1 pav.).

Apskaičiuojant apdirbimo režimo parametrus, instrumento parinkimą ir įrangą kiekvienai operacijai, būtina atsižvelgti į apdirbimo tikslumo reikalavimus. Pavyzdžiui, paskutinėje operacijoje visi parametrai, taip pat ir režimo parametrai, turi būti parenkami taip, kad detalės būvis, kuris yra taške B_1 virstų į B su mažiausiomis žmonių ir technikos sąnaudomis. Be to būvis taške B_1 šioje fazėje gali ir neatrodyti pats geriausias, kaip ir savikaina visų operacijų šiame technologiniame procese. Daug ekonomiškesnis variantas gali būti, kai taškas B_1 labiau nutolęs nuo taško B. Kad galėtume atsakyti į visus šiuos klausimus reikia susidaryti technologinio proceso optimizacijos metodiką. Tokias metodikos sudarymą galime suskirstyti į du etapus. Pirmame etape kokybės parametrų kitimas kiekvienai operacijai atrodo kaip nustatytas, o apdirbimo optimizacijos parametrai neabejotini, apsprendžiantys formos trajektoriją kiekviename pjūvyje. Sudarius šias užduoties metodiką, galime pereiti prie antrojo etapo, kiekvieno technologinio proceso optimalių kokybės parametrų paieškos ir jų suvedimo į tvarkingą sistemą.

2.2. Technologinių procesų optimizacija

Optimizacijų optimizavimo metodiką su užduotom kokybės sąlygom panagrinėkime pavyzdžiu krumpliaračio tvirtinimo skylės šlifavimo operacija, kuri atitinka kreivės atkarpą $B_1\ B$, 2.1.1pav.



2.2.1 pav. Vidinio šlifavimo operacijos kreivė

Truputį pasunkinsim šią užduotį padarę ją labiau realią. Įvedame dar vieną kreivę D - apdirbamos kiaurymės skersmenį. Patogumo dėlei grafinį šios užduoties atvaizdą perkeliame į trimatę erdvę ir sujungiame visas formos nuokrypas, apdirbamo paviršiaus padėties nuokrypas krumpliaračio ašies atžvilgiu į bendrą vaizdą. Tai galime padaryti įvedę sąvoką: apdirbamo paviršiaus spindulio–vektorius, kuris įvestas iš krumpliaračio centro. Spindulio-vektoriaus dydžio svyravimas per vieną ruošinio apsisukimą sujungę šias abi nuokrypas, be to nuokrypų padėtis gamybinėse sąlygose turės didelę reikšmę aiškinantis grupines nuokrypas δ. Suformuluojame šios nagrinėjamos operacijos užduotį. Detalės būsena kiekviename laiko momente τ apibūdinama dvejomis koordinatėmis D(τ) ir $\delta(\tau)$. Galutinis detalės vaizdas užduotas brėžinyje arba technologiniame eskize (jei nagrinėjama operacija nėra galutinė ir neturi įtakos į D ir τ parametrų dydį).

2.2.1 pav. pavaizduotos taške B su koordinatėmis D(τ_l) ir $\delta(\tau_l)$, kur τ_l - apdirbimo laikas. Bendru atveju τ_l neužduotas, bet gali būti ribotas darbo našumu. Pradinė detalės būsena prieš vykdant apdirbimą operacijoje yra užduotas taške B_1 su koordinatėmis D(0) ir δ(0).

Egzistuoja daug kreivių, kurių pagalba detalė iš pradinės būsenos pereina į galutinę, bet reikia parinkti tokią optimalią kreivę, kad ji įvykdytų visus užduotus reikalavimus. Optimizacija neskelbia: įdedamo kapitalo į gamybos procesą dydį, operacijoje naudojamų instrumentų, instrumento kainos, ciklo struktūros, bei apdirbimo režimų parametrų.

Yra žinoma, kad sistemos S Į I D vidinio šlifavimo operacijoje patikimumas bei laiko sąnaudos apdirbimui tokiais režimo parametrais kaip radialinė pastūma, neužtikrina reikalaujamo tikslumo.

Daug efektyvesnis šlifavimo metodas tvirtinimo kiaurymių tokių kaip krumpliaračių , guolių žiedų, yra įpjaunamasis šlifavimas, kuris reguliuojasi pagal radialinės jėgos dydį.

3. Matmenų grandinės

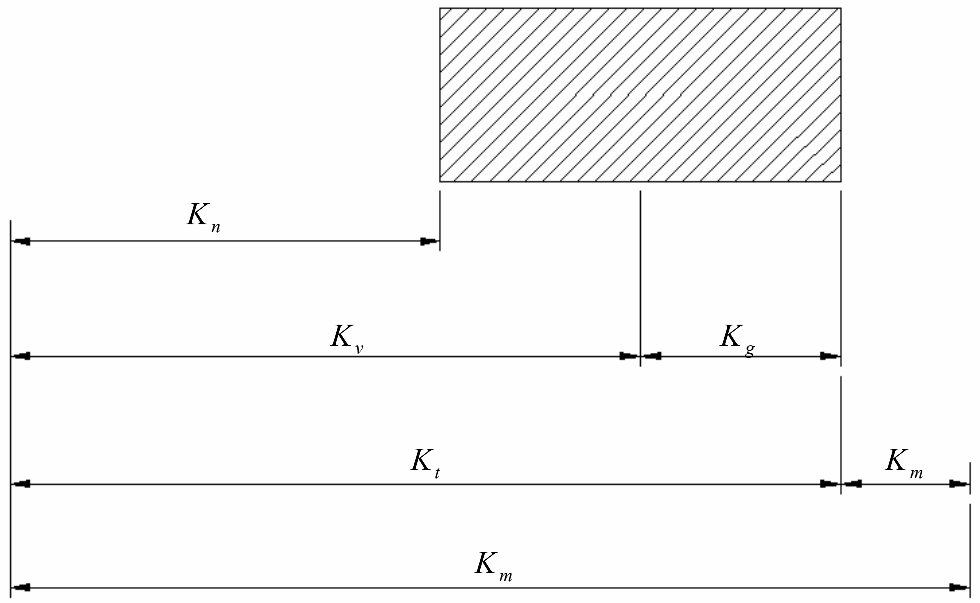
3.1 Matmenų tikslumas

Apdirbant detalę įvairiuose technologiniuose procesuose, jas veikia įvairūs atsitiktiniai faktoriai, kurių dėka atsiranda detalės kokybės rodiklių paklaidos.

Kokią detalę begamintume galutiniame gamybos procese gauname rodiklio dydį, kuris skiriasi nuo mūsų reikalaujamo rodiklio dydžio, be to ir matuojant kokybės rodiklį taip pat išlieka tam tikra paklaida.

Galime išskirti keturias bet kokio rodiklio reikšmių rūšis:

1. Nominali (teorinė) K_n, kurią gauname skaičiavimo metu.
2. Vidurinė K_v reikšmė, kurią norime gauti gamybos procese, tai gali būti nominali, vidurinė ar kitos reikšmės.
3. Tikra, objektyviai egzistuojanti K_t reikšmė, gauta atlikus technologinį procesą.
4. Išmatuota K_m reikšmė, gauta išmatavimų detalę nurodytu tikslumu.



3.1.1 pav.Rodiklio reikšmių žymėjimas

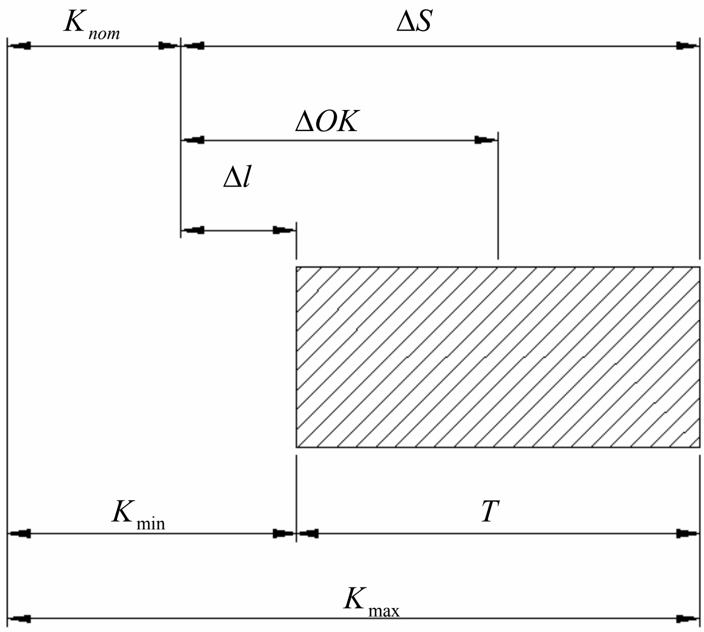
Išmatuoto rodiklio dydžio K_m priartėjimo laipsnis prie tikrojo realaus rodiklio dydžio K_t, vadinamas rodiklio K matavimo tikslumu.

Absoliutaus rodiklio tikslumo pasiekti neįmanoma, nes apdirbant detales besąlygiškai atsiranda paklaidos. Nustatyti rodiklių kitimo intervalai vadinami tolerancijomis.

