

PRIMJENA CAD TEHNOLOGIJA I MKE METODA KAO PRILOG ANALIZI TOLERANCIJA

APPLICATION OF CAD TECHNOLOGIES AND FEM AS A CONTRIBUTION TO TOLERANCE ANALYSIS APPROACH

Nermina Zaimović-Uzunović, prof. dr.
Mašinski fakultet, Zenica

Almir Uzunović, Dipl. Ing. (Univ)
Erlangen

REZIME

Današnji razvoj složenih industrijskih proizvoda je nezamisliv bez upotrebe CAD (Računarom podržan dizajn) i MKE (Metod konačnih elemenata) tehnologija. Tokom proizvodnje i eksploatacije proizvoda neizbježne su deformacije dijelova proizvoda, koje se u nekim slučajevima mogu odraziti na njegovu funkcionalnost. Simulacije putem metoda konačnih elemenatamogu dati precizne podatke o defomaciji strukture. Međutim, rezultat MKE proračuna je dat u vidu pomjeranja diskretnih tačaka strukture (čvorova), što ga u originalnom obliku čini nepogodnim za analizu tolerancija shodno DIN ISO EN 1101 i DIN ISO EN 5459 normama. U ovom radu prikazan je pristup analizi tolerancija upotrebom CAD i MKE sistema. Date su smjernice daljnjeg razvoja Computer Aided Tolerance Analysis sistema.

Ključne riječi: Tolerancije oblika i položaja, CAD, MKE

ABSTRACT

Development of modern industrial products is unthinkable without the usage of CAD (Computer Aided Design) and FEM (Finite Element Method) technologies. During the product life deformations of product's parts occur which can influence it's functionality. FEM simulations offer clear insight in deformation of structure. However, results of FEM computations are given in form of displacement of discrete points (nodes), which makes them initially unsuitable for tolerance analysis according to DIN ISO EN 1101 and DIN ISO EN 5459 norms. In this paper the CAD and FEM approach to tolerance analysis is presented. Directions of future development of Computer Aided Tolerance Analysis systems are given.

Keywords: Tolerances of form and position, CAD, FEM

1. UVOD

1.1. Motivacija

Svaka obrada radnog komada uzrokuje odstupanje od nazivnog oblika, dimenzija, položaja ili kvaliteta površine istog dijela. Klasična teorija tolerancija pretpostavlja tolerisanje krutih tijela, međutim bezbrojni uticaji u kasnijem životnom vijeku proizvoda uzrokuju odstupanja od oblika, položaja ili stanja površine proizvoda. Statička, dinamička i toplotna opterećenja uzrokuju deformaciju strukture; trenje i trošenje uzrokuje promjenu kvaliteta površina dijelova. Stoga osnovu uspješnog tolerisanja dijelova predstavlja tačno poznavanje načina na koji vanjska opterećenja djeluju na proizvod.

Dodatni problem predstavljaju složeni oblici današnjih proizvoda, pa je analiza njihovih odstupanja od nazivnih mjera nemoguća bez upotrebe računarskih metoda. Nepostojanje adekvatnih softvera za analizu tolerancija elastičnih dijelova usložnjava ovu situaciju. Problemi tolerancija i osiguranja kvaliteta proizvoda nisu isključivo vezani za fazu konstruisanja, već se proširuju i na proizvodnju, montažu i eksploataciju proizvoda.

Razvoj savremenih kompleksnih proizvoda gotovo je nemoguć bez upotrebe CAD tehnologija. Putem inženjerskih simulacija generalno je moguće vrlo precizno utvrditi uticaj vanjskih opterećenja na dijelove i sklopove. Kombinujući CAD i MKE tehnologije, konstruktor bi već pri konstruisanju proizvoda trebao biti u mogućnosti simulirati uticaj vanjskih opterećenja na odstupanje tolerisanih dijelova od nazivnih mjera i tolerancija. Neki od problema koji bi se na ovaj način mogli analizirati uključuju: kako će vanjska opterećenja uticati na odstupanje dijelova od zadatih tolerancija, kako će varijacija tolerancija uticati na naponsko stanje konstrukcije (npr. kod presovanih sklopova), kako će različiti proizvodni procesi zajedno sa vanjskim opterećenjima uticati na stanje tolerancija. Time bi bila stvorena osnova uspješne sinteze tolerancija, odnosno racionalne alokacije tolerancija pojedinim dijelovima.

