

**SELECȚIA PARAMETRILOR
OPTIMI DE PROIECTARE
PENTRU UN MECANISM CU
CAME FOLOSIND UN
ALGORITM GENETIC MULTI-
OBIECTIV**

**I. Tsiafis, R. Paraskevopoulou, K.-D.
Bouzakis**

*1. Laboratory for Machine Tools and
Manufacturing Engineering, Mechanical
Engineering Department, Aristoteles
University of Thessaloniki, Greece*

Rezumat :Proiectarea optima a mecanismelor cu came necesita un consum mare de timp, datorita numeroaselor soluții constructive. Prezenta lucrare abordează problema de optimizare a parametrilor de proiectare a unui mecanism cu came din punct de vedere multi-obiectiv. Parametrii de proiectare cum sunt legea de mișcare a tachelului, raza cercului de baza a camei, raza rolei tachelului si dezaxarea tachelului se pot determina luând in considerare ca criteriul de optimizare minimizarea mărimii camei, a momentului motor si a solicitărilor de contact. Simultan sunt luate in considerare diferite constrângeri funcționale. Metoda de optimizare, bazata pe un algoritm genetic, este aplicata pentru a găsi soluțiile Pareto optime in raport cu funcțiile obiectiv menționate precedent. O aplicație a procedurii propuse este demonstrata in cazul unui mecanism cu came si tachel cu rola in mișcare de translație.

Cuvinte cheie: Mecanism cu came, algoritmi genetici, optimizare multi - obiectiv, set optimal Pareto

1. INTRODUCERE

Deși mecanismele cu came se folosesc frecvent pentru generarea diverselor legi de mișcare, totuși proiectarea mecanismelor cu came rămâne încă un proces complex. Selecția funcției de transfer, care trebuie sa îndeplinească caracteristici cinematice prescrise, constituie un important pas al acestei proceduri. Totuși, in multe cazuri exista mai multe soluții care conduc la legea de mișcare dorita. De aceea este necesar sa se ia in considerare un criteriu de optimizare,

**SELECTION OF OPTIMAL
DESIGN PARAMETERS FOR A
CAM MECHANISM USING
MULTI-OBJECTIVE GENETIC
ALGORITHM**

**I. Tsiafis, R. Paraskevopoulou, K.-D.
Bouzakis**

*2. Laboratory for Machine Tools and
Manufacturing Engineering, Mechanical
Engineering Department, Aristoteles
University of Thessaloniki, Greece*

Abstract: The optimum design of a cam mechanism is a time consuming task, due to the numerous alternatives considerations. In the present work, the problem of optimising the design parameters of a cam mechanism is investigated from a multi-objective point of view. Optimum design parameters, just like the type of the follower motion, the cam base circle radius, the follower radius and offset can be determined considering as optimisation criteria the minimization of the cam size, the torque and the contact stress. Several functional constraints are simultaneously taken into account. The optimisation approach, based on genetic algorithm, is applied to find the set of Pareto optimal solutions with respect to the afore-mentioned objective functions. An application of the optimisation procedure is demonstrated in the case of a radial cam mechanism with translating roller follower.

Keywords: Cam mechanism, genetic algorithms, multi-objective optimization, Pareto optimal set

1. INTRODUCTION

The cam mechanisms have been widely used to generate a variety of motions since many years. However, the design of a cam mechanism still remains a knowledge intensive and complex process. The selection of the transfer functions, which fulfill prescribed kinematical specification, is an important step of this procedure. However, in many cases, there are more than one alternatives leading to the desired follower motion. If some optimization criteria are not set, the selection of the transfer function becomes hence highly subjective.

pentru selecția funcției de transfer.

Un alt aspect important în procesul de proiectare a mecanismelor cu came este selecția geometriei mecanismului. O metoda utilizată frecvent /9/ este determinarea gabariturii minime a camei, care permite funcționarea luând în considerare restricții constructive. Multe cercetări au abordat minimizarea gabariturii camei folosind diverse metode /1, 8, 9/ ca algebrice, grafice, analitice, numerice etc.

Totuși, în proiectarea mecanismelor cu came, în afara de minimizarea gabariturii camei, se impun și alte obiective care adesea sunt contradictorii. De aceea, optimizarea parametrilor de proiectare a mecanismelor cu came devine o problemă de optimizare multi-obiectiv /7/, care este dificil de rezolvat cu metodele tradiționale de optimizare/10/.