Detalės kokybės užtikrinimas prasideda jau projektavimo metu ir tęsiasi per visas technologines operacijas, o ne tik išbaigimo metu.

Skaliarinio didžio tolerancijos laukas užduodamas trimis būdais:

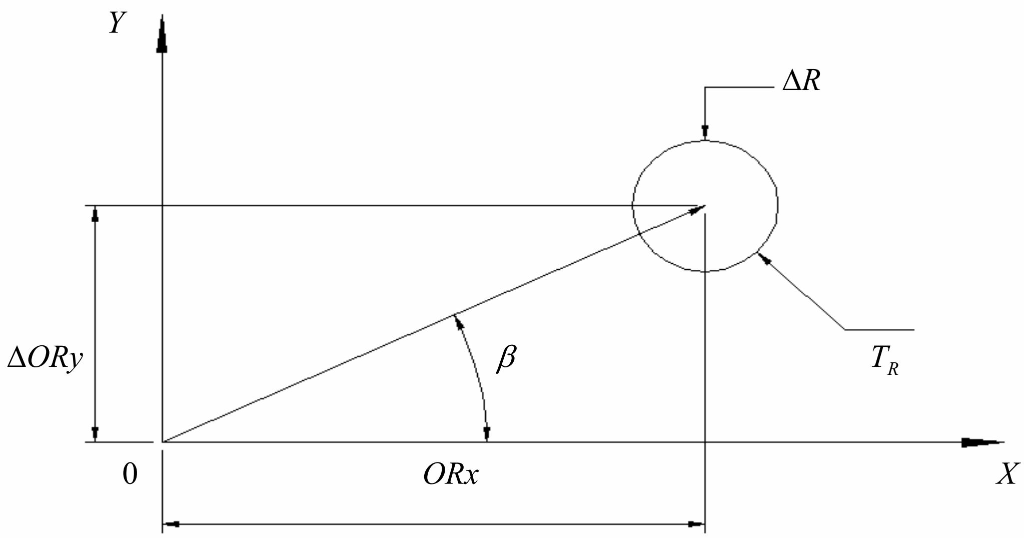
1. rodiklio viršutinė Δ_s ir apatinė nuokrypa Δ_i;
2. tolerancijos lauko T ir jo vidurio koordinate Δ_0;
3. rodiklio maksimalią $K_{\max}$ ir minimalią $K_{\min}$ reikšmę.



3.1.2 pav Skaliarinio lauko tolerancijos

Hodografas – dvimačio vektoriaus dydžio tolerancija, kuri yra užduodama kokia nors geometrine figūra.

Hodografo ribose gali būti atsitiktinio vektoriaus smaigalys. Hodografo formą ir padėtį apsprendžia uždavinys bei pasirinkta koordinačių sistema.



3.1.3 pav Dvimačio vektoriaus dydžio tolerancija

Trijų matavimų vektoriaus paklaidos apibrėžiamos erdvės dalimi, kurios padėtis ir dydis nustatomas tam tikrais dydžiais. Toleranciją galima išplėsti n-matei erdvei. Mašinos detalių rodiklio tikslumas būna dvejopas – reikalaujamas ir faktinis.

Reikalaujamas mašinos detalių rodiklių tikslumas nustatomas mašinos paskirties ir matmenų grandinių uždarančiųjų narių tikslumo siekimo metodu.

Faktinis tikslumas gaunamas kaip atitinkamo apdirbimo proceso rezultatas. Faktinis tikslumas skirstomas į 3 rūšis:

1. rodiklių reikšmės didžiausia max ir mažiausia min nuokrypa;
2. sklaidos lauko dydžio ω_k ir sklaidos lauko vidurio koordinatė $\Delta_{\omega k}$;
3. didžiausia max ir mažiausia min rodiklio reikšmė.

Gaminamų detalių kokybę nulemia tokie faktoriai:

1. Matmenų tikslumas.
2. Paviršiaus geometrinės formos tikslumas.
3. Paviršiaus tarpusavio padėties tikslumas.
4. Paviršiaus glotnumas.

Šie faktoriai tarpusavyje susiję tokiais santykiais: paviršių tarpusavio padėties paklaidų dydis turi būti mažesnis už matmenų paklaidų dydį, bei formos paklaidų dydis turi būti mažesnis už paviršiaus tarpusavio padėties dydį. Jei neišlaikytume tokio dėsningumo, būtų sunku įvertinti aukštesnio rango rodiklio paklaidą.

3.2 Bendros matmenų grandinių žinios

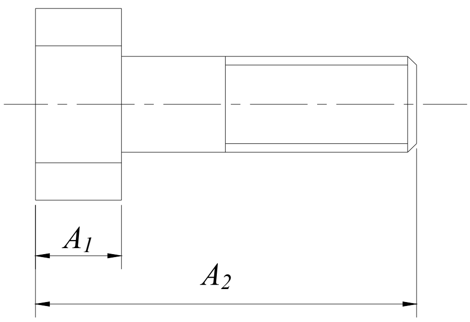
Matmeninis analizavimas technologinių procesų remiasi bendromis matmenų grandinių nuostatomis ir jų skaičiavimo metodais. Matmenų grandinių skaičiavimo metodika gali būti išplečiama iki tos dalies, kai yra keliami klausimai, susiję su matmenų analizavimu technologiniuose procesuose.

Matmenų grandinė vadinama matmenų visuma, kuri betarpiškai dalyvauja sprendžiant nustatytą uždavinį ir sudaro uždarus kontūrus. Tai būtina grandinės sudarymo ir analizės sąlyga. Tačiau brėžiniuose matmenys neturi sudaryti uždaros grandinės: vienas matmuo nenurodomas arba nurodomas kaip informacinis. Priešingu atveju, analizuojant brėžinį,uždarantysis matmuo gali būti palaikytas sudarančiuoju ir apdirbant detalę šį matmenį bus stengiamasi apdirbti nurodytu tikslumu. Taigi nebus pasiekta reikalingo kitų matmenų tikslumo. Grandinės matmenys vadinami grandimis. Grandinėje būna dviejų tipų grandys: dedamosios, gaunamos gaminant detalę ir uždarančiosios, gaunamos pagaminus detalę (detalės matmenų grandinėje) arba surinkus mašinos mazgą (surinkimo grandinėje); pastarųjų dydis priklauso nuo visų likusių grandžių dydžio. Dedamieji nariai yra atitinkami detalių matmenys, o uždarantieji nariai – atstumai tarp skirtingų detalių paviršių. Daugumoje atvejų uždarantieji nariai konstruktorinėse matmenų grandinėse būna tarpeliai tarp dviejų detalių paviršių arba įvaržos dydis.

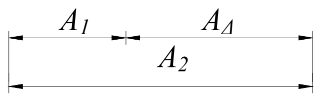
Visos dedamosios grandys žymimos kokia nors viena didžiąją raide su eilės numeriu. Grandžių eilės numeriai pradedami žymėti nuo uždarančiosios grandies pagal laikrodžio rodyklę. Uždarančioji grandis vietoj eilės numerio žymima ženklu Δ.

Matmenų grandinėje dedamosios grandys skirtingai veikia uždarančiąją grandį: jeigu, didėjant dedamajai grandžiai, didėja uždarančioji grandis, tai tokia dedamoji grandis vadinama didinančioji; jeigu, didėjant dedamajai grandžiai, uždarančioji grandis mažėja, tai tokia dedamoji grandis vadinama mažinančioji. Dedamoji grandis, kuri yra didinančioji, žymima rodykle į dešinę $\overrightarrow{A_i}$, o dedamoji grandis, kuri yra mažinančioji, žymima rodykle į kairę $\overleftarrow{A_i}$.

Grafinį grandinės atvaizdavimą priimta vadinti matmenų grandinės schema.



3.2.1 pav. Varžtas



3.2.2 pav. Varžto matmenų grandinė

Paanalizuokime 3.2.2 paveikslėlyje pavaizduoto varžto matmenų grandinę. Varžto strypo ilgis A_Δ, uždarantysis narys. Uždarantysis narys šiuo atveju paskaičiuojamas taip:

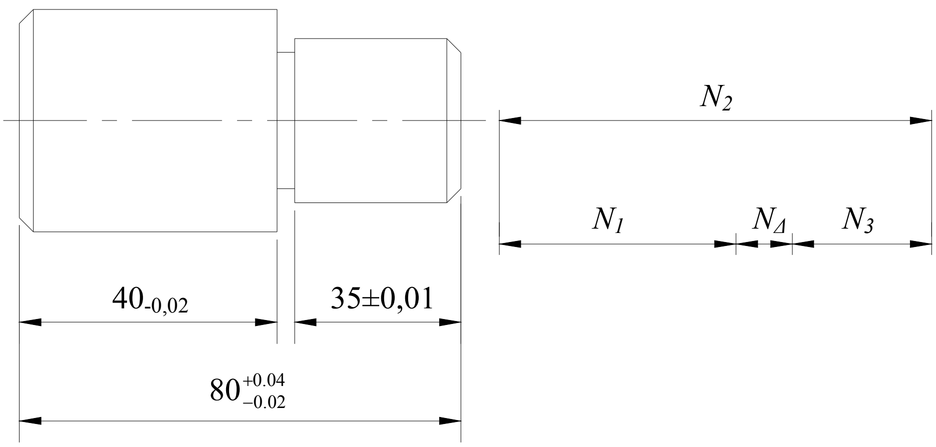
$$A_\Delta = A_2 + A_1 \,. \qquad (3.2.1)$$

Matmenų grandinės pagal vietą gamyboje skirstomos į konstruktorines, technologines ir metrologines.

