

OPTIMIZAREA TOLERANȚELOR ANSAMBLULUI 2A2B PENTRU DISPOZITIVE MODULARE

TOLERANCE OPTIMIZATION OF THE 2H2P ASSEMBLY FOR MODULAR FIXTURES

Tudor PĂUNESCU

Transilvania University of Brasov, Romania

Rezumat. Lucrarea prezintă o abordare stohastică a maximizării preciziei geometrice a ansamblului două alezaje – două bolțuri (2A2B). Probabilitatea asamblării cu succes a sistemului 2A2B este determinată utilizând simularea Monte Carlo. Toleranțele optime se obțin aplicând un algoritm „generare – testare”. Algoritmul este aplicat la optimizarea sistemelor modulare pentru dispozitive de prindere cu grid de alezaje. Rezultatele prezentate în lucrare sunt utile la optimizarea multiobiectiv a kiturilor modulare pentru dispozitive de prindere, dar și pentru alte aplicații inginerești care utilizează sistemul de asamblare 2A2B.

Cuvinte cheie: proiectare statistică, optimizare toleranțe, dispozitiv modular, simulare Monte Carlo

1. Introducere

În zilele noastre proiectarea pe baze statistice este larg acceptată în industrie [1], în special dacă piesele pot fi remontate pe alte ansambluri în caz de eșec al unei asamblări (în această categorie sunt și dispozitivele de prindere modulare). Metodele statistice, în particular simularea Monte Carlo, generează rezultate mai acceptabile decât metoda cazului celui mai dezavantajos. Ultima presupune condiții extreme care se îndeplinesc foarte rar. Acest tip de tolerare este sigur, dacă dimensiunile componentelor sunt în limitele toleranțelor și ansamblul va fi în toleranțe, chiar în situațiile extreme. Metoda este importantă pentru componentele critice ale sistemelor mecanice. Oricum, această garanție implică costuri ridicate.

Permițând unui mic procent din ansambluri să nu se încadreze în specificații, se pot obține toleranțe mai largi ale componentelor, astfel putând să fie reduse costurile de prelucrare.

Metoda hibridă unifică cele două abordări. Beneficiul cel mai important rezidă din capacitatea acesteia de a combina cele două metode în aceeași analiză. Folosind această metodă, utilizatorul poate selecta pentru fiecare componentă tipul de toleranță care îi descrie cel mai bine comportarea.

Deoarece toate modulele dispozitivelor de prindere au aceeași importanță, și datorită faptului că dacă un modul de reazem nu poate fi asamblat acesta poate fi înlocuit cu altul similar, în lucrare a fost adoptată abordarea statistică.

Abstract. The paper presents a stochastic approach to maximize the geometric accuracy of the two pins – two holes (2H2P) assembly. The probability of successful 2H2P assemblies to engineering specifications is calculated using a Monte Carlo simulation. Applying a “Generate and Test” algorithm, the optimal tolerances of modular systems are obtained. The algorithm is applied to optimize the modular fixture systems with grid pattern holes. The results presented in this paper can be useful to the multi-objective modular fixture system optimization or for other engineering applications using 2H2P assembly system.

Key words: statistical design, tolerance optimisation, modular fixture system, Monte Carlo simulation

1. Introduction

Today statistical tolerance design is accepted by industry [1], particularly if parts can be reassigned to other assemblies if they fail to assemble (this is the case of modular fixtures). The statistical methods, in particular Monte Carlo simulation, generate a more reasonable tolerance than worst case method. The last assumes extreme conditions that rarely happen. Worst-case tolerancing is the safer approach, if the inputs are within their respective tolerances, the output is guaranteed to be within its worst-case tolerance. This is especially important for products like critical components on mechanical systems. However, this guarantee comes at a high cost.

By permitting a small fraction of assemblies to be “out-of-spec”, an increase in tolerances for individual dimensions could be obtained, and thus, manufacturing costs could be reduced.

