

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES

Ing. Lubomír Sláma

**Genetický algoritmus a jeho využití pro řešení
identifikačních a optimalizačních úloh
inženýrské mechaniky**

**Solution of identification and optimisation problems
of engineering mechanics using genetic algorithms**

PhD Thesis

vědní obor

INŽENÝRSKÁ MECHANIKA

Školitel: RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Přemysl Janíček, DrSc.
Doc. Ing. Čestmír Ondrušek, CSc.
Ing. Aleš Gottvald, CSc.

Datum obhajoby: 11. 5. 2000

© 2000 L. Sláma

ISBN 80-214-1773-0

OBSAH

1. ÚVOD.....	5
2. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY ..	6
3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ JEHO ŘEŠENÍ	7
4. OPTIMALIZACE A IDENTIFIKACE PŘI POUŽITÍ GENETICKÝCH ALGORITMŮ	8
5. PRESENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ.....	10
5.1. Identifikace nelineárních charakteristik pružné a tlumící vazby dynamické soustavy	10
5.2. Optimalizace vibroizolační soustavy s jedním stupněm volnosti ..	12
5.3. Optimalizace dynamického tlumiče	14
5.4. Optimalizace aktivního dynamického tlumiče	15
5.5. Identifikace parametrů asynchronního motoru.....	16
5.6. Inverzní úloha vedení tepla.....	18
5.7. Identifikace parametrů kmitajícího nosníku.....	19
5.8. Řešení identifikačních úloh pomocí genetického programování ...	21
6. IMPLEMENTACE VÝSLEDKŮ A NÁMĚTY NA DALŠÍ VÝZKUM	23
7. ZÁVĚR.....	24
POUŽITÁ LITERATURA.....	27
SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ AUTORA.....	28
SUMMARY.....	30
ŽIVOTOPIS.....	31

1. ÚVOD

Disertační práce je zaměřena na analýzu možnosti použití genetických algoritmů na řešení identifikačních a optimalizačních úloh v inženýrské mechanice. Jedná se o rozsáhlou oblast výpočtového modelování, kdy je třeba doplnit vstupní údaje pro řešení úloh přímého modelování v případě identifikace, respektive najít takové hodnoty návrhových proměnných, při kterých navrhovaný objekt splňuje nejlépe požadavky zadání v případě optimalizace. Při řešení těchto úloh mohou nastat problémy multimodálních účelových funkcí, vícekriteriálních úloh, úloh s vícerozměrnými a rozsáhlými prostory možných řešení, případně nespojitými, špatně podmíněnými nebo nekorektními problémy. Ty často velmi limitují nebo zcela znemožňují řešení některých úloh pomocí tradičních přístupů. V takových případech může být východiskem použití některé ze stochastických metod. Mezi nejvýznamnější z nich patří v současné době genetické algoritmy, náležející do skupiny evolučních algoritmů. Předkládaná práce uvádí výchozí teoretické předpoklady pro řešení uvedených úloh pomocí genetických algoritmů, jak z hlediska základního výzkumu a rozvoje teorie genetických algoritmů, tak z pohledu jejich aplikací. Dále je vytvořen obecný rámec začlenění genetických algoritmů do množiny teorií pro řešení nepřímých úloh inženýrské mechaniky. Následně jsou vytvořené podpůrné softwarové prostředky aplikovány na vybrané úlohy v rámci řešených grantových projektů v souladu s cíly disertační práce. Mezi tyto úlohy patří simulovaná identifikace parametrů nelineárních tuhostních a tlumících charakteristik kinematically buzené soustavy, dále optimalizace pružných a tlumících vazeb kinematically buzené soustavy za účelem snížení nežádoucího přenosu vibrací. Poté úloha optimalizace podobných nelineárních vazeb dynamického tlumiče společně se současnou minimalizací přídavné hmotnosti, včetně následného rozšíření úlohy o současnou optimalizaci koeficientů regulátoru aktivní zpětné vazby. Dále identifikace parametrů náhradního schématu asynchronního motoru, a identifikace materiálových vlastností a okrajových podmínek při vedení tepla během chlazení stacionárních i rotačních ocelových povrchů. A v poslední řadě úloha identifikace parametrů tuhostní, tlumící a hmotností složky spojitého výpočtového modelu kmitajícího jednostranně vetknutého nosníku. Na testovacích příkladech je analyzováno také genetické programování, jako další rozšíření genetických algoritmů. Na základě získaných poznatků, experimentálních výsledků a jejich následného hodnocení v závěru vyplývají výrazné možnosti použití genetických algoritmů pro řešení celé řady úloh, jejichž řešení jinými metodami je ze zmíněných důvodů limitováno.

2. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Předkládaná práce vychází ze současného stavu rozvoje teorie genetických algoritmů, se zaměřením na aplikace v oblasti identifikace a optimalizace parametrů, kterou dále rozvíjí pro konkrétní případy řešení identifikačních a optimalizačních úloh v inženýrské mechanice.

Již v 50-tých létech našeho století se začala část vědců zabývat možnou analogií mezi přírodním evolučním způsobem tvorby nových živých organismů tj. objektů živé přírody a tvorbou technických objektů. Mezi prvními takto vzniklými metodami byly (v 60-tých letech) *evoluční strategie (ES)* a *evoluční programování (EP)*, které byly poté následovány (v 70-tých letech) *genetickými algoritmy (GA)* a *genetickým programováním (GP)*. Pro všechny evoluční algoritmy je typické tzv. populační prohledávání prostoru možných řešení, tj. souběžné (paralelní) analyzování více možných variant v jednom iteračním kroku, a určování dalších směrů prohledávání daného prostoru na základě stochastických evolučních a genetických operátorů, mezi které patří především operátory výběru, křížení a mutace. Jednotlivé metody se liší typem a významností použití uvedených operátorů. Přestože jsou základní principy genetických algoritmů poměrně jednoduché a existují (především na půdě universit a vědeckých institucí) jeho úspěšné aplikace, existuje zároveň mnoho nezodpovězených otázek a nevyřešených problémů. Ty se vztahují hlavně k vlastnímu chování genetických algoritmů v průběhu prohledávání prostoru možných řešení, jeho formalizaci a obecnému začlenění do množiny teorií pro řešení určitých tříd problémů. V souladu s cíly zadání této disertační práce jde konkrétně o třídu problémů spojených s řešením identifikačních a optimalizačních úloh inženýrské mechaniky v rámci systémového přístupu. V současné době existuje celá řada teorií, které patří do uvedené skupiny a lze je použít na řešení zmíněných úloh. Ovšem existují případy, kdy je lze použít jen velmi omezeně nebo vůbec. Proto je třeba dále doplňovat tuto skupinu teorií. Při řešení úloh se vyskytují problémy spojené se nestabilitou, nejednoznačností a nekorektností algoritmu inverzní úlohy. Algoritmus může být nestabilní jednak vzhledem ke vstupním údajům, kdy malé změny na vstupu vyvolávají velké změny na výstupu, a nebo může být numericky nestabilní v případě nežádoucího vlivu zaokrouhlovacích chyb na výsledky řešení. Problém nejednoznačnosti nastává tehdy, když stejným vstupním údajům nejsou jednoznačně přiřazeny výstupy. Za nekorektní proces je chápán celý soubor problémů, které mohou nastat jako např. nestabilita, víceznačnost, nereálnost nebo neexistence řešení. Stávající aplikace genetických algoritmů na řešení identifikačních a optimalizačních úloh v inženýrské mechanice se vztahují pouze k určitým speciálním případům. Mezi jejich typické znaky patří značná rozdílnost ve zvolených postupech řešení a jistá nesystematičnost, což má za následek sníženou vypovídající hodnotu o obecných možnostech a limitujících faktorech genetických algoritmů. V dostupných

publikacích chybí obecný postup řešení dané třídy úloh se začleněním do obecného rámce tvorby technických objektů, což by umožnilo lepší posouzení jejich možností v kontextu množiny známých teorií pro řešení identifikačních a optimalizačních úloh inženýrské mechaniky.

3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ JEHO ŘEŠENÍ

Provést analýzu použití genetických algoritmů na řešení identifikačních a optimalizačních úloh v inženýrské mechanice včetně řešení některých konkrétních úloh, jejichž výběr je v souladu s vymezením inženýrské mechaniky [8], a které jsou řešeny v rámci grantových projektů na pracovištích laboratoře mechatroniky a laboratoře termomechaniky.

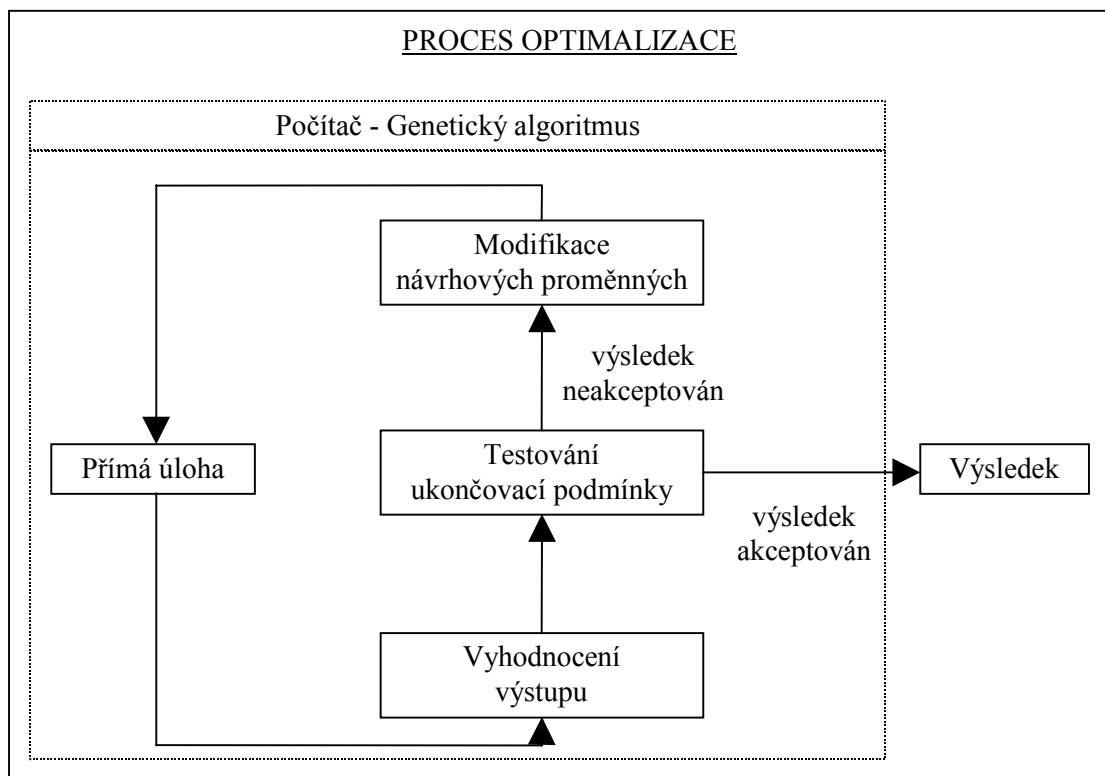
Díličí cíle lze formulovat do následujících bodů:

- Analyzovat současný stav vědeckého poznání o teorii a aplikacích genetických algoritmů.
- Posoudit možnosti a vymežit začlenění genetických algoritmů do procesu výpočtového modelování v souvislosti s identifikací a optimalizací.
- Navrhnout a rozpracovat takový typ genetického algoritmu, který bude vhodný pro řešení uvedených optimalizačních a identifikačních úloh.
- Aplikovat navržený genetický algoritmus na řešení konkrétních problémů z oblasti inženýrské mechaniky, jejichž výběr je dán aktuálními problémy řešenými v rámci národních i mezinárodních grantových projektů v laboratořích mechatroniky a termomechaniky FS VUT Brno. V oblasti dynamiky mezi takové problémy patří například identifikace parametrů tuhosti a tlumení nelineárních vazeb dynamických soustav. Dále optimalizace uvedených vazeb, včetně hmotností v soustavě dynamického tlumiče. V oblasti termomechaniky se jedná o úlohy spojené s identifikací materiálových vlastností a okrajových podmínek při povrchovém chlazení konstrukčních materiálů. Poslední třídou jsou problémy v interdisciplinární oblasti elektromechanických a mechatronických soustav spočívající v identifikaci parametrů náhradního schématu asynchronního motoru, nebo optimalizaci parametrů aktivní vibroizolační soustavy.
- Zhodnotit dosažené výsledky u jednotlivých aplikací a vyvodit obecné závěry jak v teoretické tak aplikační rovině, s výhledem na další rozvoj a možnosti použití genetických algoritmů v oblasti řešení identifikačních a optimalizačních úloh v inženýrské mechanice.

4. OPTIMALIZACE A IDENTIFIKACE PŘI POUŽITÍ GENETICKÝCH ALGORITMŮ

Genetické algoritmy dovolují přistupovat k řešení optimalizačních a identifikačních úloh velmi podobně. Rozdíl je ve tvaru účelové funkce. Představíme-li si identifikaci jako proces minimalizace rozdílu mezi skutečnou požadovanou hodnotou na výstupu přímé úlohy a hodnotou vypočítanou po dosažení návrhu hledaných parametrů, pak lze stejnou úlohu formulovat jako optimalizaci, přičemž optimum spočívá v nulovém rozdílu mezi skutečnou a vypočítanou hodnotou.

Při využití genetického algoritmu je činnost konstruktéra v podobě vyhodnocování výstupu, posuzování naplnění podmínek zadání a heuristického nastavování jiných hodnot návrhových proměnných nahrazena GA. Na obrázku 1 je zřejmá změna v procesu optimalizace, spočívající v přenesení činností vykonávaných konstruktérem do počítače prostřednictvím GA [1]. Strategie nastavování jiných hodnot návrhových proměnných, která využívá u GA stochastických operátorů, je často podobná strategii konstruktéra. GA obdobně jako konstruktér prvně hledá v prostoru možných řešení „nadějně oblasti“ a v dalším postupu se soustřeďuje pouze na několik nejzajímavějších. Díky vysoké výpočetní rychlosti počítačů, na kterých je GA implementován, je ovšem jeho rychlost prohledávání stavového prostoru nesrovnatelně vyšší než u konstruktéra.



Obr. 1: Začlenění GA do procesu optimalizace.

Nevýhodou GA, z hlediska srovnání s prací konstruktéra, jsou chybějící znalosti a zkušenosti s řešeným problémem, díky nimž se může konstruktér vyvarovat prohledávání některých oblastí, o kterých usoudí přímo bez zkoušení, že neobsahují

globální optimum. Může nastat ovšem i obrácená situace, kdy ku prospěchu věci, GA vyzkouší takové kombinace hodnot návrhových proměnných, které by konstruktéra, zatíženého určitými zkušenostmi a "předsudky", ani nenapadlo zkoušet. Zvýšení efektivity může být v některých případech dosaženo spojením GA s jinou metodou, jako například expertními systémy, za účelem souběžného využití prohledávací síly GA a dostupných informací a znalostí o daném problému [3].

Postup řešení identifikačních a optimalizačních úloh pomocí GA

Prvotním předpokladem je provedení tzv. nultého kroku, při kterém řešitel R problému $P_R(\Omega)$ účelově vymezí na objektu Ω systém veličin $\Sigma(\Omega)$, který se skládá ze subsystému známých veličin $\Sigma_z(\Omega)$ a subsystému neznámých veličin $\Sigma_n(\Omega)$. Znamé veličiny tvoří přímo určitelné veličiny v případě identifikace nebo také veličiny deterministicky zadané v požadavku zadání v případě optimalizace. Subsystém $\Sigma_n(\Omega)$ obsahuje buď nepřímo určitelné vstupní údaje pro přímé modelování při identifikaci nebo návrhové proměnné při optimalizaci a je zadán možným oborem hodnot, který představuje tzv. stavový prostor, nebo-li prostor možných řešení. Dále se předpokládá vytvoření vhodného abstraktního matematického modelu M objektu Ω v podobě algebraických, diferenciálních nebo integrálních rovnic sestavených na základě vybrané teorie τ z množiny teorií $\Sigma_\tau(\Omega)$.

První krok je sestavení účelové funkce, jejíž tvar je důležitý při volbách v dalších krocích. Její tvar musí být volen tak, aby funkce jednoznačně vyjadřovala rozdíl mezi experimentálně zjištěnými hodnotami požadovanými na výstupu přímé úlohy a hodnotami vypočtenými po dosažení posuzovaného návrhu řešení v případě identifikace, resp. rozdíl mezi zadanou optimální hodnotou na výstupu přímé úlohy a opět hodnotou vypočtenou po dosažení posuzovaného návrhu řešení v případě optimalizace. Kromě požadavku na zohlednění důležitosti jednotlivých parametrů chování Ω je na místě také požadavek na co nejnižší časovou náročnost výpočtu účelové funkce. Velikost absolutního vyjádření uvedeného rozdílu je důležitá pouze pro některé typy operátorů, u některých typů nemá na konečný výsledek žádný vliv.

V druhém kroku je třeba na základě povahy problému, jeho matematickém modelu a tvaru účelové funkce zvolit způsob kódování hledaného řešení. Pro řešení úloh vymezených v předchozích kapitolách je pravděpodobně nejvhodnější reprezentace reálnými čísly bez kódování do binárního tvaru.

Postup inicializace ve třetím kroku závisí na tom, zda-li máme již nějaké dříve získané odhady řešení či nikoliv. Pokud již máme jeden nebo více nadějných odhadů řešení, můžeme jimi částečně nebo úplně tzv. nakrmit prvotní populaci. Jinak bude datová struktura naplněna náhodně ze zadaného prostoru možných řešení.

Ve čtvrtém kroku je potřeba zvolit některou z výběrových metod, například metodu proporcionálního výběru, Boltzmanovu metodu, metodu zkráceného, lineárního či exponenciálního tříděného výběru nebo metodu turnajového výběru.

V pátém kroku se volí operátory křížení a mutace. V případě, kdy je upřednostňováno kódování reálnými čísly, si může řešitel vybrat například křížení v jednom, ve dvou nebo více místech, uniformní křížení, aritmetické nebo

heuristické křížení a z oblasti mutačních operátorů se nabízí např. uniformní, hraniční nebo neuniformní mutace.

Posledním krokem je zavedení ukončovací podmínky. Mezi nejčastěji používaná kritéria patří kromě posuzování, zda-li stávající nejlepší hodnota účelové funkce vyhovuje požadavkům zadání, také zadání maximálního počtu cyklů nebo minimálního gradientu průběhu konvergence účelové funkce.

Pro správné posouzení získaných výsledků je vhodné (především při prvním testování a ladění algoritmu) několikanásobné opakování celého výpočetního cyklu a následné statistické vyhodnocení obdržené množiny nezávislých výsledných návrhů řešení.

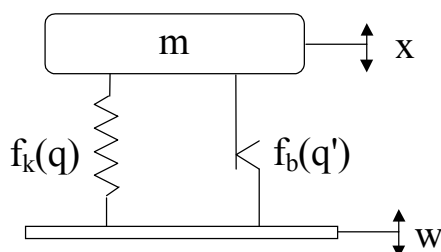
5. PRESENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Při presentaci výsledků je na začátku zmíněna motivace pro řešení daného problému a následuje jeho formulace. Poté je uveden matematický model soustavy. Zároveň je vymezen systém veličin s rozdělením na subsystém známých veličin a subsystém neznámých veličin. Druhá část je věnována vlastním výsledkům výpočtových experimentů, a to jak z hlediska kvality řešení dané úlohy tak chování genetického algoritmu. Na závěr je uvedeno souhrnné hodnocení výsledků.

5.1. Identifikace nelineárních charakteristik pružné a tlumící vazby dynamické soustavy

První úloha byla zaměřena na využití GA pro řešení úlohy simulované identifikace koeficientů matic tuhosti a tlumení matematického modelu kinematically buzené soustavy s nelineární pružinou a tlumením. Úloha byla formulována následovně: *určení hodnot parametrů zadaných funkčních výrazů pro nelineární charakteristiky pružných a tlumících vazeb v kinematically buzené soustavě na základě známých průběhů výchylek budící základny a průběhů zrychlení buzeného tělesa. Pro jednotlivé parametry jsou zadány obory hodnot, kterých mohou nabývat.*

Uvedená soustava byla nahrazena následujícím abstraktním modelem, viz. obr.2. Těleso m je kinematically buzeno přes nelineární pružnou $f_k(q)$ a tlumící $f_b(q')$ vazbu harmonickými kmity základny ve tvaru $w = W_o \sin(\omega t)$.



Obr. 2: Schéma modelu.

Matematický model tvoří následující soustava rovnic:

$$m \cdot x'' + f_b(x', w') + f_k(x, w) = 0, \quad (1)$$

jejíž část $f_b(x', w') + f_k(x, w)$ představuje nelineární pružnou a tlumící vazbu. Po nahrazení $q = x - w$, resp. $q' = x' - w'$, lze obě vazby vyjádřit vztahy:

$$f_k(q) = \begin{cases} q \geq x_0 \rightarrow f_k(q) = k_0 + e \cdot (q - x_0) \\ q < x_0 \rightarrow f_k(q) = q \cdot k_0 / x_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$f_b(q') = b_0 + b_1 \cdot (q' - v_0) + b_2 (q' - v_0)^2, \quad (3)$$

kde x_0, k_0, e resp. b_0, b_1, b_2, v_0 jsou parametry příslušných nelineárních průběhů. Kombinací různých hodnot ze zadaných rozsahů pro parametry $x_0, k_0, e, b_0, b_1, b_2, v_0$ lze vytvořit lineární a nelineární charakteristiky pružné a tlumící vazby několika různých symetrických typů.