Konstruktorinės matmenų grandinės pagal vietą gaminyje klasifikuojamos į: atskiros detalės ir surinkimo.

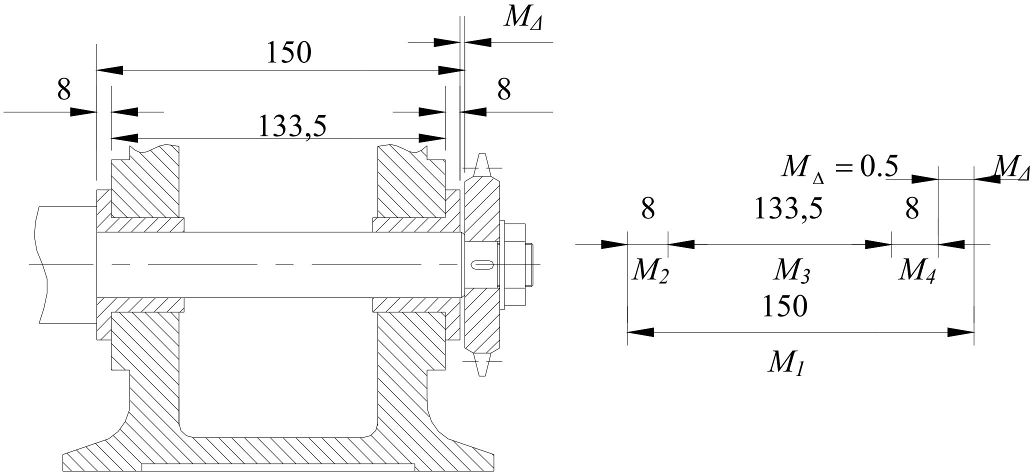
Matmenų grandinės pagal narių išdėstymą skirstomos į:linijines, kampines, plokščias, erdvines.

Matmenų grandinė, nusakanti vienos detalės paviršių tarpusavio padėtį ir tikslumą, vadinama detalės matmenų grandinė.



3.2.3 pav. Detalės linijinė matmenų grandinė

3.2.5pav. Parodyta matmenų grandinė, kur N_1, N_2, N_3 yra dedamieji nariai t.y. kaiščio, didesnio skersmens cilindrinės dalies, mažesnio skersmens cilindrinės dalies, ir viso kaiščio bendro ilgio, matmenys, o N_Δ - uždarantysis narys. N_Δ - tai atstumas tarp kaiščio cilindrinių dalių. Surinkimo brėžinio matmenų grandinė, kurią sudaro skirtingų detalių matmenys, vadinama surinkimo matmenų grandinė.



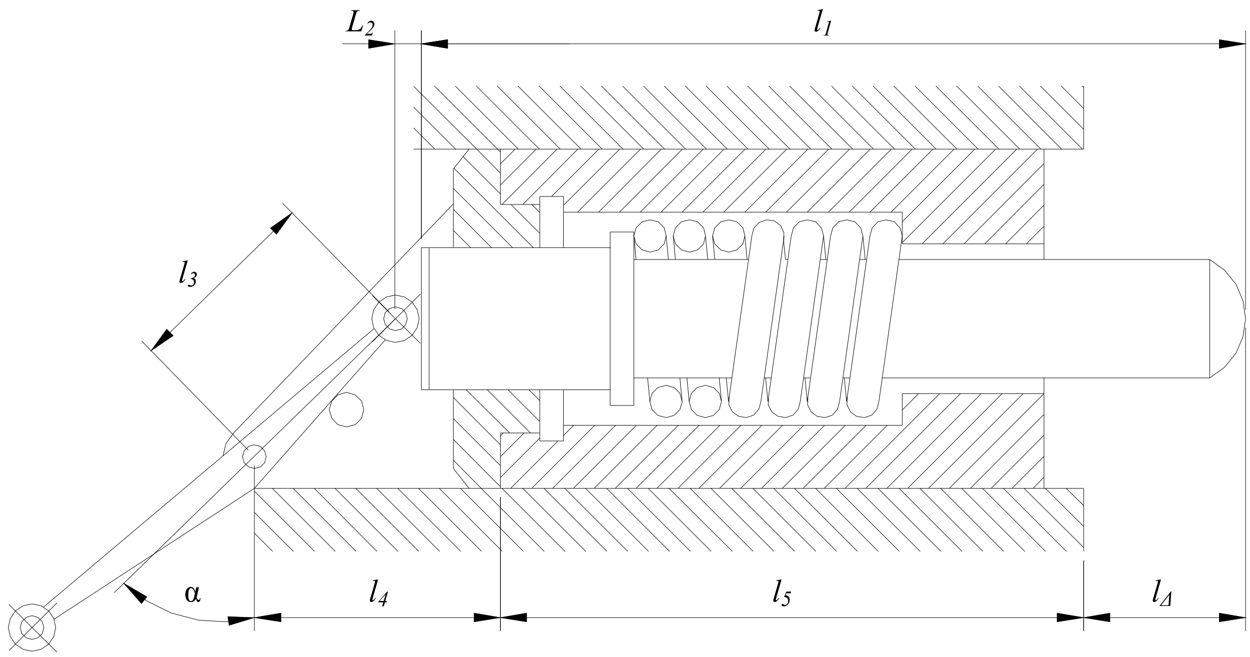
3.2.4pav.Surinkimo linijinė matmenų grandinė

Skaičiuojant konstruktorinę matmenų grandinę, keliamas uždavinys užtikrinti reikiamą tikslumą projektuojant gaminius, skaičiuojant technologinę grandinę – užtikrinti reikiamą tikslumą, gaminant detales ir surenkant mazgus.

Technologinės matmenų grandinės pagal atliekamą užduotį galime išskirti į sistemos SĮID (stovas – įtaisas – instrumentas – detalė) matmenų grandines ir operacines grandines. SĮID sistemos matmenų grandinės naudojamos nustatyti bendrus detalės matmenis, kai technologinei operacijai atlikti yra naudojamas prietaisas ar įrankis. Operacinės matmenų grandinės naudojamos ryšiui nustatyti tarp operacinių matmenų (ar kitiems matmenų parametrams), tolerancijų, užlaidų, visuose technologinio proceso operacijose.

Linijinių matmenų grandinių grandys lygiagrečios, kampinių matmenų grandinių grandys yra kampiniai dydžiai, plokštuminių matmenų grandinių grandys nelygiagrečios ir išdėstytos vienoje arba keliose plokštumose, erdvinių matmenų grandinių grandys išdėstyti nelygiagrečiose plokštumose.

Labiausiai paplitusios linijinės matmenų grandinės. Plokštuminių ir erdvinių matmenų grandinių skaičiavimas sudėtingesnis tuo, kad nelygiagrečias grandis reikia projektuoti į uždarančiosios grandies kryptį.



3.2.5pav. surinkimo plokštuminė matmenų grandinė

Iš 3.2.5 pav. matyti, kad grandies l_3 , kuri su uždarančiosios grandies kryptimi sudaro kampą α, projekcija lygi $l_3 \cos\alpha$.

Pagrindinė matmenų grandinės savybė - tai matmenų kontūro uždarumas ir visų grandžių nuokrypų įtaka bet kuriai grandžiai.

Panagrinėsime šią savybę, remdamiesi matmenų grandine, pavaizduota 3.2.3 pav.:

1.Šios grandinės uždarančiosios grandies nominalinė reikšmė yra lygi didinančiųjų grandžių nominalinių reikšmių sumos skirtumui:

$$N_{\Delta} = N_2 - \left(N_1 - N_3\right) = 80 - \left(40 + 35\right) = 5mm\,. \qquad (3.2.2)$$

2. Uždarančiosios grandies viršutinė nuokrypa (VN) yra lygi didinančiųjų grandžių viršutinių nuokrypų sumos ir mažinančiųjų grandžių apatinių nuokrypų (AN) sumos skirtumui:

$$VN_{\Delta} = VN_2 - \left(AN_1 + AN_3\right) = +0.04 - \left[-0.02 + \left(-0.01\right)\right] = 0.07mm\,. \qquad (3.2.3)$$

3. Uždarančiosios grandies apatinė nuokrypa (AN) yra lygi didinančiųjų grandžių apatinių nuokrypų sumos ir mažinančiųjų grandžių viršutinių nuokrypų sumos skirtumui:

$$AN_{\Delta} = AN_2 - \left(VN_1 + VN_3\right) = -0.02 - \left(0 + 0.01\right) = -0.03mm\,. \qquad (3.2.4)$$

4. Uždarančiosios grandies tolerancija δN_{Δ} yra lygi visų dedamųjų grandžių tolerancijos sumai:

$$\delta N_{\Delta} = AN_2 - \left(VN_1 + VN_3\right) = -0.02 - \left(0 + 0.01\right) = -0.03mm\,. \qquad (3.2.5)$$

Palyginkime gautą tolerancijų sumą su uždarančiosios grandies, kurios nominalinė reikšmė lygi 5mm, tolerancija:

$$VN_{\Delta} = +0.07mm\,,\quad AN_{\Delta} = -0.03mm\,,\ \text{o tolerancija}\quad \delta N_{\Delta} = 0.1mm\,. \qquad (3.2.6)$$

Skaičiuojant matmenų grandines, numatyti penki matmenų grandinių skaičiavimo būdai: visiško pakeičiamumo metodas, pagrįstas maksimumo-minimumo skaičiavimu; dalinio pakeičiamumo metodas, taikant tikimybių teoriją; reguliavimo arba kompensatorių metodas; grupinio pakeičiamumo metodas, panaudojant selektyvinį surinkimą ir pritaikymo metodas.