Process tolerancing represent a unified approach to tolerancing that encompasses both the previous approaches. The greatest benefit of process tolerancing is that it allows both worst-case and statistical tolerances to be combined in the same analysis. Using process tolerancing, you can select the type of tolerance that best describes the behavior of each input.

Because all the locating components of the modular fixtures have the same importance, and if a locating module can be replaced to other if they fail to assemble, the statistical approach was chosen.

În prezent există două tipuri de sisteme modulare pentru dispozitive de prindere: sisteme modulare cu grid de alezaje și cu canale T. Primul este mai avantajos deoarece oferă mai multe posibilități de montare a modulelor, este mai sigur, repetabilitatea asamblării unui dispozitiv este mai ușoară, este mai simplu de reparat dacă elementele de centrare se deteriorează. Din aceste motive prezenta lucrare se focalizează pe primul sistem.

Sursele principale de erori includ erorile geometrice ale piesei și dispozitivului, deformațiile elastice ale sistemului. În prezenta abordare se iau în considerare doar erorile geometrice ale modulelor de reazem.

Au fost dezvoltate diverse metode de calcul a preciziei de poziționare a piesei bazate pe: teoria șuruburilor, meta funcții și constrângeri de contact implicite și neliniare, metode variaționale, metode secvențiale care imită mișcările de plasare a piesei într-un dispozitiv de prindere, cu abordări deterministe sau stohastice [1, 2, 3].

Precizia geometrică a dispozitivelor de prindere este determinată în principal de precizia de poziționare a modulelor de reazem care utilizează una sau două suprafețe cilindrice paralele. În lucrare se rezolvă problema optimizării toleranțelor pentru al doilea caz, primul fiind implicit.

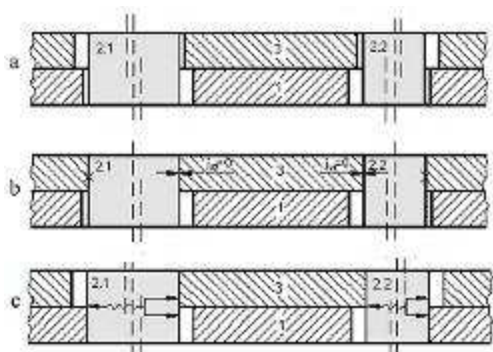


Figura 1. Ansambluri posibile 2A2B
Figure 1. Possible 2H2P assemblies

În figura 1 sunt schematizate ansamblurile 2A2B frecvent utilizate la modulele de reazem (notații: 1-modul de bază, 2- bolț de centrare (șurub de centare, bolț, bucsă rigidă sau elastică crestată), 3- modul de reazem): a- cele mai populare, între bolțurile rigide și alezaje există jocuri (SMGA Carr Lane, Kipp, IMAO, Nabeya), b – bolțurile sunt rigide, presate în modulul 3 și au jocuri față de alezajele modulului 1 (Norelem), c- elementele de centare sunt elastice (în cazul sistemului AMF aceste sunt sub forma unor bucșe elastice secționate pe o generatoare).

Two forms of modular fixturing systems are available today: modular systems with grid pattern holes and modular systems with T slots. The first system offers several advantages over second system: many more positional possibilities, more security, repeated setups are easier, if holes or pins are damaged, these are repairable. This is the reason that the present paper focuses on the first system.

The major sources of errors include fixture and workpiece geometric errors and elastic deformations of the fixture and workpiece due to fixturing forces. In this approach, only geometrical models of positioning modules are considered.

Various methods for determination of workpiece location accuracy have been developed, based on: small screw theory, meta functions and nonlinear, implicit contact constraints, variational methods, sequential methods that mimics the actual placement of a workpiece in a fixture, deterministic or stochastic approaches [1, 2, 3].

The geometrical accuracy of the fixtures is mainly determined by the locating accuracy of modules that use one cylindrical surface for high precision positioning and modules with two parallel cylindrical surfaces. In this paper the tolerance optimization of second problem is solved because the first is implicitly.