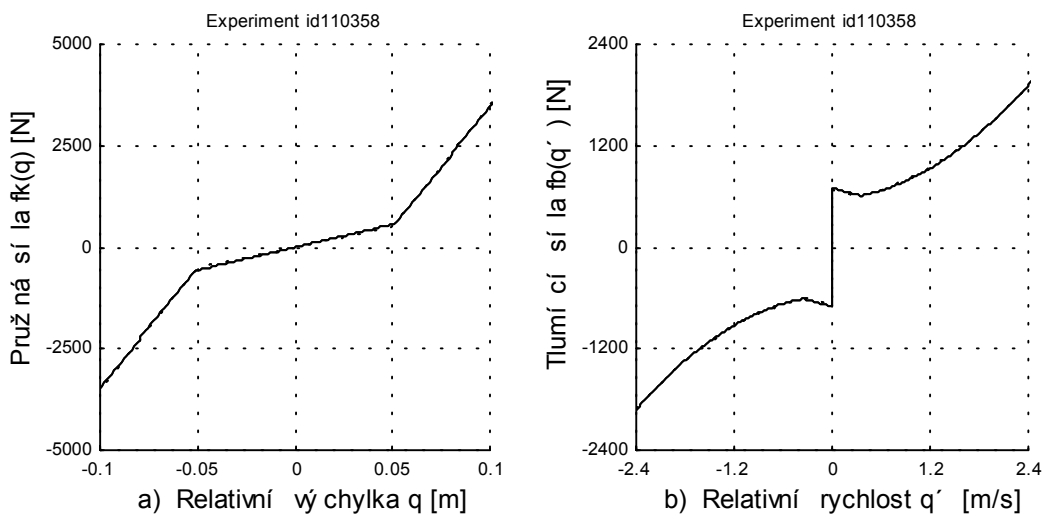
Subsystem známých veličin $\Sigma_z(\Omega)$ je tvořen hmotností buzeného tělesa m , amplitudou výchylky budící základny W_0 , budící frekvencí ω a zrychlením buzeného tělesa x'' . Subsystem neznámých veličin $\Sigma_n(\Omega)$ je tvořen parametry funkčního výrazu pro pružnou vazbu $f_k(q)$, tj. x_0, k_0, e a parametry funkčního výrazu pro tlumící vazbu $f_b(q')$, které jsou b_0, b_1, b_2, v_0 .

Výsledek takto zadané úlohy je uveden v tabulce 1.

Označ.	Veličiny z $\Sigma_n(\Omega)$,							f_E
	x_0	k_0	e	v_0	b_0	b_1	b_2	
Vzor	0.05	500	60000	0.30	600	200	200	0
Návrh	0.05	581	59478	0.35	610	192	220	0.3

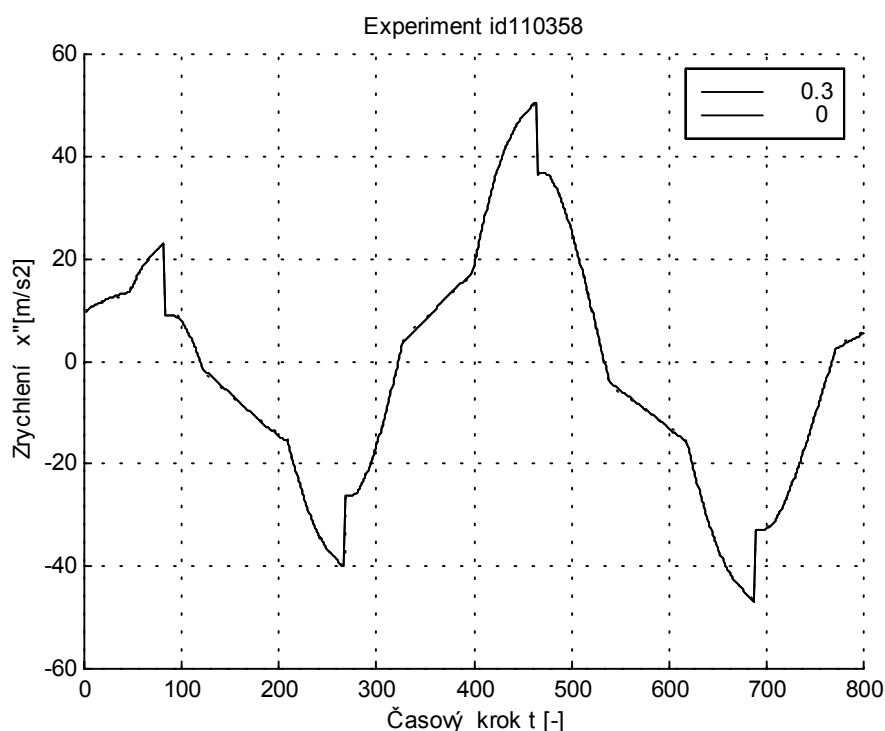
Tab. 1: Výsledný návrh řešení.

Porovnání výsledných pružných a tlumících charakteristik se vzorovými průběhy je provedeno na obrázku 3, kde jsou identifikované průběhy provedeny plnou čarou a původní vzorové průběhy čárkovanou čarou. Obě křivky se téměř ztotožňují se svými vzory, což znamená dobrý výsledek řešení zadané úlohy.



Obr. 3: Výsledné průběhy tuhostních a tlumících charakteristik.

Na obrázku 4 je vypočítaný průběh zrychlení zobrazený plnou čarou a vzorový (žádaný) průběh zrychlení čárkovanou čarou.



Obr. 4: Výsledný průběh vzorového a vypočítaného zrychlení.

Prezentované výsledky výpočetních experimentů vypovídají pozitivně o možnosti použití genetických algoritmů na řešení zadané úlohy. Důležitou součástí řešení úlohy bylo ladění vnitřních nastavení a parametrů algoritmu za účelem zefektivnění jeho činnosti. Konečné nastavení algoritmu bylo provedeno jak na základě empirických poznatků z provedených výpočetních experimentů, tak na základě existujících teoretických hypotéz o obecném chování genetických algoritmů. Nejlépe se osvědčilo nastavení s turnajovým výběrem, heuristickým křížením a vícenásobnou neuniformní mutací. Kromě genetických algoritmů byla zkoušena možnost využití simulovaného žíhání na řešení dané úlohy. Pro tyto účely byla použita jedna z nejvyspělejších modifikací simulovaného žíhání tzv. velmi rychlé simulované přežíhávání (Very Fast Simulated Reannealing). Porovnání výsledků je uvedeno například v [A29]. Oba přístupy prokázaly schopnost řešit dostatečně dobře zadanou úlohu, přičemž drobné rozdíly lze přičíst na vrub především aktuálnímu nastavení interních parametrů obou algoritmů. Další možnost lepšího nastavení interních parametrů genetického algoritmu představuje implementace tzv. metaoptimalizace, viz.[5].

5.2. Optimalizace vibroizolační soustavy s jedním stupněm volnosti

Podobnost mezi přístupem k řešení identifikační a optimalizační úlohy pomocí GA je demonstrována na úloze optimalizace vibroizolační soustavy s jedním

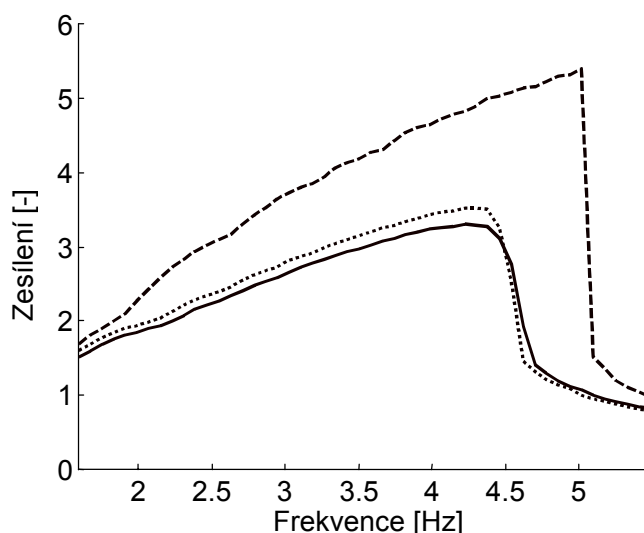
stupněm volnosti. Tato úloha vychází z předchozí identifikační úlohy, pouze byla následně přeformulována jako optimalizační: *stanovení optimálních hodnot parametrů zadaných funkčních výrazů pro nelineární charakteristiky pružné a tlumící vazby v kinematicky buzené soustavě za účelem snížení amplitud výchylek zátěžného tělesa v zadaném frekvenčním rozsahu. Pro jednotlivé parametry jsou zadány obory hodnot, kterých mohou nabývat.*

Subsystem známých veličin $\Sigma_z(\Omega)$ je tvořen amplitudou výchylky budící základny W_o , budící frekvencí ω a zrychlením buzeného tělesa x'' . Subsystem návrhových proměnných $\Sigma_n(\Omega)$ je tvořen parametry funkčního výrazu pro pružnou vazbu k_1, k_2 , parametry funkčního výrazu pro tlumící vazbu b_0, b_1, b_2, v_0 a hmotností m .

Výsledky jsou uvedeny v tabulce 2, která obsahuje 2 nezávislé návrhy hodnot parametrů z $\Sigma_n(\Omega)$. Zároveň jsou pro jednotlivé návrhy vykresleny příslušné amplitudově-frekvenční charakteristiky na obrázku 5. Návrh 1 je vykreslen plnou čarou a návrh 2 vyznačen tečkovaně. Původní průběh je vykreslen čárkovaně.

Označ.	Veličiny z $\Sigma_n(\Omega)$,							f_o
	k_1	k_2	V_0	b_0	b_1	b_2	m	
Návrh 1	4989	800356802	0.01	0.998	99	519	15.0	2.29
Návrh 2	4921	820359901	0.01	0.989	99	516	15.1	2.36

Tab. 2: Výsledné návrhy řešení.



Obr. 5: Původní a výsledné průběhy amplitudově-frekvenční charakteristiky.

Z výsledků je zřejmá opakovaná konvergence algoritmu ke globálnímu optimu, v rámci zadaných oborů hodnot. GA prokázal schopnost účinně řešit zadanou optimalizační úlohu, vycházející z předchozí identifikační úlohy, aniž by byl řešitel úlohy nucen změnit výrazně přístup k celému problému. V důsledku výpočetně náročnější optimalizační funkce ve srovnání s kritériální funkcí v předchozí úloze

(časový průběh zrychlení) byla několikanásobně zvýšena časová náročnost řešení dané úlohy, řádově z minut na hodiny.