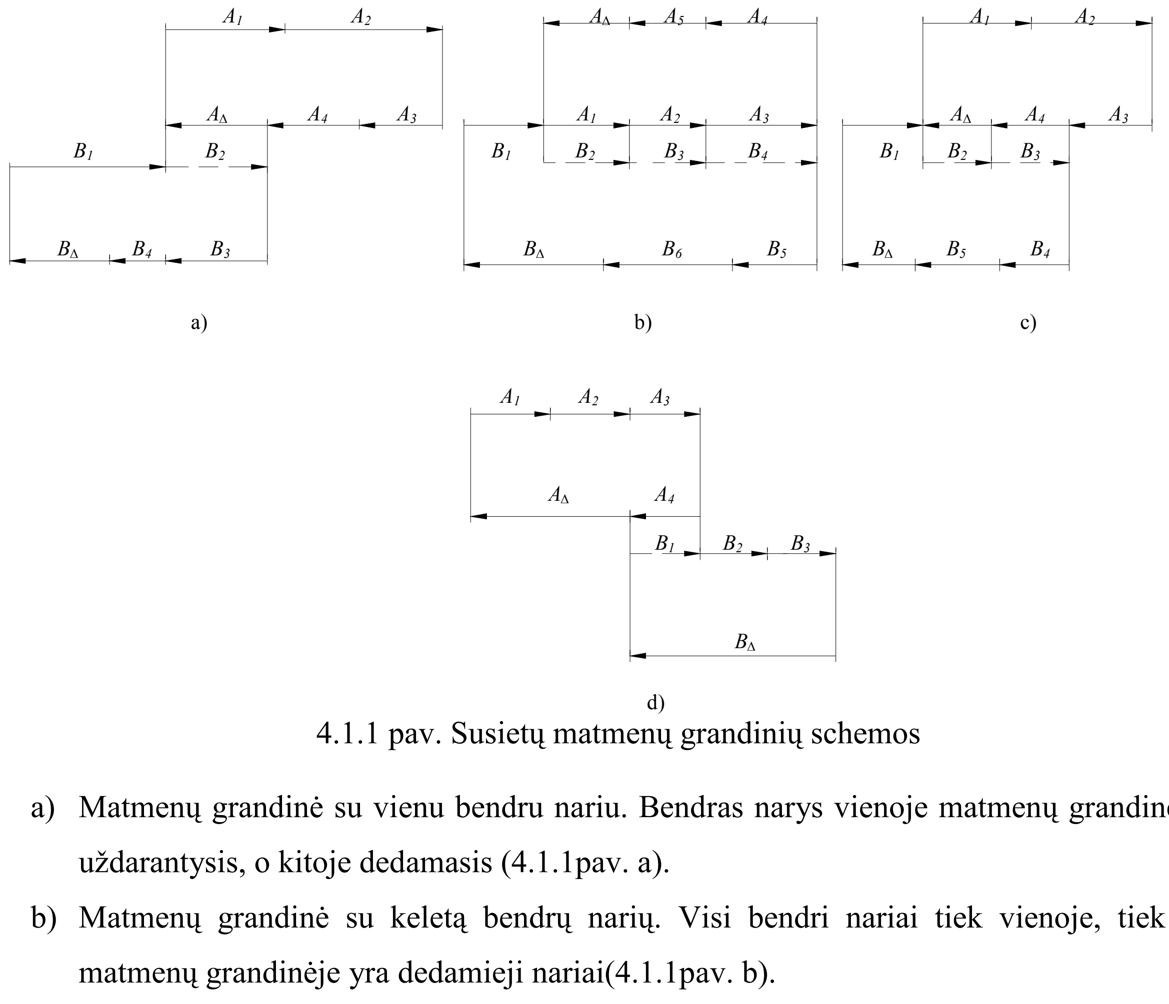
4. Optimalių tolerancijų skaičiavimas nesusietose matmenų grandinėse

4.1 Susietų ir nesusietų matmenų grandinių apibendrinimas

Nagrinėjant kokio nors gaminio ar detalių apdirbimo technologinio proceso tikslumą, susiduriame su matmenų ar paklaidų grandinėmis. Surinkimo matmenų grandinės dažniausiai būna nesusietos (4.1.1pav.), kada visi sudaromieji nariai įeina į vieną matmenų grandinę. Matmenų grandinės, kurios susidaro apdirbant detales, būna susietos, kada atskiri nariai įeina į dvi, tris ir daugiau matmenų grandinių.

Optimalių tolerancijų skaičiavimui, kai yra nesusietos matmenų grandinės, galima panaudoti paprastesnį metodą, negu tuo atveju, kai matmenų grandinės yra susietos. Tačiau kartais šį paprastesnį skaičiavimo metodą galima panaudoti ir susietoms matmenų grandinėms.

Išanalizuojame atskirus susietų matmenų grandinių variantus.



4.1.1 pav. Susietų matmenų grandinių schemos

a) Matmenų grandinė su vienu bendru nariu. Bendras narys vienoje matmenų grandinėje yra uždarantysis, o kitoje dedamasis (4.1.1pav. a).
b) Matmenų grandinė su keletą bendrų narių. Visi bendri nariai tiek vienoje, tiek kitoje matmenų grandinėje yra dedamieji nariai(4.1.1pav. b).
c) Matmenų grandinė su keletu bendrų narių, vienas iš bendrų narių vienoje grandinėje yra uždarantysis, o kitoje dedamasis narys (4.1.1pav. c).

d) Matmenų grandinė su vienu bendru nariu. Bendras narys vienoje ir kitoje matmenų grandinėje yra dedamasis narys (4.1.1pav.d).

a) variante nurodyta susieta matmenų grandinė sprendžiama paprastai kaip ir nesusieta matmenų grandinė.

Tik pirmoje eilėje skaičiuojama matmenų grandinė, kurioje yra uždarantysis narys A_Δ. Priimame, kad uždarantysis narys A_Δ yra pastovus dydis, išsprendę šią matmenų grandinę grįžtame prie antrosios. Kadangi dedamojo nario B_2 reikšmė yra lygiai tokia pati kaip ir pirmosios metmenų grandinės uždarantysis narys A_Δ, tai sprendimas vyksta analogiškai, tik dedamasis narys B_2 bus fiksuotas.

4.2 Optimalių tolerancijų skaičiavimas

Nustatant optimalias tolerancijų reikšmes kaip optimalumo kriterijų panaudosime apdirbimo savikainą. Optimalios tolerancijų reikšmės bus tuomet, kai detalių pagaminimo savikaina bus mažiausia. Kaip išeities duomenys yra kvadratinė tolerancijų lygtis ir tikslumo funkcija, t.y. hiperbolinė savikainos priklausomybė nuo tolerancijos dydžio. Šio uždavinio sprendimui panaudosime nuoseklios paieškos metodą.

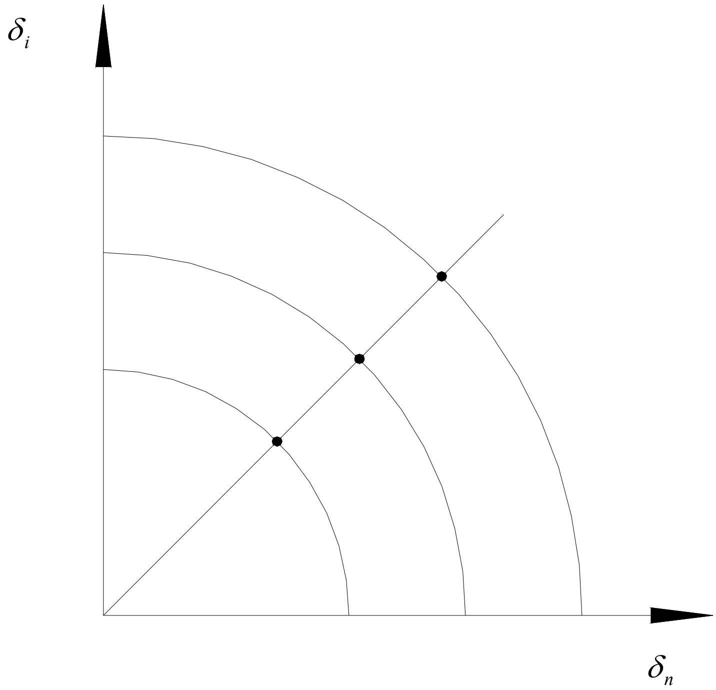
Sprendimo metu nuosekliai nustatomi tolerancijų optimalūs santykiai. Jeigu tolerancijų grandinėje iš eilės tolerancijas pažymėsime $\delta_1, \delta_2, ..., \delta_n$, tai optimalūs santykiai nustatomi panaudojant vieną toleranciją, pavyzdžiui δ_n. Tuomet gaunami tokie santykiai:

$$\frac{\delta_1}{\delta_n} = \frac{a}{b}, \frac{\delta_2}{\delta_n} = \frac{c}{d}, ..., \frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \frac{u}{v}; \qquad (4.2.1)$$