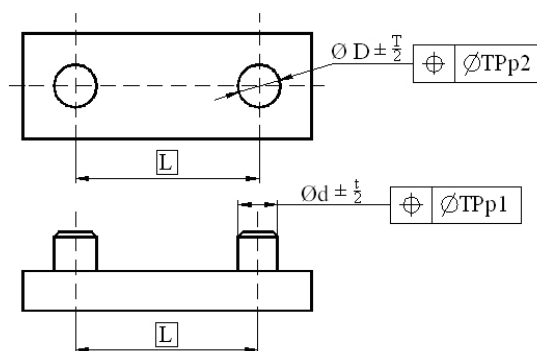


Figura 2. Toleranțele ansamblului 2H2P
Figure 2. Tolerances of the 2H2P assembly

Figure 1 illustrates usual 2H2P assemblies of the locating modules (notations: 1- base module, 2- centering pin (locating screw, round pin, rigid sleeve or slotted sleeve), 3 - mounted locating module): a - the most popular, the pins are rigid bodies, locational clearance fits (Carr Lane, Kipp, IMAO, Nabeya), b - the pins are rigid bodies, force fits between the pins and the holes of module 3, and locational clearance between the pins and the holes of module 1 (Norelem), c- the pins are the elastic bodies (slotted sleeves for AMF modular system).

În [5, 3] au fost propuse modele matematice ale erorilor geometrice, algoritmi asociați și condițiile de fezabilitate a ansamblurilor 2A2B, în cazul utilizării toleranțelor geometrice, dacă este sau nu aplicat principiul maximului de material. Algoritmul și programul prezentat în [5] sunt utilizate în această lucrare pentru optimizarea toleranțelor ansamblului 2A2B.

2. Modelul matematic și algoritmul

2.1. Fezabilitatea ansamblului 2A2B

În lucrare se iau în considerare variațiile dimensionale și de poziție ale componentelor 2A2B. Se presupune că acestea au o înălțime mai mică decât lungimea, în consecință este posibilă simplificarea modelului geometric de la 3D la 2D.

Variabilele de intrare sunt: toleranța de poziție a alezajelor și bolțurilor (TPp), abaterile superioare și inferioare ale alezajelor (ES, EI) și ale bolțurilor (es, ei). Repartițiile sunt normale sau uniforme.

Fezabilitatea ansamblului 2A2B în cazul cel mai dezavantajos este calculată presupunând că diametrele nominale ale suprafețelor cilindrice sunt egale, la fel și abaterile inferioare, superioare

$$\Delta = j^m \left(1 + \frac{d^m}{b^M} \right) - TPp_1 - TPp_2, \quad (1)$$

unde: m - valoare minimă, M - valoare maximă, j - jocul dintre alezaj și bolț, Δ - indicele global de fezabilitate a asamblării, d - diametrul bolțului, b - lățimea fațetei bolțului frezat.

Dacă $\Delta \geq 0$ sistemul are componente total interschimbabile, în caz contrar doar parțial.

Deoarece acceptăm ca un procent mic de ansambluri pot să nu fie fezabile avem nevoie de o condiție aplicabilă pentru fiecare ansamblu 2A2B:

$$\delta = 0.5 \left(j_1 + \frac{d}{b_2} j_2 \right) - |L_{e1} - L_{e2}|. \quad (2)$$

Notații: j_1, j_2 - jocuri între alezaje și bolțuri; L_{e1}, L_{e2} - distanțele efective între axele alezajelor, respectiv ale bolțurilor; d_2, b_2 - valorile efective ale diametrului, respectiv ale lățimii bolțului frezat; δ - indicele individual al fezabilității ansamblului.

Dacă $\delta \geq 0$ ansamblul curent este fezabil, în caz contrar nu.

2.2. Precizia geometrică a ansamblului 2A2B

Algoritmul pentru estimarea preciziei poziției și orientării simulează procesul de asamblare 2A2B, inclusiv micromișcările necesare este descris în [5]. Lucrarea amintită prezintă un model stochastic al

If the geometrical tolerances are involved, the RFS tolerancing (regardless of its feature size) or MMC (maximum material condition), mathematical models of the geometric errors and the associate algorithms and feasibility conditions of the 2H2P assembly where proposed [5, 3]. The algorithm and the software presented in [5] are used in this paper to optimize the 2H2P tolerances.