Međutim, rezultat MKE simulacija dat je u obliku pomjerenja diskretnih tačaka strukture (čvorova) što ovu metodu inicijalno čini nepogodnom za analizu tolerancija, shodno DIN ISO EN 1101 [1] i DIN ISO EN 5459 [2] normama. Tretirajući rezultat MKE simulacije kao oblak tačaka, upotrebom metoda i alata koordinatne metrologije moguća je analiza tolerancija dijelova i sklopova već u fazi konstrukcije proizvoda.

Moguće rješenje problema analize tolerancije deformabilnih dijelova u fazi konstrukcije sastoji se u povezivanju CAD i MKE sistema u *Computer Aided Tolerance Analysis* (CAT) sistem, kao neizbježnog dijela industrijskog *Product Data Management* (PDM) sistema.

1.2. Tolerancije

DIN ISO EN 1101:2006 [1] norma predviđa 14 vrsta tolerancija oblika i položaja, koje su podijeljene u četiri grupe. Tolerancije oblika i položaja definisane su putem tolerancijskih zona, odnosno graničnih odstupanja unutar kojih se realni i ispravan dio mora nalaziti. Tolerantna zona omeđena je jednom idealnom površinom odnosno krivom ili njihovim parom. Tolerancije forme (izuzetak su neki slučajevi tolerancija profila) ne zahtijevaju referentne elemente, dok su tolerancije položaja date uz pomoć jednog, dva ili tri hijerarhijski povezana referentna elementa. Granične površine tolerancijskih zona i njihovi referentni elementi predstavljaju idealizaciju realne geometrije dijela (zamjenu realne geometrije substitucionim elementima), a određuju se mjerenjem realnog dijela prema nekom od propisanih evaluacionih kriterija. Ovaj proces je virtualni anologon kontroli realnih dijelova, npr. putem koordinatnih mjernih mašina.

Izbor referentnih elemenata je propisan DIN ISO EN 5459:1982 [2] normom. U proizvodnim mjerenjima i kontroli proizvoda uobičajena je, zavisno od funkcije kontrolisanog dijela, upotreba evaluacionih kriterija kao što su kriterij najmanjeg opisanog kruga, kriterij najvećeg upisanog kruga, kriterij najmanje zone (kriterij Čebiševa), te kriterij srednjeg odnosno Gaussovog elementa.

2. PREGLED STANJA NA TRŽIŠTU CAT ALATA

Razvoj modernih CAD paketa se kreće u smjeru stvaranja robusnih okruženja koje objedinjuju *modeler*, modul za analizu struktura putem MKE, CAM module i u nekim slučajevima module ili samostalne programe za analizu tolerancija. Prva generacija CAD paketa posjeduje tzv. neinteligentne mogućnosti analize tolerancija, odnosno mogućnost unosa i prikaza tolerancijskih simbola i vrijednosti bez mogućnosti ikakve dodatne analize tolerancija. Iako ovi simboli jasno prikazuju namjeru konstruktora, njihova uloga u analizi tolerancija je veoma ograničena. Druga generacija CAT softvera, npr. CAD paket Pro/ENGINEER® [6] firme PTC®, posjeduje osnovne mogućnosti analize tolerancija krutih dijelova. Kod ovih softvera svakoj dimenziji odnosno *feature*-u je moguće dodijeliti informaciju o vrsti tolerancije, kao i o veličini tolerantne zone. Međutim ovi softveri ne uzimaju u obzir deformaciju dijelova usljed djelovanja vanjskih opterećenja, proizvodnih procesa ili montaže.

Treću generaciju CAT softvera predvode paketi VIS VSA® [6] firme UGS® i Delmia® firme Dassault Systemes [7]. Zajedno sa MKE *solver*-om, oni omogućuju analizu uticaja deformacije dijela na odstupanje od zadatih tolerancija. Ove vrijednosti je putem Monte Carlo analize moguće superponirati uticajima proizvodnih procesa na odstupanje od zadatih tolerancija. Nažalost, ni jedan od nabrojanih programa ne nudi mogućnost integracije u PDM sistem baziran na otvorenim standardima. S obzirom da se radi o zatvorenom kodu, nisu poznati algoritmi korišteni za određivanje supstitucionih elemenata, kao ni njihova preciznost ili nesigurnost, što otežava integraciju ovih softvera u lanac upravljanja kvalitetom.

3. MOGUĆNOSTI POVEZIVANJA CAD I MKE ALATA U CAT SISTEM

U radu Merkley-a [10] navedena su sa stanovišta matematičkih modela tri moguća pristupa određivanju supstitucionih elemenata: *offset solids*, *feasibility space* i *parameter space*. Svi pomenuti modeli omogućuju analizu složenih tolerancija isključivo krutih sklopova.