În ultimii ani, aplicarea algoritmilor genetici în optimizarea multi-obiectiv a căpătat un mare interes. Algoritmii evoluționiști mimează principiile naturale de evoluție pentru a realiza procedurile de optimizare. Algoritmii evoluționiști operează pe o populație de soluții candidat aplicând diverse mecanisme inspirate din evoluția biologică: selecția, reproducerea, mutația și recombinarea. La fiecare generație, un nou set de soluții este creat prin selectarea indivizilor în funcție de rata lor de adaptare și reproducerea lor folosind operatori genetici. Generație după generație, acest proces conduce la evoluția speciilor ca în cazul selecției naturale. Deși algoritmii genetici nu garantează găsirea soluțiilor optime, viteza lor de convergență în probleme de optimizare multi-obiectiv pare să fie mai bună decât a tehnicilor tradiționale /4/.

În această lucrare se propune o procedură multi-obiectiv bazată pe algoritmi genetici pentru a optimiza parametrii de proiectare a unui mecanism plan cu camă disc și tchet cu rolă în mișcare de translație.

2. PROIECTAREA OPTIMA A UNUI MECANISM CU CAMA

În figura 1 este ilustrat un mecanism cu camă disc și un tchet cu rolă în mișcare de

Another significant aspect of the cam design process is the selection of the mechanism geometry. A common practice referred in the literature /9/ is to find the minimum cam size that enables operation regarding constructive restrictions. Many researchers have paid attention to the cam size minimization and several types of methods /1, 8, 9/ have been used such as graphical, algebraic, analytical, numerical etc.

However, in many real world applications, the designer of a cam mechanism encounters the situation where it is necessary to select more objectives, besides the minimization of the cam size. These objectives are often conflicting and incomparable. For this reason, the optimization of design parameters for a cam mechanism becomes, in practice, a multi-objective optimization problem /7/, which is difficult to be solved by traditional optimization techniques.

Recently, the application of evolutionary algorithms in multi-objective optimization has attracted growing interest. Evolutionary algorithms mimic natural evolutionary principles to perform search and optimization procedures. They operate on a population of candidate solutions applying some mechanisms inspired by biological evolution: selection, reproduction, mutation, and recombination. At each generation, a new set of solutions is created by selecting individuals, according to their fitness rate to the problem and breeding them using genetic operators. Generation, after generation, this process leads to the evolution of solutions population, just as natural adoption. Although evolutionary algorithms do not guarantee to find the optimal solutions their convergence speeds in multi-objective optimization seem to be better than those of traditional techniques /4/.

In this paper, a multi-objective procedure based on genetic algorithms is proposed to optimize the design parameters of a disk mechanism with a roller follower.

2. OPTIMUM DESIGN OF THE CAM MECHANISM

translație. Cama se rotește cu viteză unghiulară constantă, iar arcul se consideră liniar cu constanta elastică k . Profilul camei poate fi determinat luând în considerare restricțiile cinematice și dinamice impuse de procesul tehnologic.

A cam mechanism with translating roller follower is shown in figure 1. The cam is assumed to have constant angular velocity. The spring is supposed to be linear with a spring constant k . The profile of the cam can be determined considering the kinematical requirements of the mechanism.

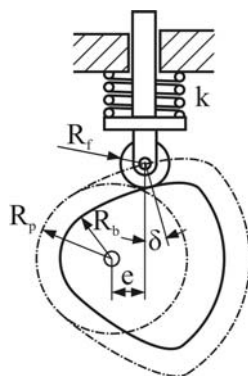


Figura 1: Mecanism cu cama și tchet cu rola
Cam mechanism with roller follower

În cadrul acestei lucrări se prezintă o procedură de optimizare a parametrilor de proiectare a mecanismului cu camă. Acești parametri sunt funcția de transfer (selectată în conformitate cu standardele VDI 2143 /13/), raza cercului de bază a camei R_b , raza rolei tchetului R_f și deaxarea tchetului e .

In this paper, an attempt is made to optimize the design procedure. The parameters under optimization are the type of the basic curve (selected according to the VDI 2143 guideline /13/), the cam base circle radius R_b , the roller follower radius R_f and the follower offset e .

Funcțiile obiectiv

Optimizarea parametrilor de proiectare se face cu scopul de a minimiza gabaritul camei, momentul motor și tensiunile de contact dintre cama și tchet.