2. Mathematical model and algorithm

2.1. Feasibility of the 2H2P assembly

In this study, dimensional and positional variations of the 2H2P components are accounted. Suppose that the locating modules has a low ratio of height to length, thus is possible to simplify the 3D geometrical model to 2D.

The input variables are: position tolerance of holes and pins (TPp), upper and lower limits of holes (ES, EI) and pins (es, ei). The distributions of dimensional parameters are normal or uniform.

The feasibility of 2H2P assembly results for the worst case, assuming that nominal diameters of holes and pins are equal, and the low and upper limits are equal respectively.

where: m - minimum value, M - maximum value, j - clearance between the hole and pin, Δ - the global feasible assembly index, d - pin diameter, b - width of the diamond pin.

If $\Delta \geq 0$ then the system has total interchangeability else partial interchangeability.

Because we accept a small fraction of assemblies can not be feasible, we need condition for each 2H2P assembly:

Notations: j_1, j_2 - clearances between holes and pins; L_{e1}, L_{e2} - the effective distances between the holes, respectively pins; d_2, b_2 - the effective values of the diamond pin diameter, diamond pin width, respectively; δ - the individual feasible index.

If $\delta \geq 0$ then the current assembly is feasible else is not feasible.

2.2. Geometrical accuracy of 2H2P assembly

The algorithm for estimating the position and orientation accuracy simulates de 2H2P assembly process, including necessary micro-movements is detailed in [5]. The paper presents a stochastic

preciziei a sistemului de asamblare 2A2B aplicat la dispozitive de prindere modulare cu grid de alezaje. Modelul propus este bazat pe însumarea vectorială 2D a erorilor și pe condițiile de fezabilitate a asamblării.

Descrierea sumară a algoritmului [5]: este generată o poziție și orientare aleatoare a componentei 1, ca în experiment a acului lui Buffon, dar într-o zonă limitată. Dacă ansamblul nu este fezabil (vezi relația (2)) acesta este respins și se trece la testarea altui ansamblu. Dacă este fezabil, dar există o intersecție bolt-alezaj, aceasta se elimină prin micromișcări aleatoare.

2.3. Optimizarea toleranțelor

Dacă pentru un ajustaj cu joc se notează cu j jocul mediu, cu j^m jocul minim și cu T_h , T_p toleranța alezajului, respectiv a arborelui, jocul mediu se poate calcula cu relația:

$$j = j^m + 0,5(T_h + T_p). \quad (3)$$

Jocul mediu este direct proporțional cu jocul minim și cu media aritmetică a toleranțelor arborelui și alezajului. În cazul unor repartiții normale ale diametrelor alezajelor și bolturilor de centrare erorile sunt dependente puternic de jocurile medii și deci și de cele minime. Dar acestea din urmă trebuie să respecte relația (1). Dacă jocurile minime sunt relativ mari și erorile vor fi mari. În concluzie, pentru obținerea unor erori mici se impune utilizarea unor ansambluri 2A2B care sunt parțial interschimbabile.

Din relațiile (1) și (3) se poate scrie condiția fezabilității totale sub forma:

$$j \geq TPp_1 + TPp_2 + 0,5(T_h + T_p). \quad (4)$$

Se observă că toleranțele bolturilor și alezajelor are pondere mai mică decât cele de poziție, deci și erorile vor depinde mai mult de primele.