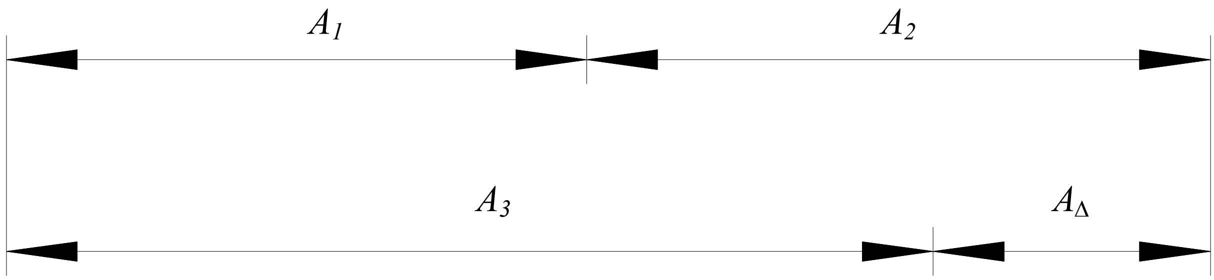
Dviejų tolerancijų reikšmės, kai jų santykis optimalus, yra tokios, kad apdirbimo savikaina, priklausanti nuo šių tolerancijų, bus mažiausia.

Įstatę lygtis (4.2.1) į tolerancijų grandinę, gauname lygybę su vienu nežinomuoju δ_n ir nustatome jo optimalę reikšmę. Pagal formules (4.2.1) surandame kitų tolerancijų optimalias reikšmes.

Reikia pažymėti, kad dviejų tolerancijų optimalūs santykiai, esant lygties dešinės pusės įvairioms reikšmėms, išsidėstę pagal tiesę, einančią per koordinačių pradžią (4.2.1pav.).



4.2.1 pav. Tolerancijų optimalių santykių reikšmės, esant įvairiems apribojimams



4.2.2 pav. Keturių narių matmenų grandinė

Priimame, kad tolerancijų grandinė susideda iš keturių narių:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_2^2 \cdot \delta_2^2 + k_3^2 \cdot \delta_3^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2\,; \qquad (4.2.2)$$

Optimalius santykius išreiškiame per toleranciją δ_3. Iš pradžių nustatome optimalų santykį $\frac{\delta_1}{\delta_3}$.

Tuo tikslu nežinomąjį δ_2 priimame pastovų. Jo reikšmė gali svyruoti intervale $\delta_{1\min} - \delta_{1\max}$ esant sąlygai, kad $k_2^2 \cdot \delta_2^2 < k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2$. Pažymime šį dydį *d* ir įstatome į lygtį (4.2.2):

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_3^2 \delta_3^2 = k_\Sigma^2 \delta_\Sigma^2 - d; \qquad (4.2.3)$$

Lygties (4.2.3) dešinėje pusėje gali būti bet koks teigiamas skaičius.

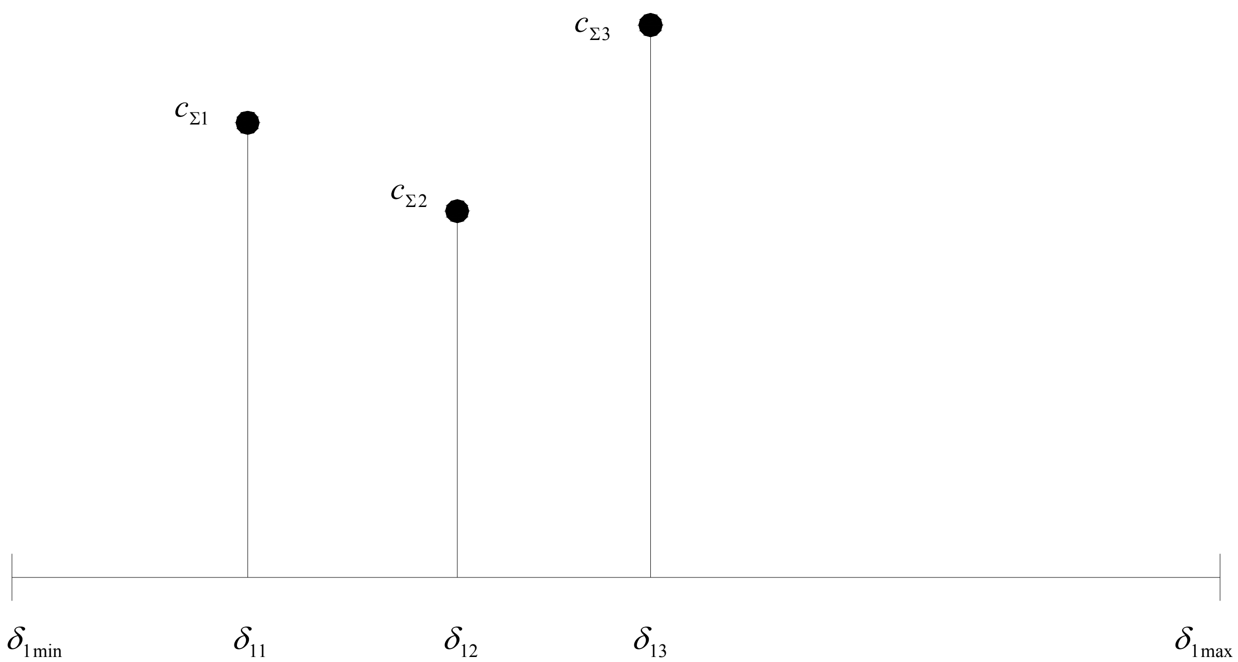
Priimame, kad nežinomųjų δ_1 ir δ_3 reikšmių porai surandama sumarinė savikaina. Priimame tokią savikainos ir tolerancijos priklausomybę:

$$c = a + \frac{b}{\delta}; \tag{4.2.4}$$

Sumarinė savikaina yra lygi:

$$c_{\Sigma i} = c_{1i} + c_{2i} = a_1 + \frac{b_1}{\delta_1} + a_3 + \frac{b_3}{\delta_3}; \tag{4.2.5}$$

Iš 4.2.3 pav. matome, kad sumarinė savikaina buvo paskaičiuota trims δ_1 ir δ_3 poroms. Priimame, kad mažiausia savikaina yra $c_{\Sigma 2}$. Tuomet optimali δ_1 reikšmė yra intervale $\delta_{11} - \delta_{13}$, kuris vadinamas neapibrėžtumo intervalu. Tokiu būdu, suteikiant nežinomajam δ_1 įvairias



4.2.3pav. Optimalaus δ_1 ir δ_3 santykio paieškos schema

reikšmes, neapibrėžtumo intervalą galima sumažinti iki norimo dydžio.
Priimame, kad gautos δ_1 ir δ_3 reikšmės yra atitinkamai *g* ir *h*. Tuomet santykis

$$\frac{\delta_1}{\delta_3} = \frac{g}{h}; \qquad (4.2.6)$$

yra optimalus ir jo reikšmė nesikeičia iki galutinio uždavinio sprendimo.

Toliau analogišku būdu nustatomas nežinomųjų δ_2 ir δ_3 optimalus santykis. Tuo tikslu nežinomasis δ_1 fiksuojamas dydžiu iš intervalo $\delta_{1\min} - \delta_{1\max}$ su sąlyga, kad $k_1^2 \cdot \delta_1^2 \le k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2$. Priimame, kad $k_1^2 \cdot \delta_1^2 = a$. Tuomet paskaičiuojamos δ_2 ir δ_3 reikšmės, kurioms esant savikaina bus mažiausia. Pažymime δ_2 ir δ_3 reikšmes atitinkamai *j* ir *l*. Šių nežinomųjų optimalus santykis yra:

$$\frac{\delta_2}{\delta_3} = \frac{j}{l}; \qquad (4.2.7)$$

Toliau nežinomieji δ_1 ir δ_2, išreikšti per δ_3, įstatomi į (4.2.2) lygtį:

$$\delta_1 = \delta_3 \cdot \frac{g}{h}; \; \delta_2 = \delta_3 \cdot \frac{j}{l}; \qquad (4.2.8)$$

$$\delta_3^2 \cdot \left(k_1^2 \cdot \frac{g^2}{h^2} + k_2^2 \cdot \frac{j^2}{l^2} + k_3^2 \right) = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \qquad (4.2.9)$$