1. Minimizarea gabaritului camei
Ca mărime de minimizat se considera suma razei cercului de bază a camei și a razei rolei tchetului: $R_p = R_b + R_f$.

2. Minimizarea momentului motor

Momentul motor ce acționează asupra camei se calculează cu relația /10/:

$$T = \frac{F_c \cdot v}{\omega} \quad (1)$$

unde: F_c =forța exercitată de camă asupra tchetului, v =viteza tchetului, ω =viteza unghiulară a camei.

3. Minimizarea tensiunilor de

Objective functions

In optimization of the design parameters of the cam mechanism presented in this paper, the purpose is to minimize the cam size, the torque required to drive the cam and the contact stress between cam and the follower.

1. Minimization of cam size

As size is considered the sum of base circle radius and roller radius $R_p = R_b + R_f$.

2. Minimization of the torque

The torque required to drive the cam can be calculated by the following equation /10/:

$$T = \frac{F_c \cdot v}{\omega} \quad (1)$$

where: F_c =force of cam on follower roller, v =follower velocity, ω =camshaft angular velocity.

contact

Tensiunea de contact dintre camă și tchet se calculează cu relația /3/:

$$\sigma_{\max} = 0,564 * \left[\frac{P * \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 * \rho_2} \right)}{\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

unde: P =forța normala pe unitate de lățime a elementelor in contact, ρ_1, ρ_2 = raza de curbura a camei, respectiv a tchetului, μ_1, μ_2 = coeficientul Poisson a camei, respective a tchetului, E_1, E_2 = modulul de elasticitate a camei, respective a tchetului.

Constrângeri

Spațiul soluțiilor unde parametrii de proiectare se cercetează este limitat de următoarele constrângeri:

1. Unghiul de presiune δ trebuie sa fie mai mic decât valoarea maxima permisa δ_{\max} : $\delta < \delta_{\max}$.

Unghiul de presiune δ , definit ca unghiul format de normala la profilul camei și direcția de deplasare a punctului de contact a tchetului, se calculează cu relația /10/:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{v - e}{s + \sqrt{R_p^2 - e^2}} \right) \quad (3)$$

unde s este deplasarea tchetului.

2. Raza rolei tchetului trebuie sa fie mai mica decât raza de curbura minima a camei ρ_{pitch} : $R_f < \min \rho_{pitch}$

Raza de curbura a camei se calculează cu relația /7/:

$$\rho_{pitch} = \frac{\left[(R_p + s)^2 + v^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{(R_p + s)^2 + 2 * v^2 - a * (R_p + s)} \quad (4)$$

unde a este accelerația tchetului.

3. Tensiunea maxima de contact trebuie sa fie mai mica decât rezistenta admisibila a materialelor: $\sigma_{\max} < \sigma_{perm}$.

4. Dezaxarea tchetului trebuie sa fie

3.Minimization of the contact stress

The contact stress between the cam and the follower can be calculated by the following equation /3/:

$$\sigma_{\max} = 0,564 * \left[\frac{P * \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 * \rho_2} \right)}{\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

where: P =the normal load per unit width of the contacting members, ρ_1, ρ_2 = the radii of curvature of the cam and the follower, respectively, μ_1, μ_2 = Poisson's ratio for the cam and the follower, respectively, E_1, E_2 = the moduli of elasticity of the cam and the follower, respectively.

Constraints

The solution space where the optimum design parameters are searched is confined by the following constraints:

5. The maximum value of the pressure angle δ must be smaller than the maximum permitted pressure angle: $\delta < \delta_{\max}$.

The pressure angle can be calculated by /10/:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{v - e}{s + \sqrt{R_p^2 - e^2}} \right) \quad (3)$$

where: s= follower displacement

6. The radius of the roller follower roller must be smaller than the minimum radius of curvature: $R_f < \min \rho_{pitch}$

The radius of curvature ρ_{pitch} , can be calculated by /7/:

$$\rho_{pitch} = \frac{\left[(R_p + s)^2 + v^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{(R_p + s)^2 + 2 * v^2 - a * (R_p + s)} \quad (4)$$

where: a=follower acceleration

7. The maximum contact stress must be smaller than the material's permissible strength $\sigma_{\max} < \sigma_{perm}$.

8. The offset must be greater than zero and smaller than the radius of the roller

mai mica decât raza rolei $0 < e < R_f$ și mai mica decât viteza maxima redusa a tachetului $e < \dot{s}$.