2.4. Optimizarea toleranțelor dispozitivelor modulare

Restricțiile optimizării toleranțelor 2A2B pentru dispozitive de prindere modulare sunt: diametrele nominale ale alezajelor și ale bolturilor sunt limitate la 10...18 mm; clasele de precizie 7...5; diametrele nominale egale; $ES_{11} = ES_{21}$, $EI_{11} = EI_{21}$, $es_{11} = es_{21}$, $ei_{11} = ei_{21}$; $L_1 = L_3 = L$ (vezi figura 1b); $TPp_1 = TPp_2 = TPp = 0.01$ mm valoarea minimă uzuală, vezi sistemele modulare pentru dispozitive: Halder L12, Kipp M12, Nabeya M12, IMAO; $EI > es$ condiția existenței jocurilor minime; $\Delta \leq 0$ (interschimbabilitate parțială) folosită pentru a

model of 2H2P geometrical accuracy for modular fixtures with grid pattern holes. The proposed model is based on 2D vectorial summing of errors and the feasible assembly conditions.

A very short description of the algorithm [5]: the random position and orientation of the component 1 are generated, like the well known Buffon's needle experiment, but the dropping area is limited. If the assembly is not feasible (see condition 2) it is rejected, and the new random assembly is tested. If the current assembly is feasible but a bolt-hole intersection exist, by random micromoves it is removed.

2.3. Tolerance optimization

If we have a clearance fit, and the following notations are used: j medium clearance, j^m minimum clearance, T_h hole tolerance, T_p pin tolerance, the medium clearance is calculated with:

The medium clearance is proportional to minimum clearance and to arithmetic average between the pin and hole tolerances. Under normal distributions, the 2H2P accuracy depends on medium clearance, and obviously on minimum clearance. The minimum clearance need to respect condition (1). If minimum clearances are great result great locating errors. As a conclusion, an improved accuracy can be reached if a small fraction of 2H2P assemblies are "out-of-spec" (2H2P assembly with partial interchangeability of componets).

By use (1) and (3) it can write the total feasibility condition as:

As you see, the pin and hole tolerances are less important than position tolerance of holes and pins, therefore the errors more depend by first.

2.4. Tolerance optimization of the modular fixtures

Constraints of the 2H2P tolerance optimization of the modular fixtures are: nominal diameters of the holes and pins are located in the range of 10...18 mm; 7...5 IT grades; nominal sizes of diameters are equal; $ES_{11} = ES_{21}$, $EI_{11} = EI_{21}$, $es_{11} = es_{21}$, $ei_{11} = ei_{21}$; $L_1 = L_3 = L$ (see figure 1b); $TPp_1 = TPp_2 = TPp = 0.01$ mm, the minimum usual value, see Halder L12, Kipp M12, Nabeya M12, IMAO modular fixture systems; $EI > es$ the condition of minimum clearance between the holes and pins; $\Delta \leq 0$ (partial interchangeability) is used to

limita numărul de combinații ale câmpurilor de toleranță și pentru minimizarea erorilor;

Deoarece abaterile superioare și inferioare au valori discrete, s-a adoptat o metodă „generare – testare”. Utilizând relația (1), când $\Delta \leq 0$ putem calcula TPp minim și alege ajustajele corespunzătoare:

$$TPp \geq \max(0.01, 0.5 \cdot j^m). \quad (5)$$

Pentru fiecare ajustaj se calculează prin metoda Monte Carlo precizia geometrică realizată și procentul de ansambluri nefezabile. În final se alege ajustajul care realizează precizia maximă pentru un procent dat de ansambluri 2A2B nefezabile.

Eșantioanele pentru simulările Monte Carlo sunt: $n = 500000$ pentru estimarea preciziei geometrice și $n = 10^6 - 10^7$ pentru calculul fezabilității, intervalul de încredere 0,9973, au fost luate în considerare repartiții normale (vezi zonele superioare ale celulelor din tabelul 1) și uniforme (zonele inferioare) ale dimensiunilor.

limit the number of tolerance zones combinations and the error minimization;

Because the upper and lower limits of holes and pins are discrete values, a “Generate and Test” method was adopted. By use of (1), when $\Delta \leq 0$ we can calculate minimum TPp and select the proper fits:

Using Monte Carlo simulation method, the geometric accuracy and the unfeasible assembly rate of every fit are calculated. Finally, the most accurate fit is chosen, if the rate of unfeasible 2H2P assembly is adopted.