5.3. Optimalizace dynamického tlumiče

V další úloze byla k základní soustavě kinematically buzeného primárního tělesa m_1 připojena přídatná soustava tělesa m_2 připojeného k m_1 přes tlumící prvek f_b a pružný element f_k . Úloha byla formulována jako: *stanovení optimálních hodnot parametrů zadaných funkčních výrazů pro nelineární charakteristiky přídatné pružné a tlumící vazby, včetně hmotnosti přídatného tělesa, v kinematically buzené soustavě za účelem snížení amplitud výchylek zátěžného tělesa primární soustavy v zadaném frekvenčním rozsahu.*

Pro uvažovanou soustavu se dvěma stupni volnosti plynou pohybové rovnice

$$m_1 \cdot x_1'' + f_b(x_1', x_2') + K \cdot (x_1 - w) + f_k(x_1, x_2) = 0, \quad (4)$$

$$m_2 \cdot x_2'' + f_b(x_2', x_1') + f_k(x_2, x_1) = 0, \quad (5)$$

kde K reprezentuje celkový koeficient tuhosti lineární pružiny, na které je uložena hmotnost m_1 . Soustava je kinematically buzena přes základnu harmonickými kmity s výchylkou $w = W_o \sin(\omega t)$. Tlumící síla přídatného tlumiče f_b je vyjádřena vztahem

$$f_b(q') = b_1 \cdot q' + b_2 \cdot q'^3, \quad (6)$$

kde b_1 a b_2 představují koeficienty lineárního a kubického členu. Zároveň je ve výrazu použito nahrazení $q' = x_1' - x_2'$ platné pro rovnici (4), resp. $q' = x_2' - x_1'$ platné pro rovnici (5). Vratná síla nelineární pružiny f_k je vyjádřena vztahem

$$f_k(q) = k_1 \cdot q + k_2 \cdot q^3, \quad (7)$$

kde k_1 a k_2 představuje koeficienty lineárního a kubického členu. Bylo zavedeno nahrazení $q = x_1 - x_2$ platné pro rovnici (4), resp. $q = x_2 - x_1$ pro rovnici (5).

Subsystém známých veličin $\Sigma_z(\Omega)$ je tvořen amplitudou výchylky budící základny W_o , budící frekvencí ω , zrychlením primárního tělesa x_1'' , celkovou tuhostí pružného uložení primární soustavy K a hmotností m_1 . Subsystém $\Sigma_n(\Omega)$ je tvořen parametry funkčního výrazu pro přídatnou pružnou vazbu k_1 , k_2 , parametry funkčního výrazu pro přídatnou tlumící vazbu b_1 , b_2 a hmotností tělesa m_2 . Kvalita návrhu je posuzována dle snížení průběhu amplitudově-frekvenční charakteristiky v zadaném rozsahu frekvencí a minimalizace přídatné hmotnosti m_2 vážené koeficientem W .

Hodnota	Veličiny z $\Sigma_n(\Omega)$,					Optimalizační funkce		
W	k_1	k_2	b_1	b_2	m	f_{af}	f_{m2}	f_o
0.0005	1197	5362314	10	456	1.76	0.00205	0.00088	0.00293

Tab. 3: Výsledné návrhy řešení.

Výsledné hodnoty návrhových proměnných jsou uvedeny v tabulce 3 a odpovídající průběh amplitudově-frekvenční charakteristiky je uveden na obr 7.

Hodnota optimalizační funkce v tab.3 je rozdělena na podíl amplitudově-frekvenční charakteristiky a podíl přídavné hmotnosti m_2 . V opakovaných nezávislých výpočtech GA konvergoval ke shodným řešením. Získané výsledky potvrdily schopnost GA řešit danou úlohu.

5.4. Optimalizace aktivního dynamického tlumiče

Předchozí úloha byla dále rozšířena o aktivní zpětnou vazbu. Akční člen vyvolující sílu F_a je připojen paralelně s nelineární pružinou a tlumičem mezi primární těleso m_1 a přídavné těleso m_2 , viz. obr.6. Nelineární tlumič a pružina jsou stejného typu jako v kap.5.3. Úloha je formulována jako: *stanovení optimálních hodnot parametrů zadaných funkčních výrazů pro nelineární charakteristiky přídavné pružné a tlumicí vazby, včetně hmotnosti přídavného tělesa, společně s koeficienty regulátoru v kinematicky buzené soustavě za účelem snížení amplitud výchylek zátěžného tělesa primární soustavy v zadaném frekvenčním rozsahu.*

Pro tvorbu matematického modelu byla jeho hlavní část převzata z předchozí kapitoly a byla nově doplněna o silové působení akčního členu. Po této úpravě byly původní pohybové rovnice modifikovány do tvaru:

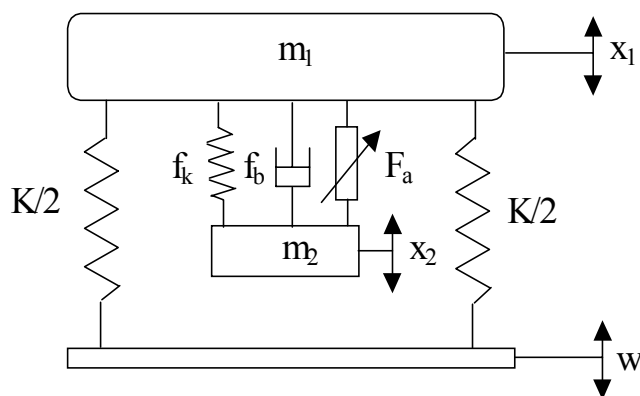
$$m_1 \cdot x_1'' + f_b(x_1', x_2') + K \cdot (x_1 - w) + f_k(x_1, x_2) = -F_a, \quad (8)$$

$$m_2 \cdot x_2'' + f_b(x_2', x_1') + f_k(x_2, x_1) = F_a, \quad (9)$$

kde je silové působení akčního členu reprezentováno veličinou F_a pro jejíž výpočet platí vztah

$$F_a = K_1 x_1'' + K_2 x_1' + K_3 x_2'' + K_4 x_2', \quad (10)$$

kde K_1 , K_2 , K_3 a K_4 představují návrhové koeficienty regulátoru.



Obr. 6: Schéma zapojení aktivního prvku.

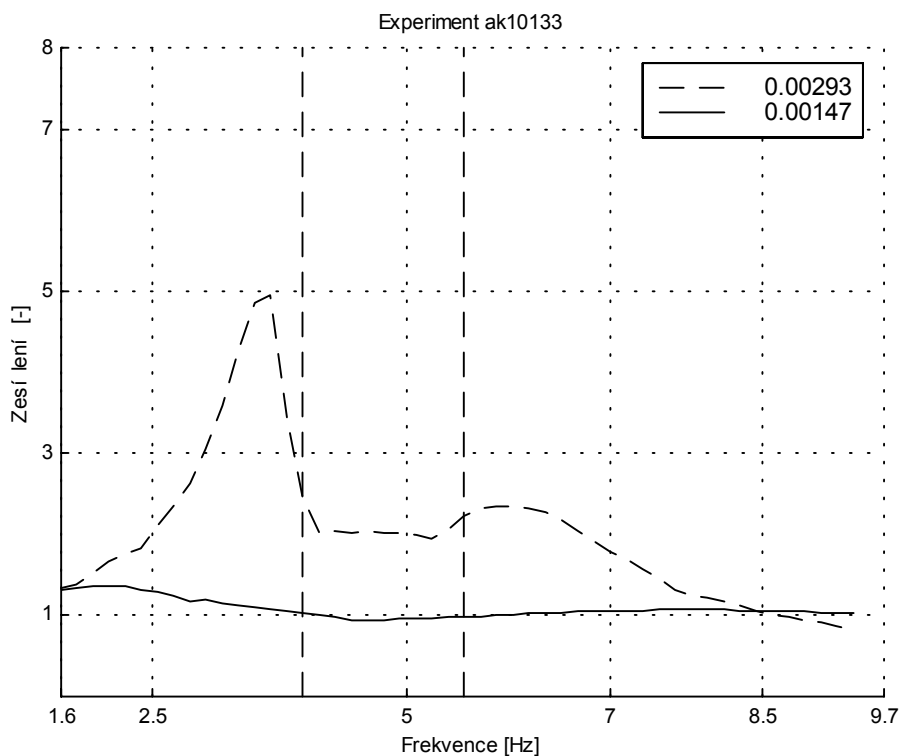
Subsystem známých veličin $\Sigma_z(\Omega)$ je tvořen amplitudou výchylky budící základny W_o , budící frekvencí ω , zrychlením primárního tělesa x_1'' , celkovou tuhostí pružného uložení primární soustavy K a hmotností m_1 . Subsystem návrhových proměnných $\Sigma_n(\Omega)$ je tvořen parametry funkčního výrazu pro přídavnou pružnou vazbu k_1 , k_2 , parametry funkčního výrazu pro přídavnou tlumicí vazbu b_1 , b_2 , hmotností přídavného tělesa m_2 a návrhovými koeficienty regulátoru K_1 , K_2 , K_3 , K_4 .

GA dosáhl po 100 generacích následujícího výsledku (tab.4).

Označ.	Veličiny z $\Sigma_n(\Omega)$,									f_o
	K_1	K_2	K_3	K_4	k_1	k_2	b_1	b_2	m_2	
č. 1.	21	17	3.4	45	1029	5243769	11	484	1.0	0.00147

Tab. 4: Výsledné návrhy řešení.

Na obrázku 7 je plnou čarou zobrazena amplitudově-frekvenční charakteristika vypočítaná pro výsledný návrh optimalizovaných parametrů. Původní charakteristika před připojením aktivního prvku je znázorněna čárkovaně. Získané výsledky vyhovují požadavkům zadání a zároveň průběhy konvergence vypovídají o správném chování algoritmu. Ve změnách účinnosti řešení dané optimalizační úlohy se projeví velké rozdíly v absolutním vyjádření hodnot optimalizační funkce pro zadané obory hodnot a existence řady ostrých optim.



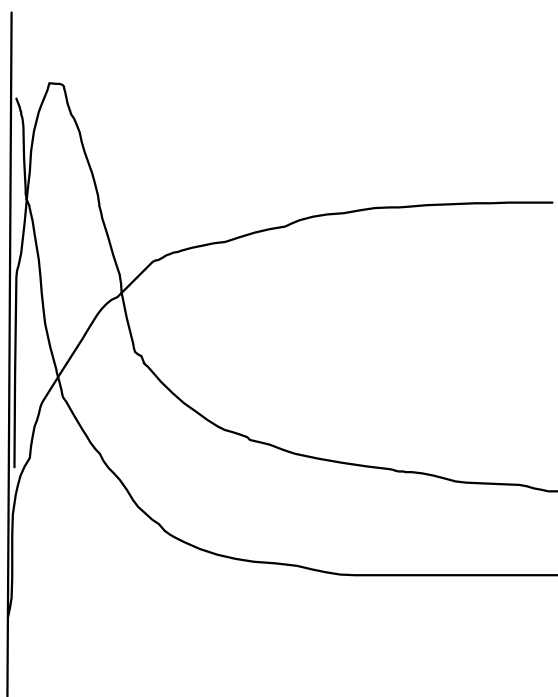
Obr. 7: Amplitudově-frekvenční charakteristika pasivně a aktivně tlumené soustavy.