3. OPTIMIZAREA MULTA-OBIECTIV

In problemele de optimizare cu o singura funcție obiectiv, soluția optima se determina in raport cu de aceasta funcție obiectiv. Din contra, scopul optimizării multi-obiectiv consta in general in determinarea pe cat posibil a mai multor soluții optime Pareto. In conformitate cu conceptul de optimalitate Pareto/6/, familia de soluții a unei probleme de optimizare multi-obiectiv este compusa din toate acele elemente ale spațiului investigat, care sunt astfel ca obiectivele corespunzătoare sa nu poată fi simultan imbunatatite.

In cadrul prezentei lucrări se folosește algoritmul genetic multi-obiectiv (MOGA) pentru determinarea soluțiilor optime. Algoritmul genetic multi-obiectiv, propus inițial de Fonseca și Fleming /5/, clasifică soluția nedominantă a unei populații a algoritmului genetic. Pentru fiecare soluție se verifică dominarea ei in populație. Rangul soluției corespunde numărului de cromozomi in populația curentă de care ea este dominata. După aceea valoarea funcției de performanță este evaluată pentru fiecare soluție, bazată pe rangul soluției.

Distribuția performanței (Fitness Sharing)

In scopul de a menține un set divers de soluții bune și de a împiedica formarea câtorva grupuri, se aplica tehnica distribuției performantei. Aceasta tehnica reduce artificial performanta soluțiilor in ariile dens populate și in acest mod încurajează cercetarea in secțiuni neexplorate a frontului Pareto. Ideea tehnicii distribuției performanței este ca o soluție local împarte resursa cu alte soluții. In consecința, soluțiile vecine influențează valoarea performanței a unei soluții. In algoritmul MOGA folosit in cadrul acestei lucrări, se folosește distanta euclidiană dintre soluții in spațiul obiectiv /2/.

Mânuierea constrângerilor

O importanta trăsătura a algoritmilor

follower. Moreover, the offset should be smaller than the maximum value differential of displacement function $0 < e < R_f$, $e < \dot{s}$.

3. MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

In single objective optimization problems one optimal solution is searched according to the sole objective function. In contrary, the goal of multi-objective optimization is generally to find as many different Pareto optimal solutions as possible. According to the concept of Pareto optimality /6/ the family of solutions of a multi-objective optimization problem is composed of all those elements of the search space, which are such, that the corresponding objectives cannot be all simultaneously improved.

In the present paper a multi-objective genetic algorithm method was used to find the optimal solutions. Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) classifies the non-dominated solution of a GA population and was initially proposed by Fonseca and Fleming. According to them /5/, each solution is checked for its domination in the population. The rank of a solution corresponds to the number of chromosomes in the current population by which it is dominated. After ranking, a fitness value is assigned to every solution, based on the solution's rank.

Fitness Sharing

In order to maintain a diverse set of good solutions and preventing them from the forming of relatively few clusters, fitness sharing is applied. Fitness sharing artificially reduces the fitness of solutions in densely populated areas and by this way it encourages the search in unexplored sections of Pareto front. The idea of the fitness sharing technique is that a solution shares local resource with other solutions. Consequently, its neighbours influence the fitness value of a solution. In the MOGA used in the scope of this paper, the Euclidean distance between solutions in the objective space is used /2/.

genetici este tratarea constrângerilor. In metodologia folosita in prezenta lucrare, fiecare constrângere funcțională este tratată ca o funcție obiectiv adițională /12/. Pentru fiecare soluție a populației se calculează valorile funcțiilor obiectiv de performanță. In continuare se verifică pentru fiecare soluție violarea constrângerilor. Toate constrângerile care sunt satisfăcute se definesc la zero, in timp ce constrângerile violate se definesc la o distanta de la limita constrângerilor. Prin urmare, algoritmul de optimizare multi-obiectiv încearcă să găsească soluțiile cu cele mai mici valori ale funcțiilor obiectiv, tinzând sa minimizeze distanțele corespunzătoare (deci si violarea constrângerilor) /4, 11/.

4. EXEMPLU APLICATIV

Procedura de optimizare prezentată mai sus se aplică la determinarea parametrilor optimi a mecanismului cu camă din figura 1. Prescripțiile cinematice si dinamice, datele de proiectare si constrângerile folosite in optimizare sunt date in figura 2.