The following sample sizes were used in Monte Carlo simulations: $n = 500000$ for geometrical accuracy estimation, and $n = 10^6 - 10^7$ for feasibility of the 2H2P assemblies, confidence level 0.9973, and the normal (upper areas of the cells of the table 1) and uniform (lower area) distributions of the dimensions are considered.

Tabel 1. Rezultatele simulărilor Monte Carlo pentru ansamblul 2A2B cu două bolțuri rotunde, $d = 10-18$ mm
Table 1. The results of the Monte Carlo simulations of the 2H2P assembly with two round pins, $d = 10-18$ mm

TPp μm	G6/g6 $j^m = 12 \mu\text{m}, j = 23 \mu\text{m}$				G6/g5 $j^m = 12 \mu\text{m}, j = 21.5 \mu\text{m}$			
	ε_x	ε_y	ε_{xy}	f	ε_x	ε_y	ε_{xy}	f
10	22.5	27.5	29.0	0	21.2	25.8	27.0	0
	25.1	31.2	33.6	1	23.8	29.9	31.6	3
12.5	23.0	28.3	30.6	0	21.7	26.8	29.0	0
	26.5	33.5	35.0	65	25.1	31.6	33.2	120
15	23.5	29.5	31.6	0	22.2	27.7	29.3	0
	27.8	35.2	37.5	620	26.5	33.3	35.0	1080
17.5	24.2	30.7	33.0	2	22.8	29.0	31.0	7
	29.5	36.9	39.5	2770	28.2	35.1	37.6	4500
20	24.9	32.0	34.0	22	23.6	30.6	32.3	52
	31.3	38.8	41.2	8020	30.0	36.9	39.4	12000

Mai sus $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$ [μm] sunt erorile de poziție ale originii sistemului de referință a unei componente relativ la celălalt, f este numărul ansamblurilor ratate raportate la 10^6 ansambluri testate.

Baza de comparație este sistemul modular Norelem M10 cu ajustaj $\Phi 16$ E6/n6, $j^m = 12 \mu\text{m}$, $j = 23 \mu\text{m}$ și $TPp = 0,01$ mm, singurul sistem 2A2B care folosește două bolțuri rotunde. Rezultatele simulării sunt: $\varepsilon_x = 22,6 \mu\text{m}$, $\varepsilon_y = 27,5 \mu\text{m}$, $\varepsilon_{xy} = 29,4 \mu\text{m}$, $f = 0$ pentru repartiții normale.

Dacă două ajustaje au TPp unic și aceleași jocuri minime și medii, rezultă erori pe poziționare egale. De exemplu, ajustajele $\Phi 16$ E6/n6 și $\Phi 16$ G6/g6 sunt similare, ca urmare procesul de optimizare se simplifică.

Above $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$ [μm] are the locating errors of the coordinate system origin associated to a 2H2P component relative to other, f is the unsuccessful assemblies respect to 10^6 tested assemblies.

Basis of comparison is Norelem M10 fixture system having a $\Phi 16$ E6/n6 fit, $j^m = 12\mu\text{m}$, $j = 23 \mu\text{m}$ and $TPp = 0.01$ mm, it is the only 2H2P assembly with two round pins. The simulation results are: $\varepsilon_x = 22.6 \mu\text{m}$, $\varepsilon_y = 27.5 \mu\text{m}$, $\varepsilon_{xy} = 29.4 \mu\text{m}$, $f = 0$ under the normal distributions.

If two fits have the same TPp , the same minimum and medium clearances results the equal locating errors. For example, the fits $\Phi 16$ E6/n6 and $\Phi 16$ G6/g6 are similar, therefore the optimizing process is simplified.

Costurile de prelucrare pot fi reduse prin majorarea TPp , dar numărul de ansambluri nefezabile crește rapid în cazul repartițiilor uniforme și mai puțin pentru repartițiile normale.