5.5. Identifikace parametrů asynchronního motoru

Při modelování elektromechanických soustav může často subsystém neznámých veličin $\Sigma_n(\Omega)$ obsahovat kromě mechanických veličin také elektrické veličiny. V presentované úloze je cílem doplnit výpočtový model asynchronního motoru o neznámé hodnoty odporů a indukčností. Problém byl formulován jako: *určení hodnot odporů a indukčností zadaného náhradního schématu asynchronního motoru*

na základě známých provozních charakteristik motoru a zadaných oborů hodnot pro jednotlivé hledané parametry.

Pro výpočet odezvy asynchronního motoru v podobě provozních charakteristik, tj. závislosti momentu, fázového proudu a účinníku na otáčivé rychlosti v ustáleném stavu lze použít soustavu diferenciálních rovnic buď v přirozených nebo transformovaných souřadnicích. Vycházejíc ze zadání úlohy, byl daný asynchronní motor s kotvou nakrátko nahrazen náhradním schématem, viz. obr. 9. Náhradní schéma obsahuje 4 dvojice neznámých odporů a indukčností. Ve schématu představuje R_s odpor vinutí jedné fáze statoru, R_r odpor vinutí jedné fáze rotoru, U_s napětí fáze statoru, R_{sr} ztráty v železe a L_{ss} , L_{rr} resp. M_{sr} vzájemné a vlastní indukčnosti. Bylo zavedeno následující označení: $R_s=R_1$, $L_{ss}-M_{sr}=L_1$, $R_{sr}=R_2$, $M_{sr}=L_2$, $L_{r1}=L_3$, $R_{r1}/s=R_3$, $L_{r2}=L_4$ a $R_{r2}/s=R_4$. Skupina parametrů R_1 , L_1 , R_2 , L_2 , R_3 , L_3 , R_4 a L_4 tvoří subsystém návrhových proměnných $\Sigma_n(\Omega)$. Pro určení neznámých indukčností byly identifikovány příslušné reaktance X_1 , X_2 , X_3 a X_4 .



Obr. 8: Vzorové a výsledné průběhy sledovaných veličin.

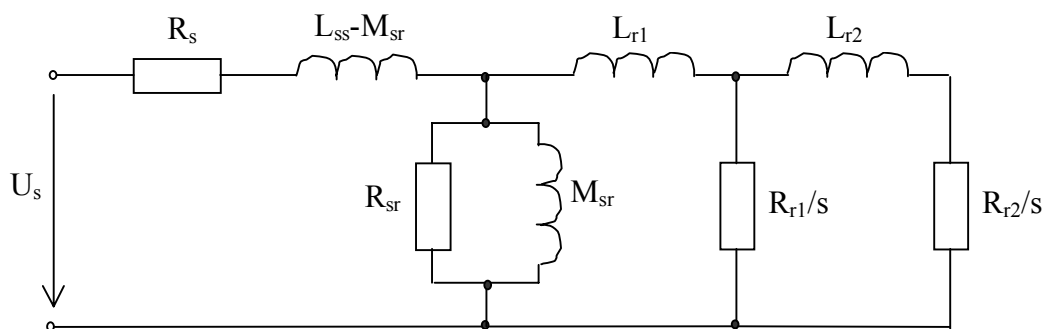
Presentovány jsou výsledky experimentů na motoru o výkonu 312kW napájeným fázovým napětím 380V o harmonické frekvenci 50Hz v uspořádání s dvojitou klecí.

$R_1 (\Omega)$	$X_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	$X_2 (\Omega)$	$R_3 (\Omega)$	$X_3 (\Omega)$	$R_4 (\Omega)$	$X_4 (\Omega)$
0.039	0.422	11.148	6.223	0.076	0.0102	0.036	0.205

Tab. 5: Výsledný návrh řešení.

V rámci identifikačních experimentů byly naměřeny diskrétní hodnoty provozních charakteristik pro 11 hodnot skluzu s , viz. obr.8. Po zadání těchto vstupních hodnot

do implementovaného genetického algoritmu společně s výpočtovým modelem byly získány výsledky uvedené v tabulce 5 a znázorněné plnou čarou na obrázku 8.



Obr. 9: Rozšířené náhradní schéma.

Genetické algoritmy ukázali schopnost spolehlivě konvergovat k hledanému globálnímu extrému dané kriteriální funkce při zadaném širokém prostoru možných řešení bez potřeby dobrých počátečních odhadů.

5.6. Inverzní úloha vedení tepla

Inverzní úloha vedení tepla patří mezi aktuální úlohy inženýrské mechaniky, které jsou zaměřeny na identifikaci materiálových vlastností nebo okrajových podmínek. V daném případě šlo o dvě nezávislé následně formulované úlohy:

- stanovení tepelné vodivosti a součinu hustoty a tepelné kapacity na základě známých průběhů teplotních polí v zadaném místě chlazeného materiálu při znalosti součinitele přestupu tepla a počátečních podmínek.
- stanovení časového průběhu součinitele přestupu tepla současně s časovou konstantou termočlánu na základě známých průběhů teplot v zadaném místě materiálu při znalosti počátečních podmínek, včetně materiálových vlastností.

V obou případech patří do $\Sigma_z(\Omega)$ časový průběh teploty T_m v daném místě materiálu. V prvním případě jsou navíc známy součinitel přestupu tepla a počáteční teplota. Mezi veličiny $\Sigma_n(\Omega)$ patří tepelná vodivost a součin hustoty s tepelnou kapacitou. Ve druhém případě patří materiálové vlastnosti do množiny $\Sigma_z(\Omega)$, a do $\Sigma_n(\Omega)$ je zařazen součinitel přestupu tepla a časová konstanta termočlánu τ .

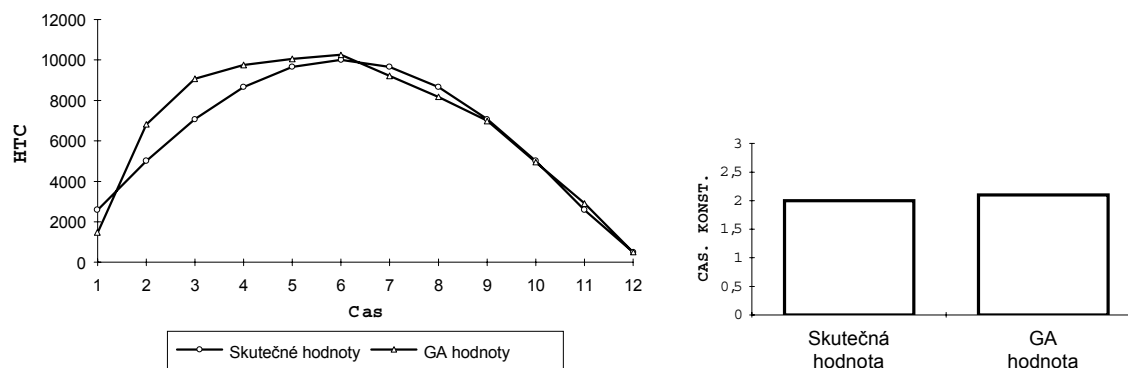
Výsledky identifikace materiálových vlastností jsou uvedeny v tabulce 6.

	K_1	K_2	K_3	K_4
Vzorová hodnota	15.0	0.013	4.10×10^6	900
Identifikovaná hodnota	17.7	0.011	4.34×10^6	603

Tab. 6: Výsledný návrh řešení.

Teplotní průběh vypočítaný na základě navržených hodnot z tab.6 se lišil od vzorového průběhu pouze v rozmezí do 0,1%. Ve druhém případě zaměřeném na identifikaci součinitele přestupu tepla a časové konstanty termočlánu byla v první etapě realizována úloha simulované identifikace. Průběh vzorového součinitele

přestupu tepla je vykreslen na obrázku 10 a označen jako skutečné hodnoty. Jeden z výsledků je zobrazen na stejném obrázku, jako tzv. GA hodnoty. Zároveň je prezentován výsledek souběžné identifikace časové konstanty termočlánku.



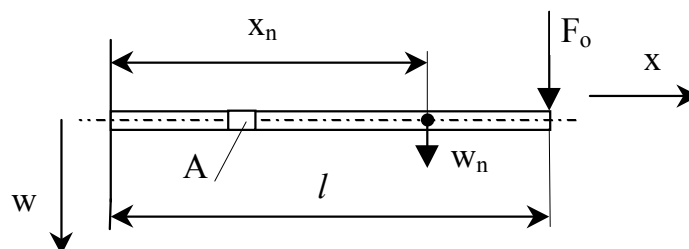
Obr. 10: Vzorové a výsledné návrhy řešení.

Výsledné průběhy teplot se shodovaly dostatečně přesně se zadaným vzorovým průběhem, čímž byla potvrzena kvalita nalezeného řešení. Správnost uvedeného přístupu byla následně potvrzena při identifikaci reálného procesu v laboratoři.

V uvedené úloze nešlo o standardní hledání koeficientů známého funkčního tvaru, ale hledání diskrétních bodů neznámé křivky. Tento přístup může být volen v celé řadě jiných případů, kdy je neznámý funkční tvar hledané křivky. Výsledek mohou nepříznivě ovlivnit oscilace jednotlivých bodů, což lze částečně překlenout doplňkem v kriteriální funkci penalizujícím nežádoucí oscilace. Omezující může být velké množství hledaných bodů, což výrazně zvyšuje časovou náročnost výpočtů. Jinou alternativu představuje genetické programování, viz. kap.5.

5.7. Identifikace parametrů kmitajícího nosníku

Kromě identifikace parametrů soustav se soustředěnými parametry v předchozích úlohách, byla pozornost věnována také oblasti identifikace parametrů soustav se spojitými parametry. Příkladem je úloha identifikace parametrů kmitajícího jednostranně vetknutého nosníku s respektováním vnějšího tlumení.



Obr. 11: Schématické zobrazení uvažovaného nosníku.