Constraints Handling

An important issue in genetic algorithms is the treatment of constraints. In the methodology, which is used in the present work, each functional constraint is treated as an additional objective /12/. For each solution of the population, the objective fitness values are calculated. Furthermore, every solution is checked for constraints violation. All the constrained objectives that are satisfied are assigned to zero, while all other (violated constraints) are assigned to the distance from the constraint boundary. Since the multi-objective optimization algorithm tries to find solutions with smaller objective values, it tends to minimize the corresponding distances (and thus the constraints violation) /4, 11/.

4. AN APPLICATION EXAMPLE

The above outlined optimization procedure is used to determine optimum cam-follower design parameters in the case of the mechanism presented in figure 1.

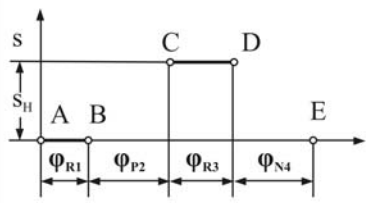
Kinematic requirements	Functional requirements
 <p> $\varphi_{R1}=60^\circ$ $\varphi_{P2}=110^\circ$ $\varphi_{R3}=90^\circ$ $\varphi_{N4}=100^\circ$ $s_H = 10 \text{ mm}$ BC= continue acceleration minimum acceleration DE=continue acceleration minimum velocity Cam speed: 200 rpm </p>	<p> Maximum pressure angle: 30° Cam base circle radius: 15-30 mm Roller follower radius: 6-20 mm Follower offset: 0-10 mm </p>
	Material properties
	<p> Cam Poisson's ratio: 0,3 Follower roller Poisson's ratio: 0,3 Cam modulus of elasticity: $2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ Follower modulus of elasticity: $2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ Density of the follower: $7,850 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ Spring constant: 30000 N/m Spring mass : 0,01kg Initial spring compression: 5 mm </p>

Figura 2: Datele pentru optimizarea parametrilor de proiectare a unui mecanism cu cama
 Data for the optimisation of design parameters of the disk cam mechanism.

La implementarea algoritmului genetic au fost folosite cinci subpopulații respectiv cu 50, 30, 30, 40, 50 indivizi. Pe trei

The kinematical and functional requirements, as well as the data and constraints used during the optimization are shown in figure 2.

subpopulații a fost aplicată recombinarea discretă, iar pentru restul de două a fost aplicată recombinarea liniară. Rata de mutație în fiecare subpopulație a fost respectiv 0.1, 0.03, 0.01, 0.003 și 0.001. Pentru definirea performanței fiecărui individ a fost aplicată o clasificare neliniară. Numărul maxim de generații a fost 100.

Four basic transfer functions for both rise and fall have been considered (cycloid, modified trapezoidal, modified sinusoidal, polynomial 3-4-5 degree).

For the implementation of the genetic algorithm five subpopulations were used with 50, 30, 30, 40, 50 individuals respectively. Discrete recombination was applied on three subpopulations and linear to rest two. The mutation rate in each subpopulation was 0.1, 0.03, 0.01, 0.003 and 0.001 correspondingly. Non-linear ranking was applied, in order to assign the fitness of every individual. The maximum number of generations was 100.