Prin folosirea unui bolț rotund în combinație cu unul frezat putem crește relativ mult TPp (vezi tabelul 2). De exemplu, dacă creștem toleranța la poziția nominală de la 0,01 mm la 0,015 mm (o majorare de 50 %) eroarea de poziționare xy se modifică mult mai puțin de la 0,029 mm la 0,0315 mm (8,6 %).

Manufacturing costs could be reduced by increasing of TPp , but the number of the unsuccessful assemblies grows rapidly under uniform distributions and less under uniform distributions.

By using one round pin and one diamond pin we can raise more the TPp magnitude (see table 2). For example, if we increase position tolerance from 0.01 mm to 0.015 mm (50 %) the xy locating error changes much less from 0.029 mm to 0.0315 mm (8.6 %).

Tabel 2. Rezultatele simulărilor Monte Carlo pentru ansamblul un bolț rotund - un bolț frezat, $d = 10-18$ mm
Table 2. The results of the Monte Carlo simulations of one round pin - one diamond pin assembly, $d = 10-18$ mm

TPp μm	G6/g6 $j^m = 12 \mu\text{m}, j = 23 \mu\text{m}, b = 5 \text{ mm}$				G6/g5 $j^m = 12 \mu\text{m}, j = 23 \mu\text{m}, b = 5 \text{ mm}$			
	ε_x	ε_y	ε_{xy}	f	ε_x	ε_y	ε_{xy}	f
10	24.8	27.5	29.4	0	23.2	25.8	27.4	0
	27.8	32.0	34.6	0	26.1	30.0	32.1	0
12.5	25.4	28.4	30.4	0	23.8	26.8	28.8	0
	29.1	33.4	35.8	0	27.5	31.5	33.8	0
15	25.8	29.5	31.2	0	24.4	28.1	30.7	0
	30.1	35.2	37.9	0	28.7	33.3	35.8	0
17.5	26.8	30.8	33.0	0	25.4	29.2	31.6	0
	31.9	37.0	39.6	0	30.1	35.2	37.4	0
20	27.6	32.0	34.7	0	26.2	30.5	33.2	0
	33.3	38.7	42.0	2	31.9	37.0	40.0	1

3. Concluzii

În lucrare este propus un model stohastic al preciziei geometrice pentru ansamblurile 2A2B. Pe baza acestuia și utilizând un algoritm „generare – testare” și simulări Monte Carlo, sunt calculate toleranțele optime ale sistemelor modulare pentru dispozitive. Nu este necesară adoptarea interschimbabilității totale a ansamblurilor modulare 2A2B, cu efecte mari asupra costului de prelucrare a componentelor modulare.

3. Conclusions

A stochastic model of the geometrical locating accuracy of 2H2P assembly is proposed. Based on this model with a “Generate and Test” algorithm and the Monte Carlo simulations, the optimal tolerances of fixture modular systems are calculated. It is unnecessary to insist on infallible interchangeability of modular 2H2P assembly, with the great effects over the manufacturing costs of the modular components.

References

- Kang, Y.: *Computer Aided Fixture Design Verification*. Ph.D. Dissertation, Worcester Polytechnic Institute, December 2001
- Raghu, A., Melkote, S.N.: *Prediction of workpiece location error due to fixture geometric errors and fixture-workpiece compliance*. Proceedings of IMECE'03 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition Washington, November 16-21, p. 1-8
- Shan, A., Roth, R.N., Wilson, R.J.: *A New Approach to Statistical Geometrical Tolerance Analysis*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, no. 15, 1999, p. 222-230
- Hong, Y.S., Chang, T.C.: *A Comprehensive Review of Tolerancing Research*. International Journal of Production Research, vol. 40, no. 11, 2002, p. 2425-2459
- Păunescu, T.: *Statistical Prediction of the Two-Hole Two-Pin Locating Accuracy*. **RECENT**, vol. 10 (2009), no. 1(25), March 2009, p. 56-61, ISSN 1582-0246

Lucrare primită în Februarie 2010

Received in February 2010