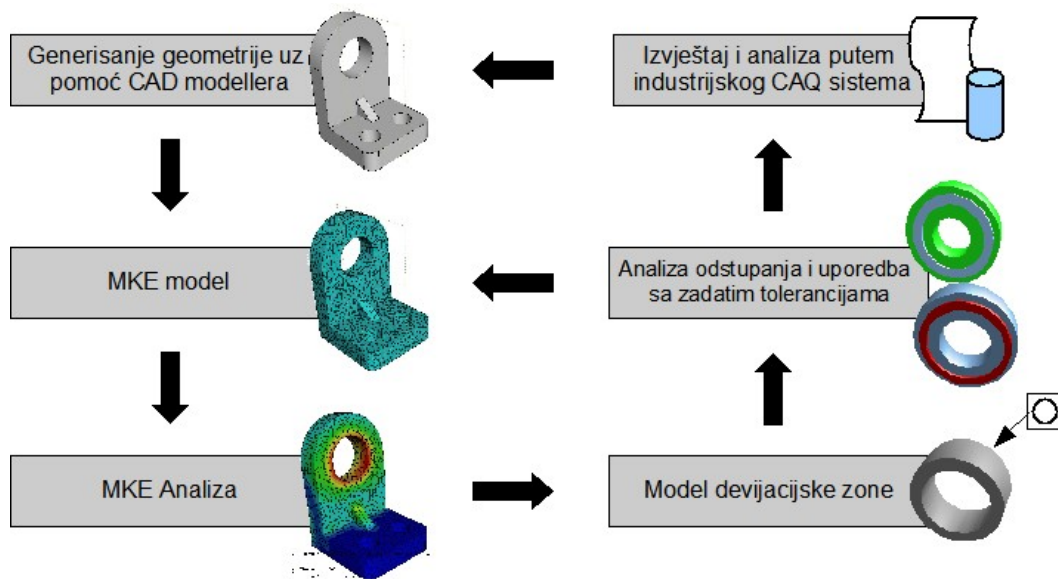
Analiza fleksibilnih dijelova, uz upotrebu MKE je moguća uz substrukturiranje MKE matrice krutosti, odnosno formiranje super-elemenata. Pri ovom pristupu jedan super-element formalno odgovara jednom dijelu u sklopu. Na ovaj način se broj stepeni slobode u matrici krutosti elemenata reducira samo na one stepene slobode koji su prisutni u sklopu. Takođe pretpostavljaju se linearni elementi, jer su deformacije strukture male u odnosu na dimenzije modela.

Predstavljanje pomjerenih paralelnih (*offset*) elemenata u CAD programima je u slučaju prostih tijela (*primitives*) i parametarskih površina trivijalno. U slučaju proizvoljnih krivih (*Splines*, *B-Splines*, *NURBS*) ili površina, odnosno kod tolerancija profila, određivanje paralelne krive se obavlja putem *Medial axis transformation* ili *Closest point transform* algoritama [10, 11].

Da bi se rezultat MKE proračuna izrazio „jezikom tolerancija“ deformisanu konfiguraciju je potrebno zamijeniti (idealizovati) odgovarajućim supstitucionim elementima. Tako se kroz oblak tačaka može provući mnogo elemenata, ali samo jedan element, odnosno jedan par elemenata predstavlja optimalno rješenje. Proces uklapanja (engl. *fitting*) supstitucionih elemenata u oblak čvorova realne konfiguracije je u biti proces optimizacije. Pri tome se traži neka objektivna funkcija, npr. kvadrat srednje udaljenosti čvora od supstitucionog elementa, pri njenoj istovremenoj minimizaciji. U zavisnosti od broja referentnih elemenata moguće je uprošćenje optimizacijskog algoritma.

Mogućnosti gotovo svih modernih CAD sistema mogu se proširiti putem makro-programa napisanih u nekom od programskih jezika. Na primjer CAD paket Pro/ENGINEER® [6] firme PTC® se može proširiti putem programskog jezika C koristeći Pro/TOOLKIT® API. Ovim putem, uz upotrebu dodatnih programskih biblioteka mogu se implementirati opisane

možnosti kao što je prikazano u [11]. Rezultati ovih simulacija mogu se koristiti za poboljšanje inicijalnog dizajna proizvoda (sinteza tolerancija), i mogu se integrisati u proizvoljni PDM sistem.



Slika 1. Šema softvera za analizu tolerancija treće generacije.