Úloha byla formulována jako *určení hodnoty modulu pružnosti, součinitele vnějšího tlumení a hustoty materiálu daného jednostranně vetknutého nosníku na základě známých počátečních a okrajových podmínek a známého časového průběhu výchylky nosníku v zadané vzdálenosti od počátku.*

Při vytváření matematického modelu se vycházelo z Bernoulliovy-Eulerovy teorie. Pohybová rovnice pro příčný pohyb kolmo k ose x byla napsána ve tvaru

$$A(x)dx\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial Q}{\partial x} dx + qdx, \quad (11)$$

kde je $A(x)$ plocha průřezu, ρ hustota, Q posouvající síla a $q(x,t)$ zastupuje vnější jednotkové zatížení [4]. Dále je uvažovaná momentová rovnice rovnováhy ve tvaru

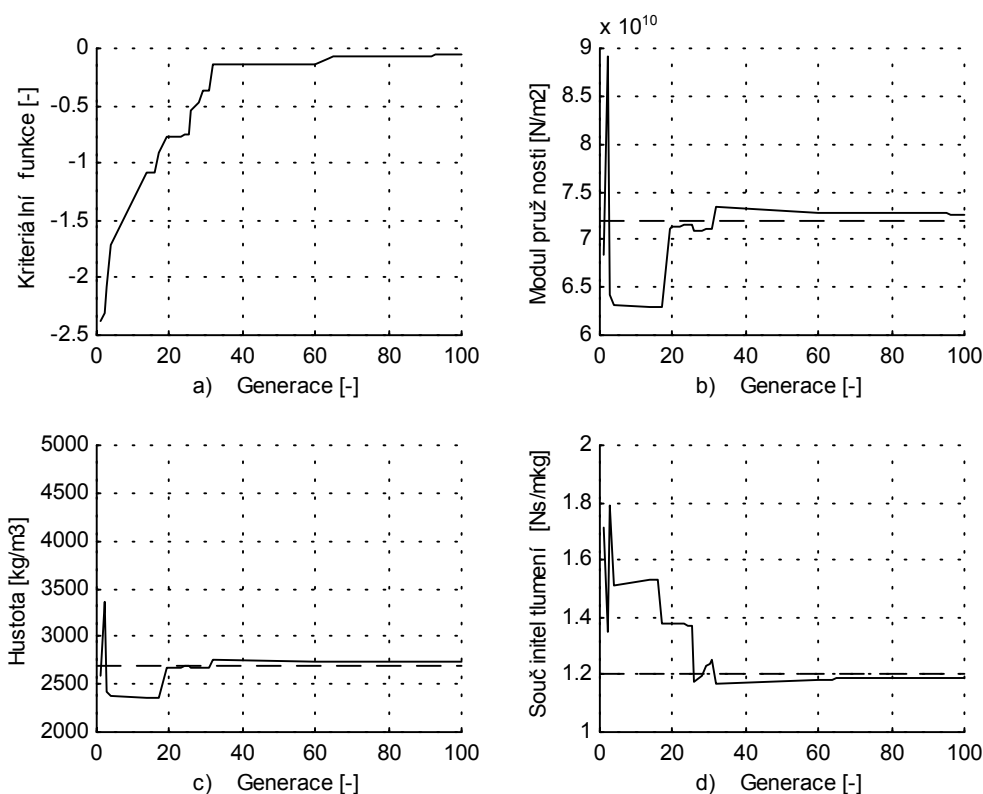
$$M = -EJ(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (12)$$

kde $J(x)$ představuje kvadratický moment průřezu a společně s modulem pružnosti E tvoří tuhostní složku v soustavě rovnic popisující uvažovanou soustavu [2].

Pro výpočtové experimenty simulované identifikace výše uvedených parametrů byl nejdříve přímou úlohou spočítán vzorový průběh výchylky ve vzdálenosti $x_n=0.3m$ od místa vetknutí. Zadané veličiny byly $A=3.248 \times 10^{-5} m^2$, $L=0.457m$, $I=6.9291 \times 10^{-12}$, $F_o=1N$ a vzorové hodnoty veličin z $\Sigma_n(\Omega)$ dle tabulky 7. Výsledek identifikační úlohy je uveden rovněž v tabulce 7.

Označení	Veličiny z $\Sigma_n(\Omega)$			f_E
	E [N/m ²]	ρ [kg/m ³]	ν [Ns/mkg]	
Vzor	72.0×10^9	2700	1.20	0.000
Výsledek	72.6×10^9	2725	1.19	-0.059

Tab. 7: Výsledné návrhy řešení.



Obr. 12: Průběh konvergence k hledaným vzorovým hodnotám.

O vlastním průběhu konvergence vypovídá obr.12, na kterém je zobrazen příklad průběhu konvergence hodnot kriteriální funkce současně s hodnotami jednotlivých hledaných parametrů obsažených v nejlepším z návrhů v dané generaci. Čárkovanou přímkou jsou zvýrazněny hledané hodnoty. Z vývoje jednotlivých křivek je patrný vliv změny jednotlivých parametrů na hodnotu kriteriální funkce v zadaném prostoru možných řešení.

Všechny výsledky získané během řešení vypovídají o dobrých možnostech řešení dané úlohy pomocí GA. Ve srovnání s postupy a výsledky uváděnými v literatuře [2], má použití GA výhodu například v tom, že pro dosažení dobrých výsledků není potřebná dobrá znalost počátečních výchozích hodnot vyšetřovaných parametrů a dále je možno identifikovat zároveň všechny parametry, na rozdíl od literárně uváděného rozdělení na skupinu tuhostních, hmotnostních a tlumících parametrů. Nevýhodná může být u použití GA časová náročnost výpočtu a potřeba statistického vyhodnocení více nezávislých výpočtů pro určení spolehlivějších výsledků.

5.8. Řešení identifikačních úloh pomocí genetického programování

Použití genetických algoritmů pro řešení identifikačních úloh je zpravidla omezeno požadavkem na znalost funkčního tvaru hledané závislosti. V případech, kdy jsou neznámé nejen parametry, ale i funkční vyjádření, může být vhodným nástrojem řešení tzv. genetické programování, které představuje modifikaci GA navrženou na počátku 90-tých let Johnem Kozou ze Stanfordovy University [10]. Jádrem této modifikace je nahrazení samostatných znaků hledaných parametrů známého tvaru funkce složitějšími strukturami v podobě funkcí. Na základě takové modifikace se podstatně rozšířila možnost použití genetických algoritmů na hledání nejen parametrů, ale také i neznámých tvarů funkčních závislostí, které jsou předmětem identifikačních úloh. Díky těmto vlastnostem bývá GP také označováno jako nástroj pro řešení úloh symbolické regrese.

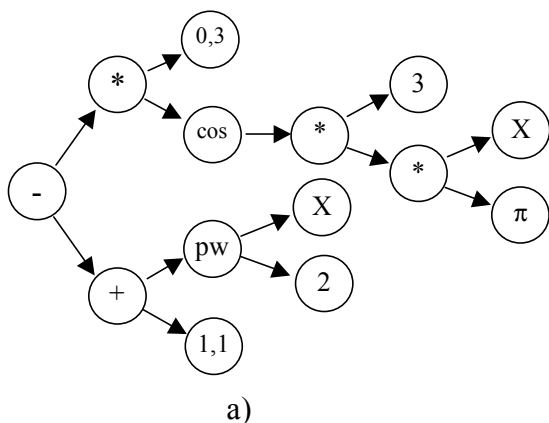
Genetické programování bylo aplikováno na několik testovacích funkcí a poté k hledání simulovaného průběhu charakteristiky tuhosti silentbloku. Jednou ze zajímavých funkcí, na kterých se GP zkoušelo byla zjednodušená tzv. Bohachevskyho funkce dle následující rovnice

$$y = 0,3 \cos(3\pi x) - x^2 - 1,1 \tag{13}$$

Průběh funkce je zobrazen na obrázku 13 společně s jejím vyjádření ve formě stromové struktury. Její prefixová a postfixová forma je uvedena v tabulce 8.

Posloupnost funkcí a terminálů	
Prefix	- * 0,3 Cos * 3 * x π + pw x 2 1,1
Postfix	0,3 x π * 3 * cos * x 2 pw 1,1 + -

Tab. 8. Prefixová a postfixová forma kódování výrazu z rov.1.1.



Obr.13: Příklad reprezentace funkčního výrazu v podobě syntaktického stromu, a) syntaktický strom b) průběh příslušné funkční závislosti.

Vzorový průběh funkce byl počítán ve 200 bodech. Během výpočtových experimentů bylo testováno jak původní kódování navržené Kozou, tak prefixová forma bez lokálního prohledávání, poté s lokálním prohledáváním, postfixová forma a na závěr prefixová forma s implementovanými makry. Nejlepší výsledky byly dosaženy při prefixovém nastavení s lokálním hledáním. V tabulce 9 je uveden příklad výsledku společně s hodnotou kritériální funkce posuzující absolutní hodnotu průměrné výchylky nalezeného průběhu oproti vzorovému průběhu..

Funkční výraz nalezený genetickým programováním	F
$-(1+(0.333+\cos((-9.424)*(1-x)))/((\text{rev}(4.838)+\pi+7.123)/\pi)+x*x)$	1.01e-10

Tab. 9. Výsledný výraz získaný genetickým programováním.

Průběh výsledné závislosti z tab. 9 je téměř totožný s průběhem vzorové závislosti uvedené na obr. 13b, což lze považovat za dobrý výsledek řešení dané identifikační úlohy. Méně uspokojivé výsledky byly ovšem následně získány při řešení úlohy identifikace simulovaného průběhu charakteristiky tuhosti silentbloku. Zvýšenou nepřesností mezi vzorovým průběhem a identifikovaným průběhem měly za následek obtížně hledané koeficienty navrženého polynomu.

Přesto lze ovšem potvrdit možnosti použití této metody na řešení některých identifikačních úloh inženýrské mechaniky. Na druhou stranu má uvedený přístup řadu omezení a nedostatků, které vychází především z jeho celkově větší matematické, programátorské a výpočetní náročnosti například oproti klasickému genetickému algoritmu.

6. IMPLEMENTACE VÝSLEDKŮ A NÁMĚTY NA DALŠÍ VÝZKUM

Disertační práce směřuje svým obsahem především do oblasti aplikovaného výzkumu. Přesto lze některé získané výsledky a poznatky implementovat také v oblasti teoretické, což celkově vypovídá o jejím teoreticko-aplikačním charakteru.

Pro teoretickou oblast jsou přínosné především následující skutečnosti:

- Získané zkušenosti a poznatky z řešení testovacích i praktických úloh byly využívány pro rozpracování, implementování a testování nových úprav a modifikací GA. Mezi nejvýznamnější patří kódování reálných čísel diskretizací oborů hodnot včetně úpravy mechanismů příslušných operátorů nebo adaptivní rozsahy hodnot, uváděno jako adaptivní operátor mutace. Zároveň byly získány výsledky, které zcela nepotvrzují některé teoretické hypotézy, jako například o minoritním vlivu mutace na chování GA. Na druhé straně byla potvrzena platnost dalších důležitých hypotéz.
- Kromě přínosu v oblasti teorie GA došlo k jeho začlenění, jako obecného stochastického algoritmu, do množiny teorií vhodných pro řešení identifikačních a optimalizačních úloh výpočtového modelování v rámci systémového pojetí [8]. Byl rozpracován a verifikován obecný postup řešení uvedených úloh s použitím genetických algoritmů, jenž byl poté částečně publikován ve skriptech [9].