Pagal šią formulę paskaičiuojama optimali tolerancijos δ_3 reikšmė, o optimalios δ_1 ir δ_2 reikšmės surandamos iš santykių (4.2.6) ir (4.2.7).
Išnagrinėsime šio uždavinio sprendimą bendru atveju, kai yra *n* nežinomųjų. Duota tolerancijų lygtis:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_2^2 \cdot \delta_2^2 + ... + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \qquad (4.2.10)$$

Iš pradžių nustatome nežinomųjų δ_1 ir δ_n optimalius santykius. Tuo tikslu nežinomuosius $\delta_2, \delta_3, ..., \delta_{n-1}$ fiksuojame tam tikru dydžiu nuo $\delta_{i\min}$ iki $\delta_{i\max}$ bei žymime raide w su salygą, kad

$$k_2^2 \cdot \delta_2^2 + k_3^2 \cdot \delta_3^2 + ... + k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 = w < k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \tag{4.2.11}$$

Nustatome optimalų santykį δ_1, kurį išreiškiame per δ_n:

$$\frac{\delta_1}{\delta_n} = \frac{d}{f}; \delta_1 = \delta_n \cdot \frac{d}{f}; \tag{4.2.12}$$

Norint nustatyti šį santykį, tolerancijai δ_1 suteikiamos įvairios reikšmės iš intervalo $\delta_{i\min} - \delta_{i\max}$, o δ_n paskaičiuojama pagal formulę:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w; \tag{4.2.13}$$

Nustatome δ_2 ir δ_n optimalų santykį. Nežinomuosius $\delta_1, \delta_3, \delta_{n-1}$ fiksuojame dydžiu w_1:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_3^2 \cdot \delta_3^2 + ... + k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 = w_1 < k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \tag{4.2.14}$$

Nustatome optimalų santykį δ_2, kurį išreiškiame per δ_n:

$$\frac{\delta_2}{\delta_n} = \frac{c}{g}; \delta_2 = \delta_n \cdot \frac{c}{g}; \tag{4.2.15}$$

Tolerancijos δ_2 suteikiame įvairias reikšmes iš intervalo $\delta_{i\min} - \delta_{i\max}$ o δ_n paskaičiuojame:

$$k_2^2 \cdot \delta_2^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_1; \tag{4.2.16}$$

Ieškome δ_3 ir δ_n optimalų santykį. Nežinomuosius $\delta_1, \delta_2, \delta_{n-1}$ fiksuojame dydžiu w_2:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_2^2 \cdot \delta_2^2 + ... + k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 = w_2 < k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \tag{4.2.17}$$

Nustatome optimalų santykį δ_3, kurį išreiškiame per δ_n:

$$\frac{\delta_3}{\delta_n} = \frac{e}{h}; \delta_3 = \delta_n \cdot \frac{e}{h}; \tag{4.2.18}$$

Tolerancijai δ_{n-1} suteikiame įvairias reikšmes iš intervalo $\delta_{i\min} - \delta_{i\max}$, o δ_n paskaičiuojame:

$$k_3^2 \cdot \delta_3^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_2; \tag{4.2.19}$$

Sudarome δ_{n-1} ir δ_n optimalų santykį, o nežinomuosius $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ fiksuojame dydžiu w_3:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_2^2 \cdot \delta_2^2 + k_3^2 \cdot \delta_3^2 = w_3 < k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \tag{4.2.20}$$

Nustatome optimalų santykį δ_{n-1}, kurį išreiškiame per δ_n:

$$\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \frac{u}{v}; \delta_{n-1} = \delta_n \cdot \frac{u}{v}; \tag{4.2.21}$$

Tolerancijai δ_{n-1} suteikiame įvairias reikšmes iš intervalo $\delta_{i\min} - \delta_{i\max}$, o δ_n paskaičiuojame:

$$k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_3; \tag{4.2.22}$$

Nežinomuosius $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ išreikštus per δ_n, įstatome į (4.2.9) lygtį:

$$k_1^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \frac{d^2}{f^2} + k_2^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \frac{c^2}{g^2} + k_3^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \frac{e^2}{h^2} + ... + k_n^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \frac{u^2}{v^2} = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \tag{4.2.23}$$

Sutvarkome (4.2.23) lygtį, iškeldami δ_n prieš skliaustus:

$$\delta_n^2 \cdot \left(k_1^2 \cdot \frac{d^2}{f^2} + k_2^2 \cdot \frac{c^2}{g^2} + k_3^2 \cdot \frac{e^2}{h^2} + ... + k_n^2 \cdot \frac{u^2}{v^2} \right) = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \tag{4.2.24}$$

δ_n išreiškiame per kvadratinę lygtį:

$$\delta_n = \sqrt{\frac{k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2}{k_1^2 \cdot \frac{d^2}{f^2} + k_2^2 \cdot \frac{c^2}{g^2} + k_3^2 \cdot \frac{e^2}{h^2} + ... + k_n^2 \cdot \frac{u^2}{v^2}}}. \tag{4.2.25}$$

4.3 Optimalių tolerancijų skaičiavimo ypatumai

Jeigu uždavinio sąlygoje nurodyta maža uždaromojo nario tolerancija, tai kai kurių dedamųjų narių tolerancijos gali išeiti iš leistinų ribų $\delta_{\min}$. Skaičiuojant tolerancijų optimalius santykius tai leistina, nes vėliau šie dydžiai koreguojami. Jeigu galutinės tolerancijų reikšmės gaunasi mažesnės už $\delta_{\min}$, tai reikalingas papildomas skaičiavimas. Pagal šį požymį galima išskirti tris atvejus:

1. Už $\delta_{\min}$ ribos išeina bet kuri (kurios) tolerancijos, išskyrus δ_n,
2. Už $\delta_{\min}$ ribos išeina nežinomasis δ_n,
3. Už $\delta_{\min}$ ribos išeina nežinomasis δ_n ir vienas ar keletas sudaromųjų narių δ_i.

1. Atvejis

Pirmojo atvejo sprendimui sudarome lygtį, kurią naudosime tolimesniame skaičiavime:

$$k_{k+1}^2 \cdot \delta_{k+1}^2 + k_{k+2}^2 \cdot \delta_{k+2}^2 + ... + k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - k_1^2 \cdot \delta_{1\min}^2 - k_2^2 \cdot \delta_{2\min}^2 - ... - k_k^2 \cdot \delta_{k\min}^2; \quad (4.3.1.)$$

Priimame, kad už $\delta_{\min}$ ribos išeina k nežinomųjų: $\delta_1, \delta_2, ..., \delta_k$.

Tuomet šios tolerancijos fiksuojamos tam tikrais dydžiais w:

$$\delta_{1\min} + \delta_{2\min} + ... + \delta_{k\min} = w_1; \quad (4.3.2)$$

Įstatę šį dydį į lygtį (4.3.1) , gauname:

$$k_{k+1}^2 \cdot \delta_{k+1}^2 + k_{k+2}^2 \cdot \delta_{k+2}^2 + ... + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_1; \quad (4.3.3)$$

Dabar reikia nustatyti δ_{k+1} iš δ_n optimalų santykį. Tuo tikslu tolerancijoms δ_{k+2}, $\delta_{k+3}, ..., \delta_{n-1}$ suteikiame minimalias reikšmes:

$$k_{k+2}^2 \cdot \delta_{k+2}^2 + k_{k+3}^2 \cdot \delta_{k+3}^2 + ... + k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 = w_2; \quad (4.3.4)$$

Šią išraišką įstatome į lygtį (4.3.3) gauname:

$$k_{k+1}^2 \cdot \delta_{k+1}^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_1 - w_2; \quad (4.3.5)$$

Tolerancijai δ_{k+1} suteikiame įvairias reikšmes intervale $\delta_{k+1\min} - \delta_{k+1\max}$ ir paskaičiuojame δ_n reikšmę iš lygties (4.3.5). Turime šias dvi reikšmes, paskaičiuojame sumarinę savikainą:

$$s_\Sigma = a_{k+1} + \frac{b_{k+1}}{\delta_{k+1}} + a_n + \frac{b_n}{\delta_n}; \quad (4.3.6)$$

Toliau tolerancijai δ_{k+1} suteikdami įvairias reikšmes surandame mažiausią sumarinę savikainą. Gauname tolerancijų δ_{k+1} iš δ_n optimalų santykį:

$$\frac{\delta_{k+1}}{\delta_n} = \frac{u}{v}; \quad \delta_{k+1} = \delta_n \frac{u}{v}; \tag{4.3.7}$$

Suradę δ_{k+1} iš δ_n optimalų santykį, ieškome tolerancijos δ_{k+2} iš δ_n optimalaus santykio. Tuomet priimame:

$$k_{k+1}^2 \cdot \delta_{k+1}^2 + k_{k+3}^2 \cdot \delta_{k+3}^2 + \ldots + k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 = w_3; \tag{4.3.8}$$

Įstatę šią išraišką į lygtį (4.3.3) gauname:

$$k_{k+2}^2 \cdot \delta_{k+2}^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_1 - w_3; \tag{4.3.9}$$