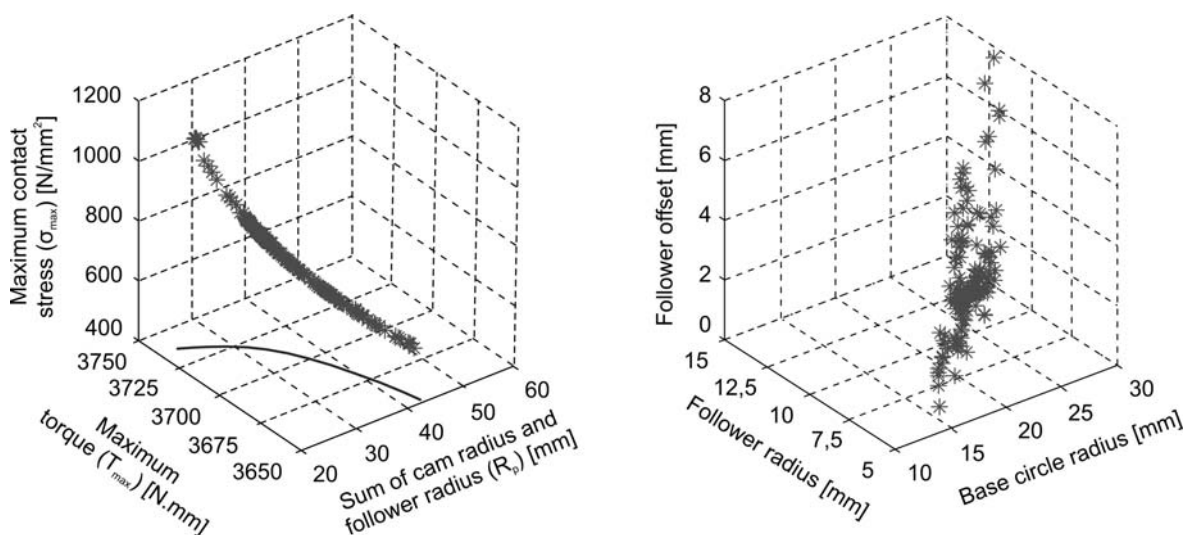


Figura 3: Frontul Pareto și valorile parametrilor geometrici corespunzătoare punctelor Pareto
Pareto front and geometric parameters values corresponding to the Pareto points

În partea stângă a figurii 3 sunt prezentate punctele nedominante obținute în procesul de optimizare, iar în partea dreaptă se prezintă valorile corespunzătoare ale razei cercului de bază a camei, raza rolei tchetului și deaxarea tchetului. Unele din punctele Pareto și valorile corespunzătoare ale funcției obiectiv sunt date în Tabelul 1. Se observă că valorile razei cercului de bază, a rolei și a deaxării variază. Mai mult, în unele cazuri se propun legi de mișcare cicloidală în faza de ridicare și coborâre, iar în altele legi de mișcare sinusoidală modificată în faza de urcare și coborâre.

In the left part of figure 3, the non-dominated points obtained from the optimization procedure are presented, while the corresponding values of the cam base circle radius, the roller follower radius and the follower offset are shown in the right part of the figure. Some of the Paretian points and the corresponding objective function values are shown in Table 1. Looking at the Table 1, it can be observed that the values of base circle radius, roller follower radius and follower offset are varied. Furthermore in some cases the combination cycloid rise-cycloid fall and in other cases the combination modified sinusoidal rise-modified sinusoidal fall is proposed.

Tabelul 1: Soluții optime Pareto
Table 1: Pareto optimal solutions

R_b (mm)	R_f (mm)	e (mm)	R_p (mm)	T_{max} (N.mm)	σ_{max} (N/mm ²)	Type of motion
25,79	10,23	6,11	36,02	3680,37	689,53	cycloid rise and fall
28,33	11,42	1,82	39,75	3662,75	612,25	mod. sinusoidal rise and fal
19,67	7,76	3,61	27,43	3708,55	911,49	cycloid rise and fall
30,00	11,91	0,17	41,91	3654,45	584,32	mod. sinusoidal rise and fall
24,74	9,88	3,32	34,62	3685,30	711,26	cycloid rise and fall
27,90	11,19	2,02	39,09	3666,50	624,98	mod. sinusoidal rise and fall
26,64	10,65	2,38	37,29	3674,55	657,33	mod. sinusoidal rise and fall

In plus, in cazul când mișcarea tachelului este predefinită, procedura de optimizare poate fi utilizată la optimizarea mecanismului cu came pe baza parametrilor geometrici.

5. CONCLUZII

In prezenta lucrare, o metoda de optimizare Pareto bazată pe algoritmul genetic este utilizată la proiectarea optimă a unui mecanism cu came. Aceasta metodă include selecția funcției optime de transfer și determinarea parametrilor geometrici a mecanismului. Criteriile de optimizare cuprind minimizarea gabariturii camei, a momentului motor și a tensiunilor de contact.

Procedura propusă este automată, sigură și poate fi aplicată la diverse tipuri de mecanisme cu came. In plus, pot fi ușor adăugate și alte funcții de transfer. La sfârșitul procesului de optimizare, setul de soluții optime oferă informații utilizatorului ca baza pentru decizia finală preferată dintre obiectivele problemei.

BIBLIOGRAFIE

1. Biswas, A., Stevens, M., Kinzel G., A comparison for the analytical determination of profiles for disk cams

Besides, in case that the follower motion is predefined, the optimisation procedure can be used to optimise the cam on the basis of the geometric parameters.

5. CONCLUSIONS

In this paper a Pareto optimization approach based on genetic algorithms is used to obtain the optimal design parameters for a cam mechanism. This approach includes the selection of optimum transfer functions for particular transient regions and the optimization of geometric parameters of a cam mechanism. As optimization criteria are considered the minimization of the cam size, the minimization of the torque and by this way the minimization of the motor required to drive the cam, as well as the minimization of the contact stress.