Pro aplikační oblast jsou přínosné především následující skutečnosti:

- Byla vytvořena počítačová podpora řešení uvedené třídy úloh. Rozpracovaný typ GA byl naprogramován a dále modifikován v prostředí jazyka Turbo Pascal. Tento program byl využit pro řešení některých presentovaných úloh a zároveň sloužil k testování navrhovaných úprav a modifikací základního algoritmu. Na základě dobrých výsledků z jeho testování bylo jeho používání dále úspěšně rozšířeno na jiná pracoviště fakulty strojní a fakulty elektrotechniky a informatiky. Později byla využita knihovna funkcí GAOT [7], která byla propojena v prostředí MATLAB přímo na modely vyšetřovaných soustav vytvořených v nadstavbě SIMULINK.
- S využitím výše uvedených poznatků a počítačové podpory byly řešeny vybrané optimalizační a identifikační úlohy, viz.kap.5. Získané výsledky, včetně podmínek a způsobu jejich dosažení, jsou nové a přínosné pro dané aplikační oblasti. Příkladem mohou být úlohy vztahující se k identifikaci nebo optimalizaci parametrů kmitajících soustav, kdy soudobá literatura [4] uvádí, že identifikace koeficientů matic hmotnosti, tlumení a tuhosti matematického modelu může vést k dobrým výsledkům pouze ve vyjíměčných případech, když např. identifikovaný objekt je svou fyzikální podstatou výrazně diskrétní a málo tlumený, a s velkými obtížemi je zejména spojena identifikace typu tlumení v soustavě (viskózní tlumení, suché tření apod.). V presentovaných úlohách jmenovaného typu je prováděna identifikace případně optimalizace koeficientů jak tuhosti a hmotnosti tak tlumení, včetně určování jeho typu, a to i pro výrazně nelineární tvary. - Mezi řešenými úlohami byla věnována pozornost nejen soustavám se soustředěnými parametry, ale byly také vyšetřovány soustavy se spojitými parametry. - Dále byly úspěšně řešeny úlohy s

neznámými koeficienty jak v části mechanické struktury, tak v řídicím obvodu. - Kromě řešení úloh parametrické optimalizace a identifikace byla s dobrým výsledkem řešena úloha určení okrajových podmínek v podobě neznámého časového průběhu vyšetřované veličiny, jejíž funkční tvar nebyl znám a bylo nutné identifikovat její průběh v podobě hledání jeho diskrétních hodnot. - Další směr při řešení úloh s neznámým funkčním tvarem je naznačen při řešení testovacích úloh pomocí GP, které vykazuje předpoklady pro řešení úloh symbolické regrese.

- Pomocí GA byly řešeny úlohy, které obsahovaly například problémy vícerozměrných a "rozsáhlých" prostorů možných řešení a multimodálních účelových funkcí, včetně sestavení nepřímé úlohy. Důležitou výhodou byly také nižší nároky na znalosti a zkušenosti řešitele v dané problematice, jako neznalost dostatečně dobrých počátečních odhadů. V některých případech se projevil značný vliv vnitřního nastavení GA na výslednou efektivitu a přesnost řešení. U složitějších úloh bylo třeba provést statistické vyhodnocení více nezávislých řešení.

Náměty na další výzkum se objevují jak v teoretické, tak aplikační oblasti. Kromě rozvoje obecné teorie GA je pro účely řešení dané třídy úloh zajímavá možnost dílčí samostatné manipulace s vyšetřovanými parametry dle jejich fyzikální podstaty případně jejich vzájemné závislosti [13], dále jiný přístup k řešení multi-kriteriálních úloh [6] a také kombinace GA s ostatními metodami [11]. Samostatnou oblastí je rozvoj GP, kde je třeba řešit například nežádoucí nárůst struktur hledaných řešení nebo neuspokojivé hledání konstant funkčních výrazů [A29], [15]. V aplikační oblasti by bylo vhodné výsledky jednotlivých výpočtových experimentů verifikovat na reálných objektech. Aktuálně se v tomto směru pokračuje v úloze optimalizace parametrů aktivní elektromagnetické vibroizolační soustavy a úloze identifikace parametrů kmitajícího nosníku. Kromě důležitosti získávání poznatků z řešení dalších úloh je zároveň třeba provést více porovnávacích studií mezi výsledky dosaženými genetickým algoritmem a jinými metodami.

7. ZÁVĚR

V předložené práci jsou, v souladu s formulovanými cíli, presentované výsledky analýzy použití genetických algoritmů na řešení identifikačních a optimalizačních úloh v inženýrské mechanice. Práce uvádí výchozí teoretické předpoklady pro řešení uvedených úloh jak z oblasti GA, tak z oblasti řešení identifikačních a optimalizačních úloh v systémovém pojetí. Po úvodní studii současného stavu řešené problematiky je vytvořen obecný rámec začlenění GA do množiny teorií pro řešení uvedených úloh, na jehož základě byly naprogramovány a odladěny podpůrné softwarové prostředky. Následně byly získané poznatky a vytvořené prostředky aplikovány na řešení konkrétních identifikačních a optimalizačních úloh inženýrské mechaniky vybraných v souladu se zadáním. Na základě získaných výsledků byla doplněna teoretická část o postupu řešení uvedených úloh s využitím GA. V poslední části je pozornost zaměřena na stanovení obecných závěrů z řešení dané problematiky, s rozšířením na jejich využití při řešení většího okruhu úloh.

Zadání disertační práce bylo splněno ve stanoveném rozsahu a v rozložení do následujících dílčích subcelků:

1. V první etapě byla provedena a dále průběžně doplňována rešeršní studie řešené problematiky. Postupně byl vytvořen ucelený souhrn informací o současném stavu převážně interdisciplinárních vědních oborů zabývajících se teorií a aplikacemi GA, se zvláštní pozorností na aplikace v oblasti identifikace a optimalizace parametrů.

2. V dalším kroku byla pozornost věnována začlenění GA do procesu výpočtového modelování v souladu se systémovým přístupem. GA byly zařazeny do množiny teorií pro řešení problémů nepřímým modelováním v podobě identifikačních a optimalizačních úloh. Byl sestaven a průběžně doplňován obecný postup vhodný pro řešení uvedených úloh. Zároveň byly vytvářeny a testovány vlastní i převzaté softwarové prostředky, z nichž mezi nejvýznamnější patří vlastní program v prostředí Turbo Pascal a převzatá knihovna funkcí GAOT v prostředí Matlab.

3. Pro aplikaci získaných poznatků a vytvořených softwarových prostředků byly vybrány následující úlohy:

- jako první byla vybrána úloha simulované identifikace sedmi neznámých parametrů, které určují typ a průběh nelineárních charakteristik tuhosti a tlumení v soustavě kinematically buzeného tělesa s jedním stupněm volnosti na základě známého časového průběhu zrychlení.

- předchozí úloha byla poté formulována jako úloha optimalizace uvedených parametrů za účelem snížení přenosu vibrací ze základny na kmitající těleso, a to na základě vyhodnocování jeho amplitudově-frekvenční charakteristiky. Ze získaných výsledků jsou zřejmé pouze drobné rozdíly v přístupech k řešení obou úloh.

- následně byla řešena úloha optimalizace návrhových proměnných dynamického tlumiče, mezi které byly zařazeny koeficienty nelineární pružné a tlumící vazby s kubickou závislostí na výchylce resp. rychlosti tlumeného tělesa, a zároveň hmotnost přídatného tělesa. Optimalizace byla prováděna jak vzhledem k průběhu amplitudově-frekvenční charakteristiky, tak k minimalizaci přídatné hmotnosti.

- v dalších krocích byla tato úloha rozšířena zavedením aktivní zpětné vazby formou řízeného akčního členu mezi tlumené a přídatné těleso, přičemž se množina návrhových proměnných zvětšila o 4 koeficienty regulátoru na celkových 9.

- ve spolupráci s fakultou elektrotechniky a informatiky byla řešena úloha identifikace osmi parametrů náhradního schématu třífázového asynchronního motoru s kotvou nakrátko, a to na základě experimentálně změřených statických charakteristik motoru v podobě momentu, proudu a účinníku.

- další řešenou úlohou byla identifikace materiálových vlastností a okrajových podmínek při vedení tepla, a to na základě experimentálně naměřených průběhů teplot v laboratoři termomechaniky. V některých případech byla také zároveň identifikována časová konstanta termočlánku. Zvláštností úlohy bylo hledání diskrétních hodnot časového průběhu vyšetřované veličiny, narozdíl od předchozích úloh hledání parametrů známého funkčního výrazu.

- kromě řešení problémů na modelech se soustředěnými parametry byla řešena také úloha se spojitými parametry, formulovaná jako identifikace hodnoty modulu pružnosti, součinitele vnějšího tlumení a hustoty materiálu jednostranně vetknutého nosníku na základě známých počátečních a okrajových podmínek a známého časového průběhu výchylky nosníku v zadané vzdálenosti od počátku.
- v posledním období byly také testovány možnosti řešení identifikačních a optimalizačních úloh pomocí genetického programování, jako významné modifikace genetického algoritmu, která v principu umožňuje hledat celé funkční výrazy formou symbolické regrese.

4. Na základě získaných poznatků a výsledků řešení jednotlivých úloh bylo provedeno hodnocení, které je dílčím způsobem uvedeno v příslušných kapitolách. Souhrnně vypovídají získané výsledky o výrazných možnostech úspěšného použití genetických algoritmů na řešení identifikačních a optimalizačních úloh inženýrské mechaniky, které nebylo možno dosud uspokojivě řešit pomocí jiných metod a přístupů. Jedná se především o úlohy s multimodální účelovou funkcí, vícekritériální úlohy, úlohy s vícerozměrnými a "rozsáhlými" prostory možných řešení, případně nespojitě, špatně podmíněné nebo nekorektní problémy. Existují odkazy také na řešení tzv. NP-úplných problémů [12], [14]. Mezi hlavní výhody genetických algoritmů pro řešení daných úloh patří schopnost paralelního prohledávání zadaného stavového prostoru s následným zaměřením na oblasti, v nichž nabývá účelová funkce extrémních hodnot, a zároveň schopnost opustit lokální extrémy za účelem nalezení globálního extrému bez vyšších nároků na znalost dobrých počátečních odhadů hledaného řešení dané úlohy. Celý proces hledání globálního extrému účelové funkce je ovšem ve většině případů výpočetně a posléze i časově značně náročný, což může být někdy limitující jak s ohledem na možnou vyšší efektivitu jiných metod, tak případně na celkový neúspěch řešení dané úlohy. Genetický algoritmus nemusí být například efektivnější než jiné existující metody řešení s vnitřně zabudovanou informací o daném konkrétním problému. Přesto je vhodné zařadit genetické algoritmy do množiny teorií použitelných pro řešení identifikačních a optimalizačních úloh inženýrské mechaniky, neboť neustále narůstá zájem o jejich vývoj v teoretické i aplikační oblasti, od kterého lze očekávat i další rozšíření možných aplikací. Příkladem může být rozvoj genetického programování.

Výsledky presentované analýzy vypovídají o dobrých aplikačních možnostech genetických algoritmů a společně s dosaženými výsledky konkrétních aplikací dostatečně prokazují vědeckou využitelnost rozpracované metody. Zároveň ovšem z analýzy vyplývá řada otevřených otázek a námětů na další výzkum jak v oblasti teoretické, tak aplikační.