Dabar panašiai kaip ir anksčiau suteikiame δ_{k+2} įvairias reikšmes intervale $\delta_{k+2\min} - \delta_{k+2\max}$, paskaičiuojamas iš lygties (4.3.9) δ_n reikšmes ir kiekvienai δ_{k+2} iš δ_n porai surandame sumarinę savikainą. Iš gautų tolerancijų porų parenkame tą, kur gaunama mažiausia savikaina. Priimame tokį tolerancijų δ_{k+1} iš δ_n optimalų santykį:

$$\frac{\delta_{k+2}}{\delta_n} = \frac{t}{s}; \quad \delta_{k+2} = \delta_n \frac{t}{s}; \tag{4.3.10}$$

Suradę δ_{k+1} iš δ_n ir δ_{k+2} iš δ_n optimalius santykius, ieškome tolerancijos δ_{k+3} iš δ_n optimalaus santykio. Tuomet priimame:

$$k_{k+1}^2 \cdot \delta_{k+1}^2 + k_{k+2}^2 \cdot \delta_{k+2}^2 + \ldots + k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 = w_4; \tag{4.3.11}$$

Įstatę šią išraišką į lygtį (4.3.3) gauname:

$$k_{k+3}^2 \cdot \delta_{k+3}^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_1 - w_4; \tag{4.3.12}$$

$$\frac{\delta_{k+3}}{\delta_n} = \frac{l}{h}, \qquad \delta_{k+3} = \delta_n \frac{l}{h} \tag{4.3.13}$$

Kai suradome $\delta_{k+1}, \delta_{k+2}, \delta_{k+3}$, iš δ_n optimalius santykius, ieškome paskutinio δ_{n-1} iš δ_n. Atliekame tokius veiksmus:

$$k_{k+1}^2 \cdot \delta_{k+1}^2 + k_{k+2}^2 \cdot \delta_{k+2}^2 + k_3^2 \cdot \delta_3^2 + ... + k_n^2 \delta_n^2 = w_5; \tag{4.3.14}$$

Įstatę šią išraišką į lygtį (4.3.3) gauname:

$$k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_1 - w_5; \tag{4.315}$$

$$\frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \frac{m}{n}, \quad \delta_{n-1} = \delta_n \frac{m}{n} \tag{4.3.16}$$

Atliekame paskutinius uždavinio sprendimo etapus, visus $\delta_{k+1}, \delta_{k+2}, \delta_{k+3}$, δ_{n-1} iš δ_n optimalius santykius statome į (4.3.1) lygtį. Tuomet gauname:

$$\begin{aligned} & k_{k+1}^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \frac{u^2}{v^2} + k_{k+2}^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} + k_{k+3}^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \frac{l^2}{h^2} + ... + k_{n-1}^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \frac{m^2}{n^2} + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = \\ & = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - k_1^2 \cdot \delta_{1\min}^2 - k_2^2 \cdot \delta_{2\min}^2 - ... - k_k^2 \cdot \delta_{k\min}^2; \end{aligned} \tag{4.3.17}$$

Pertvarkome (4.3.17) lygtį, iškeldami δ_n prieš skliaustus:

$$\delta_n^2 \left(k_{k+1}^2 \cdot \frac{u^2}{v^2} + k_{k+2}^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} + k_{k+3}^2 \cdot \frac{l^2}{h^2} + ... + k_{n-1}^2 \cdot \frac{m^2}{n^2} + k_n^2 \right) = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - k_1^2 \cdot \delta_{1\min}^2 - k_2^2 \cdot \delta_{2\min}^2 - ... - k_k^2 \cdot \delta_{k\min}^2; \tag{4.3.18}$$

δ_n išreiškiame per kvadratinę šaknį:

$$\delta_n = \sqrt{\frac{k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - k_1^2 \delta_{1\min}^2 - k_2^2 \cdot \delta_{2\min}^2 - ... - k_k^2 \cdot \delta_{k\min}^2}{k_{k+1}^2 \cdot \frac{u^2}{v^2} + k_{k+2}^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} + k_{k+3}^2 \cdot \frac{l^2}{h^2} + ... + k_{n-1}^2 \cdot \frac{m^2}{n^2} + k_n^2}}; \tag{4.3.19}$$

2. Atvejis

Antru atveju reikia nustatyti naujus optimalius tolerancijų santykius su δ_{n-1}, jeigu δ_{n-1} reikšmė neišeina iš $\delta_{n-1\min}$ ribos. Tuo tikslu tolerancija δ_n išreiškiama iš paskutinio santykio ir įstatoma į kitus santykius:

Antrajam atvejui spręsti sudarome lygtį kurią, naudosime tolimesniame skaičiavime:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_2^2 \cdot \delta_2^2 + \ldots + k_n^2 \cdot \delta_{n\min}^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \tag{4.3.20}$$

Priimame, kad už $\delta_{n\min}$ ribos išeina δ_n nežinomasis.

Tuo atveju tolerancija fiksuojama dydžiu w_1:

$$\delta_{n\min} = w_1; \tag{4.3.21}$$

Statome šią išraišką į (4.3.20) lygtį:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_2^2 \cdot \delta_2^2 + \ldots + k_{n-1}^2 \cdot \delta_{n-1}^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - w_1; \tag{4.3.22}$$

Sekantis veiksmas yra nustatyti δ_1, δ_2, δ_{n-1} optimalius santykius iš δ_n:

$$\delta_1 = \delta_n \cdot \frac{d}{f}; \quad \delta_2 = \delta_n \cdot \frac{m}{n}; \quad \delta_{n-1} = \delta_n \cdot \frac{s}{t}; \qquad (4.3.23);(4.3.24);(4.3.25)$$

Kadangi tolerancija δ_n išeina už $\delta_{\min}$ ribos, šiuos optimalius santykius (4.3.23), (4.3.24), (4.3.25) išreiškiame per δ_{n-1}, nes δ_{n-1} tolerancija paskutinė, kuri neišeina už $\delta_{\min}$ ribos.

$$\delta_{n-1} = \delta_n \cdot \frac{s}{t}; \tag{4.3.26}$$

$$\delta_n = \delta_{n-1} \cdot \frac{t}{s}; \tag{4.3.27}$$

Šia išraišką (4.3.27) statome į δ_1 (4.3.23), δ_2 (4.3.24) optimalius santykius, tuo tikslu, kad gautume optimalius santykius, išreikštus per δ_{n-1}:

$$\delta_1 = \delta_{n-1} \cdot \frac{t}{s} \cdot \frac{d}{f}; \quad \delta_2 = \delta_{n-1} \cdot \frac{t}{s} \cdot \frac{m}{n}; \qquad (4.3.28);(4.3.29)$$

Gautus δ_1, δ_2 optimalius santykius statome į (4.3.22) lygtį:

$$k_1^2 \cdot \delta_{n-1}^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} \cdot \frac{d^2}{f^2} + k_2^2 \cdot \delta_{n-1}^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} \cdot \frac{m^2}{n^2} + ... = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - k_n^2 \cdot \delta_{n\min}^2; \tag{4.3.30}$$

δ_{n-1} keliame prieš skliaustus:

$$\delta_{n-1}^2 \cdot \left(k_1^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} \cdot \frac{d^2}{f^2} + k_2^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} \cdot \frac{m^2}{n^2} + ... \right) = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - k_n^2 \cdot \delta_{n\min}^2; \tag{4.3.31}$$

δ_{n-1} išreiškiame per kvadratinę lygtį:

$$\delta_{n-1} = \sqrt{\frac{k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2 - k_n^2 \cdot \delta_{n\min}^2}{k_1^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} \cdot \frac{d^2}{f^2} + k_2^2 \cdot \frac{t^2}{s^2} \cdot \frac{m^2}{n^2} + ...}}; \tag{4.3.32}$$

3 Atvejis

Trečiu atveju uždavinys sprendžiamas analogiškai kaip ir antru atveju. Parenkamas naujas nežinomasis, pagal kurį nustatomos optimalios tolerancijų reikšmės. Tokiu nežinomuoju gali būti bet kuri iš likusių tolerancijų. Paskui pagal ( ) formulę paskaičiuojama šios priimtos tolearancijos reikšmės. Iš dešinės lygties pusės atimamos visos tolerancijos, kurios išėjo už $\delta_{i\min}$ ribos.

Panašiai kaip ir pirmuose dviejose atvejuose turime tokią bendrą tolerancijų lygtį:

$$k_1^2 \cdot \delta_1^2 + k_2^2 \cdot \delta_2^2 + ... + k_j^2 \cdot \delta_j^2 + k_{j+1}^2 \cdot \delta_{j+1}^2 + ... + k_k^2 \cdot \delta_k^2 + ... + k_n^2 \cdot \delta_n^2 = k_\Sigma^2 \cdot \delta_\Sigma^2; \tag{4.3.33}$$

Nustatome optimalius tolerancijų santykius:

$$\frac{\delta_1}{\delta_n} = \frac{d}{f}; \ \frac{\delta_2}{\delta_n} = \frac{m}{n}; \ ...; \ \frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \frac{s}{t}; \tag{4.3.34}$$

Priimame, kad už leistinos minimalios ribos išeina šios tolerancijos: δ_j, $\delta_{j+1},...,\delta_k$, ir δ_n.