The proposed procedure is automatic, seems to be reliable and could be applied not only to disk cam mechanisms, but to various types of cam mechanisms too. Furthermore, more transfer functions can be easily added. At the end of the optimization, a set of optimal compromise solutions provides the user information, as a basis of final preference decision between the objectives.

BIBLIOGRAPHY

1. Biswas, A., Stevens, M., Kinzel G., A comparison for the analytical

- with roller followers, *Mechanism and Machine Theory*, 2004, pp. 645-656.
2. Bouzakis, K.-D., Paraskevopoulou R., Giannopoulos G., Multi-Objective Optimization of Cutting Conditions in Milling, Proceedings on the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), 2008, pp. 763-773.
 3. Chen, F., *Mechanisms and Design of Cam Mechanisms*, Pergamon Press, USA, 1982.
 4. Deb, K., *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, J. Wiley, Chichester, England, 1991.
 5. Fonseca C. M., Fleming P.J., *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, 1993, pp. 416-423.
 6. Lampinen J., *Multiobjective Nonlinear Pareto-Optimization*, Lappeenranta University of Technology, 2000.
 7. Lee S., Wang H., Modified simulated annealing for multiple-objective engineering design optimization, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1992, pp.101-108.
 8. Mitsi, S., Bouzakis K.-D., Tsiafis J., Mansour, G., Optimal Synthesis of Cam Mechanisms using cubic spline Interpolation for Cam NC Milling, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2001, pp. 225-233.
 9. Navarro O., Wu C.-J., Angeles J., The size-minimization of planar cam mechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, 2001, pp. 371-386
 10. Norton, R., *Cam Design and Manufacturing Handbook*, Industrial Press, Inc., New York(2002).
 11. Pohlheim H., *GEATbx: Introduction, Evolutionary Algorithms: Overview, Methods and Operators*, 2006.
 12. Surry, P. D., Radcliffe, N. J. and Boyd, I. D., A multi-objective approach to constrained optimisation of gas supply networks: The COMOGA method. determination of profiles for disk cams with roller followers, *Mechanism and Machine Theory*, 2004, pp. 645-656.
 2. Bouzakis, K.-D., Paraskevopoulou R., Giannopoulos G., Multi-Objective Optimization of Cutting Conditions in Milling, Proceedings on the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), 2008, pp. 763-773.
 3. Chen, F., *Mechanisms and Design of Cam Mechanisms*, Pergamon Press, USA, 1982.
 4. Deb, K., *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, J. Wiley, Chichester, England, 1991.
 5. Fonseca C. M., Fleming P.J., *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, 1993, pp. 416-423.
 6. Lampinen J., *Multiobjective Nonlinear Pareto-Optimization*, Lappeenranta University of Technology, 2000.
 7. Lee S., Wang H., Modified simulated annealing for multiple-objective engineering design optimization, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1992, pp.101-108.
 8. Mitsi, S., Bouzakis K.-D., Tsiafis J., Mansour, G., Optimal Synthesis of Cam Mechanisms using cubic spline Interpolation for Cam NC Milling, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2001, pp. 225-233.
 9. Navarro O., Wu C.-J., Angeles J., The size-minimization of planar cam mechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, 2001, pp. 371-386
 10. Norton, R., *Cam Design and Manufacturing Handbook*, Industrial Press, Inc., New York(2002).
 11. Pohlheim H., *GEATbx: Introduction, Evolutionary Algorithms: Overview, Methods and Operators*, 2006.
 12. Surry, P. D., Radcliffe, N. J. and Boyd, I. D., A multi-objective approach to constrained optimisation of gas supply

- Evolutionary Computing, AISB
Workshop, 1995, pp166-180.
13. VDI Richtlinien 2143 (Blatt 1),
Bewegungsgesetze fuer Kurvengetriebe,
Theoretische Grundlagen, Vol. 18. VDI,
Düsseldorf, 1980.
- networks: The COMOGA method.
Evolutionary Computing, AISB
Workshop, 1995, pp166-180.
13. VDI Richtlinien 2143 (Blatt 1),
Bewegungsgesetze fuer Kurvengetriebe,
Theoretische Grundlagen, Vol. 18. VDI,
Düsseldorf, 1980.