4. NESIGURNOST SIMULACIJE

Važan podatak svakog mjerenja je mjerna nesigurnost. Izražavanje nesigurnosti simulacije shodno GUM [3] je neophodno kako bi se rezultat virtualne analize tolerancija mogao pratiti i porediti sa rezultatima mjerenja fizičkog modela. Mjerna nesigurnost je varijabilna veličina i zavisi od niza faktora. Kod predloženog pristupa analizi tolerancija, mjerna nesigurnost proizilazi iz:

- Modela: abstrakcija realnog dijela u model, idealizacija materijala, vrsta mreže, broj elemenata/čvorova
- Proračuna: korišteni MKE *solver*, proračunski algoritam, kriterij konvergencije, optimizacioni algoritmi, preciznost struktura podataka
- Superpozicije navedenih uticaja: korišteni statistički model, uticajni faktor pojedinih veličina.

Buduća istraživanja u ovoj oblasti bi se trebala usredotočiti na uticaj pomenutih faktora na nesigurnost simulacije.

5. TREND OVI RAZVOJA CAT SISTEMA

Podaci vezani za tolerancije dijelova imaju veoma ograničenu ulogu u procesu kontrole i rukovođenja kvalitetom, ukoliko se ne mogu integrisati u industrijski *Product Data Management* (PDM) sistem. Uključenjem podataka u ovaj sistem moguće je pratiti i analizirati stanje tolerancija i odstupanja kroz cijeli proizvodni proces. Jedna od prepreka

ovoj integraciji predstavlja veliki broj različitih, često nestandardizovanih formata podataka koji se koriste u različitim fazama proizvodnje.

Savremeni pristup problemu razmjene i integracije podataka bazira se na platformski neutralnom XML programskom jeziku. XML (engl. *Extensible Markup Language*) je programski meta-jezik čiji je zadatak opis strukture podataka i njihova razmjena između različitih informacionih sistema. XML je nezaobilazan na Internetu gdje se koristi se za definiciju struktura podataka na *e-commerce* web *site*-ovima ili za razmjenu podataka među *office*-paketima. Jedan od projekata baziranih na XML-u je DML – *Dimensional Markup Language* [5], namjenjen definisanju i razmjeni podataka o geometriji, *feature*-ima, dimenzijama i tolerancijama dijela. DML je otvoreni projekat u čijem razvoju učestvuju firme poput: Technomatix, Mitutoyo, Cognitens, MAYA Metrix, DCS, Zeiss i PCDMIS-a. DML je realizovan kao hijerarhijska šema, te je pogodan za kao platforma za razmjenu podataka o dijelu između CAD, PDM i softvera korištenih u mjernoj tehnici i kontroli.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je mogući pristup analizi tolerancija u ranim fazama konstrukcije proizvoda kombinacijom CAD i MKE tehnologija. Današnji komercijalni CAT softveri ne nude zadovoljavajući kvalitet analize i sinteze tolerancija. Ovo se prije svega odnosi na nemogućnost integracije CAT softvera u industrijske PDM sisteme. Prikazane su mogućnosti samostalnog razvoja CAT sistema i date su smjernice razvoja budućih kroz razmjenu podataka baziranih na otvorenim XML standardima.

6. LITERATURA

- [1] DIN ISO EN 1101:2006, Deutsche Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, 2006.
- [2] DIN ISO EN 5459:1982, Deutsche Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, 1982.
- [3] Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM); German version ENV 13005:1999, Deutsche Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, 1999
- [4] Weckenmann, A. et al.: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Kurs für Technische Universitäten. Friedrich–Alexander–Universität Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl QFM, 2001.
- [5] <http://www.dmlspec.org>
- [6] http://www.ugs.com/products/tecnomatix/quality/vis_vsa.shtml
- [7] http://www.3ds.com/products-solutions/plm-solutions/delmia/all-products/domain/Process_Resource_Plan_Definition/product/MTA/?no_cache=1&cHash=584367218d
- [8] <http://www.proengineer.com/>
- [9] Hochmut R. , Meerkam H., Schweiger W., An Approach to a General View on Tolerances in Mechanical Engineering, 2nd International Workshop on Integrated Product Development IPD 98; Magdeburg; 1998; pp. 65 – 76.
- [10] Merkley K. Tolerance Analysis of Compliant Assemblies, PhD Thesis, Brigham Young University, April 1998.
- [11] Uzunović A. Erweiterung eines rechnerunterstützten Werkzeugs zur funktionsorientierten Auswertung der FE-Knotenpunktsverschiebung basierend auf Substitutionselementen. Friedrich–Alexander–Universität Erlangen–Nürnberg, Lehrstuhl MFK.