Išreiškiame δ_n per δ_{n-1} ir įstatome į kitus tolerancijų santykius:

$$\delta_n = \delta_{n-1}\frac{t}{s}; \tag{4.3.35}$$

$$\frac{\delta_1}{\delta_n} = \frac{d}{f}; \; \delta_1 = \delta_{n-1}\frac{t}{s}\cdot\frac{d}{f}; \tag{4.3.36}$$

$$\frac{\delta_2}{\delta_n} = \frac{m}{n}; \; \delta_2 = \delta_{n-1}\frac{t}{s}\cdot\frac{m}{n}; \tag{4.3.37}$$

....

Priimame, kad už $\delta_{\min}$ ribos išeina $\delta_j, \delta_{j+1},...,\delta_k$ ir δ_n tolerancijos, tuomet jas perkeliame į dešinę lygties pusę ir pažymime dydžiu w_2:

$$k_j^2\cdot\delta_j^2 - k_{j+1}^2\cdot\delta_{j+1}^2 - ... - k_k^2\cdot\delta_k^2 - k_n^2\cdot\delta_n^2 = w_2; \tag{4.3.38}$$

4.3.36, 4.3.37, 4.3.38 lygtis statome į 4.3.33, gauname:

$$k_1^2\cdot\delta_{n-1}^2\cdot\frac{t^2}{s^2}\cdot\frac{d^2}{f^2} + k_2^2\cdot\delta_{n-1}^2\cdot\frac{t^2}{s^2}\cdot\frac{m^2}{n^2} + ... + k_{n-1}^2\cdot\delta_{n-1}^2 = k_\Sigma^2\cdot\delta_\Sigma^2 - w_2; \tag{4.3.39}$$

Išreiškiame δ_{n-1}:

$$\delta_{n-1}^2\cdot\left(k_1^2\cdot\frac{t^2}{s^2}\cdot\frac{d^2}{f^2} + k_2^2\cdot\frac{t^2}{s^2}\cdot\frac{m^2}{n^2} + ... + k_{n-1}^2\right) = k_\Sigma^2\cdot\delta_\Sigma^2 - w_2; \tag{4.3.40}$$

$$\delta_{n-1} = \sqrt{\frac{k_\Sigma^2\cdot\delta_\Sigma^2 - w_2}{k_1^2\cdot\frac{t^2}{s^2}\cdot\frac{d^2}{f^2} + k_2^2\cdot\frac{t^2}{s^2}\cdot\frac{m^2}{n^2} + ... + k_{n-1}^2}}; \tag{4.3.41}$$

Toliau iš lygčių 4.3.36, 4.3.37 surandame kitų tolerancijų reikšmes.

4.4 Optimalių tolerancijų paieškos optimizacija

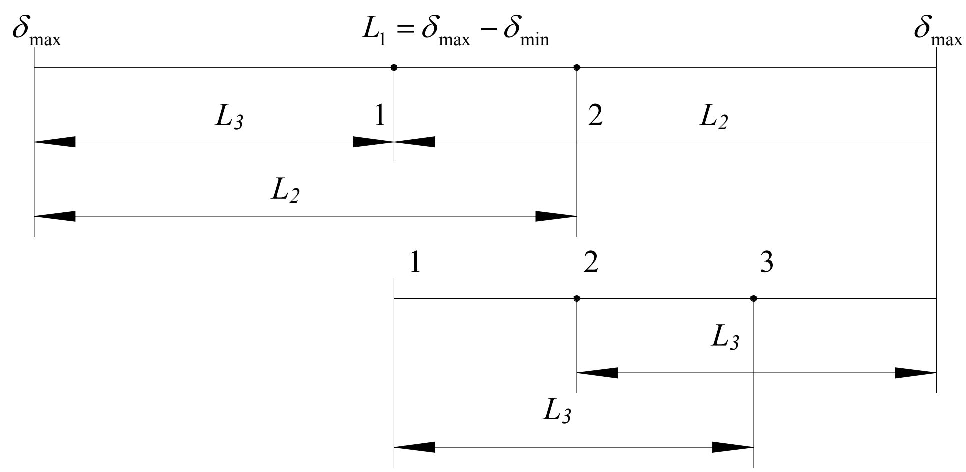
Sprendžiant optimalių tolerancijų suradimo uždavinį, iškyla problema, kokias priimti tolerancijų reikšmes, kad būtų kuo greičiau surandama mažiausia suminė savikaina. Kadangi nežinomieji yra tolydiniai dydžiai, galima panaudoti efektyvų Fibonači metodą . Tuo tikslu pirmiausiai priimamas galutinio neapibrėžtumo intervalo dydis **a** ir mažiausia poslinkio reikšmė ε. Galutinis neapibrėžtumo intervalas priimamas atsižvelgiant į tai, kokiu tikslumu norime nustatyti tolerancijos reikšmę. Dydį ε galima priimti lygų pusei galutinio intervalo **a** $:\varepsilon = 0.5a$. Toliau nustatomas eksperimentų kiekis. Eksperimentu laikome suteikimą tolerancijai tam tikrą dydį ir savikainos skaičiavimą. Pradinio tolerancijos intervalo dydis lygus $\delta_{\max} - \delta_{\min}$. Surandame pradinio intervalo sumažinimo dydį:

$$\lambda = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{a - 0.4 \cdot \varepsilon} = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{0.8a}; \qquad (4.4.1)$$

Pagal paskaičiuotą dydį λ iš lentelės nustatomas eksperimentinis kiekis *n*. Toliau nustatomas tikslus tolerancijos galutinio intervalo dydis pagal formulę:

$$\lambda = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{F_n} + \frac{F_{n-2}}{F_n} \varepsilon; \qquad (4.4.2)$$

čia F_n – *n* Fibonači skaičius, nustatomas iš lentelės pagal eksperimentų kiekį .



4.4.1pav. Optimalus eksperimentų išdėstymas

Eksperimentų kiekis	$\lambda(F)$
0	1
1	1
2	2
3	3
4	5
5	8
6	13
7	21
8	34
9	55
10	89
11	144
12	233
13	377
14	610
15	987

4.4.1 Optimalaus eksperimentų kiekio santykio su Fibonači skaičiumi lentelė

Toliau ieškome optimalaus eksperimento išdėstymo. Pirmo intervalo ilgis lygus:

$$L_1 = \delta_{max} - \delta_{min}\,; \tag{4.4.3}$$

Sekantys intervalai nustatomi pagal formulę:

$$L_j = L_{n-k} = F_{k+1} \cdot L_n - F_{k-1} \cdot \varepsilon\,; \tag{4.4.4}$$

čia $j = n - k$ - eksperimento eilės numeris.

Dydžiai F_{k+1} ir F_{k-1} randami iš eilės. Tokiu būdu antro intervalo dydis lygus:

$$L_2 = F_{n-1}L_n - F_{n-3} \cdot \varepsilon\,; \tag{4.4.5}$$

Pagal formulę (4.4.4) nustatomi paeiliui visi neapibrėžtumo intervalai iki L_n.

Dabar išsamiau išanalizuojame, kaip nustatomas konkretus nežinomojo dydis atliekant eksperimentus. Paskaičiuotą dydį L_2 atidedame nuo abiejų intervalo kraštų ir gauname taškus 1 ir

2. Šiuose taškuose atliekame pirmus du eksperimentus. Atsižvelgiant į tai , kokiame taške 1 ar 2 gauname mažesnė suminė savikaina, nustatomas tolimesnis eksperimento intervalas, kuris bus lygus $(1-\delta_{\max})$ arba $(2-\delta_{\min})$. Priimame, kad mažesnė savikainos reikšmė buvo gauta taške 2 ir gauname naują neapibrėžtumo intervalą $(1-\delta_{\max})$. Taške 2 eksperimentas jau atliktas. Dabar nuo taško 1 atidedame ilgį L_3 ir gauname naują simetrinį taškų 2 ir 3 išsidėstymą. Ir šiuo atveju, atsižvelgiant į eksperimento rezultatą, tolimesnis paieškos intervalas bus $(2-\delta_{\max})$ arba 3 - 1. taip palaipsniui atliekame eksperimentus, kol gauname galutinį intervalą. Kaip matyti iš 4.4.1 lentelės intervalo dydis mažėja labai greitai.

IŠVADOS

1. Apdirbant detales metalo pjovimo staklėmis atsiranda įvairios matmenų paklaidos.
2. Optimalių tolerancijų santykių sudarymas padeda nuspręsti apie gaminio savikaina .
3. Greičiausiai surandama mažiausia suminė savikaina panaudojant efektyvų Fibonači metodą.

LTERATŪRA:

1. В.В. Матвев; М.М. Тваской; Ф.И. Бойков; Ю.И. Свиридов; Д.Л. Блюменкранц 1982m. „Размерный анализ технологических процесов“ – Москва, Мошиностроение.
2. Г.М. Ганевский; И.И. Голдин 1999m. „Допуски, посадки и технологические измерения в мошиностроении“. – Москва.
3. A. Žuravliovas; 1980m. „Tolerancijos ir techniniai matavimai“ – Vilnius, Mokslas.
4. Б.Я. Курицкий; 1989m. “Оптимизация вокруг нас“ – Ленинград.
5. A. Vaičiūnas; 1991m. „Matmenų grandinių skaičiavimas“ – Kaunas, Technologija.

PAVEIKSLŲ TURINYS:

PRIEDAI