Práce vznikla za podpory grantového projektu MŠMT č.VS-96122, dále grantového projektu COST č.512.20, grantového projektu GAČR č.101/93/0411 a pilotních projektů ÚT AVČR č.11/02U a 20/8U.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Alander, J.T., Lampinen, J.: On implementing CAD-systems based on existing simulators and optimization by genetic algorithm. Brno, Sborník konference MENDEL'97, 1997, str.7-12.
- [2] Banks, H.T., Wang, Y., Inman, D.J., Slater, J.C.: Approximation and Parameter Identification for Damped Second Order Systems with Unbounded Input Operators. Control-Theory and Advanced Technology, Vol.10, No.4, Part 1, pp.873-892, MITA PRESS, Japan, 1994.
- [3] Beasley, D., Bull, D.R., Martin, R.R.: An Overview of Genetic Algorithms. United Kingdom, University Computing, 1993, 15(2), pp.58-69.
- [4] Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání. Technický průvodce, svazek 71, Praha, SOBOTÁLES, 1994.
- [5] Gottvald, A.: Meta-Evolutionary Optimization: Applications to Magnetic Resonance in Extreme Conditions. Brno, Sborník konference MENDEL'96, 1996, str.47-51.
- [6] Horn, J., Nafpliotis, N., Goldberg, D.E.: A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. Proceedings of ICEC'94, Piscataway, NJ, USA, 1994.
- [7] Houck, Ch. R., Joines, J. A., Kay, M. G.: A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation. NCSU-IE Technical Report 95-09, North Carolina State University, 1995.
- [8] Janíček P., Ondráček E., Porada V.: Identifikace objektů a systémů v mechanice, lékařství, biomechanice a kriminalistice. Inženýrská mechanika, roč. 3, 1996, č.2, s.71-89.
- [9] Janíček, P., Ondráček, E.: Řešení problémů modelováním - Téměř nic o téměř všem. Skriptum Fakulty strojní VUT v Brně, 1998.
- [10] Koza, J.R.: Genetic Programming: On the Programming of Computers by Natural Selection, Cambridge, MIT Press, MA, 1992.
- [11] Mahfound, S.W., Goldberg, D.E.: Parallel Recombinative Simulated Annealing: A Genetic Algorithm. Parallel Computing, 21, 1995, pp.1-28.
- [12] Man, K.F., Tang, K.S., Kwong, S.: Genetic Algorithms: Concepts and Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43., No. 5., 1996.
- [13] Potter, M., A., De Jong, K., A.: The Coevolution of Antibodies for Concept Learning. In Proceedings of the Fifth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 1998, Springer-Verlag, pp.530-539.
- [14] Pospíchal, J., Kvasnička, V.: Evoluční algoritmy I: genetické algoritmy. Praha, Computer World, 31/95, 1995.
- [15] Smith, P.W.H.: Controlling Code Growth in Genetic Programming. Leicester, Conference Recent Advances in Soft Computing 99, 1999.

SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ AUTORA

- [A1] Ruekgauer, A., Sláma, L.: Modeling and Control of the Steering System for Articulated Road Vehicles. Workshop of Tempus JEP 4143-94, Praha, 1994.
- [A2] Král, J., Sláma, L.: Genetický algoritmus v identifikaci parametrů nelineárního dynamického systému. Kolokvium Dynamika strojů'95, Praha, 1995, str.61-66.
- [A3] Sláma, L., Ruekgauer, A.: Dynamical Models for Simulation Studies of the Power Steering of Road Vehicles. Journal Engineering Mechanics, n.5., 1995, vol.2., pp.309-318.
- [A4] Březina, T., Král, J., Sláma, L.: Adaptivní genetický algoritmus a jeho využití pro identifikaci parametrů nelineárních dynamických systémů. Konference Inženýrská mechanika'95, Svatka, 1995, str.55-60.
- [A5] Sláma, L., Slavík, J., Březina, T.: Identifikace parametrů asynchronního stroje pomocí evolučních algoritmů. Kolokvium diagnostika strojů a konstrukcí'95, Praha, str.14.
- [A6] Raudenský, M., Horský, J., Krejsa, J., Sláma, L.: Výzkum chlazení povrchů s vysokými teplotami a vývoj inverzních úloh. Inženýrská mechanika'95, Svatka, str.447-452.
- [A7] Březina, T., Sláma, L., Krejsa, J.: Genetic Algorithms: Three examples of the Use. Workshop of Tempus JEP 4143-94, Praha, 1995.
- [A8] Sláma, L., Krejsa, J., Ondrůšek, Č., Kratochvíl, C., Březina, T.: Rozdílné přístupy k modelování elektromechanických pohonných soustav. Výpočtová Mechanika '95, Pernink, 1995.
- [A9] Sláma, L., Raudenský, M., Horský, J., Březina, T., Krejsa, J.: Application of Genetic Algorithm for Evaluation of Quenching Test by Inverse Task with Unknown Time Constant of Sensor. AIENG 96, Florida, 1996, pp.23-24.
- [A10] Krejsa, J., Sláma, L., Horský, J., Raudenský, M., Pátíková, B.: The Comparison of the Traditional and Non-classical Methods Solving the Inverse Heat Conduction Problem. Heat Transfer 96, Udine, 1996.
- [A11] Sláma, L., Slavík, J., Březina, T.: Porovnání využití algoritmu simulovaného žíhání a genetického algoritmu v úloze identifikace parametrů nelineární dynamické soustavy. Inženýrská mechanika'96, Svatka, 1996, str. 207-212.
- [A12] Sláma, L., Krejsa, J., Kratochvíl, C.: Different Approaches in Modelling of the Electromechanical Drive Systems. GAMM'96, Praha, 1996.
- [A13] Raudenský, M., Horský, J., Krejsa, J., Sláma, L.: Usage of Artificial Intelligence Methods in Inverse Problem for Estimation of Material Parameters. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Vol. 6, 1996, No. 8, pp.19-29.

- [A14] Sláma, L., Raudenský, M., Horský, J., Březina, T., Krejsa, J.: Evaluation of Quenching Test of Rotating Roll with Unknown Time Constant of Sensor Using Genetic Algorithm. Mendel 96, Brno, 1996, pp.149-154.
- [A15] Raudenský, M., Horský, J., Krejsa, J., Sláma, L.: Non-classical approaches to the Inverse Problems. General Workshop MMSP'96, Davos, 1996.
- [A16] Balátě, M., Šimoník, I., Březina, T., Sláma, L.: A comparison of Genetic Algorithms and Adaptive Simulated Annealing. Mendel 96, Brno, 1996, pp.18-22.
- [A17] Březina, T., Krejsa, J., Kratochvíl, C., Sláma, L.: Approximation and prediction of the non-linear system's behaviour via artificial neural network. Days of Mechanics, Varna, 1996.
- [A18] Březina, T., Krejsa, J., Kratochvíl, C., Sláma, L.: Modelling of the electromechanical system via neural network. Výpočtová Mechanika 96, Pernink, 1996.
- [A19] Sláma, L., Slavík, L., Březina, T., Kotek, V.: Auxiliary Mass Dampers Optimization Using Genetic Algorithms and Very Fast Simulated Re-Annealing. Mendel 97, Brno, 1997, pp. 158-163.
- [A20] Slavík, J., Sláma, L., Krejsa, J., Kratochvíl, C.: Genetic Algorithms and Simulated Annealing Used for Design Optimization of Damped Supports. 3NWGA, Helsinky, 1997, pp. 254-264.
- [A21] Slavík, J., Sláma, L., Kratochvíl, C., Březina, T.: Synthesis of Actively Damped Physical Devices Supports Using Genetic Algorithms and Simulated Annealing. Synthesis of Mechatronic Systems, Euromech 370, Duisburg, 1997, pp.44-45.
- [A22] Krejsa, J., Březina, T., Doležal, R., Sláma, L.: Establishing the Behaviour of Polymerization Unit via Neural Network. Mechatronics and Robotics 97, Brno, 1997, pp.37-42.
- [A23] Slavík, J., Sláma, L., Březina, T., Kratochvíl, C., Krejsa, J.: Application of Simulated Annealing and Genetic Algorithms to the Optimization of Vibration Isolation Systems. Mechatronics and Robotics 97, Brno, 1997, pp.93-98.
- [A24] Sláma, L., Slavík, J., Březina, T., Kratochvíl, C.: Dynamical Behaviour Optimization of Damped Supports by Genetic Algorithms and Simulated Annealing. SOCO 97, Nimes, 1997.
- [A25] Sláma, L., Slavík, J.: Optimalizace vibroizolačních vazeb pomocí metod umělé inteligence. Kolokvium Dynamika strojů 98, Praha 1998, str.195-200.
- [A26] Sláma, L., Balátě, M.: Genetické programování a možnosti jeho využití pro řešení identifikačních úloh. Kolokvium Dynamika strojů 99, Praha 1999, str.225-230.
- [A27] Balátě, M., Sláma, L.: Genetické programování - symbolická regrese. Konference Aplikovaná mechanika 99, Brno 1999, str.9-14.

- [A28] Sláma, L., Balátě, M.: Improvement of decoding schemas of genetic programming for function identification. Conference Recent Advances in Soft Computing 99, Leicester, 1999.
- [A29] Sláma, L., Balátě, M., Krejsa, J., Slavík, J.: Identification of a nonlinear vibration system using simulated annealing and genetic algorithms and programming. 17th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, Las Vegas, 1999, str.783.
- [A30] Sláma, L.: Survey of electromagnetic actuators for vibration isolation. Conference Mechatronics and Robotics 99, Brno, 1999, str.161-166.

SUMMARY

The presented thesis is focused on analysis of genetic algorithms in context of identification and optimization tasks in engineering mechanics. Identification tasks are performed to determine unknown parameters of computational models. Optimization takes place, while looking for structure parameters, which improve quality of a given system. Some of these tasks might involve problems with multi-modal fitness functions, large multi-dimensional search spaces or ill-posed unstable problems. Because of mentioned difficulties, usage of traditional approaches may be very limited or even impossible sometimes. In this case, some of stochastic methods could be used successfully. One of the mostly discussed methods in the last years is genetic algorithm. Genetic algorithm belongs to the group of evolutionary computational methods, which are based on similar principles of simultaneous manipulating over a group of possible solutions using stochastic operators. The thesis comes out from theoretical presumption of potential possibilities of usage of genetic algorithms for solving identification and optimization tasks. Genetic algorithm has been incorporated to the system optimization and identification process in the field of computational modeling in engineering mechanics. Then created software tools have been applied to solve several optimization and identification problems in projects supported by actual grants. At first, simulated identification of nonlinear coupling's parameters of a spring and damper between a vibrating basement and examined mass body has been performed. Further, parameters of nonlinear coupling were optimized to suppress undesirable vibrations of the mass body. Then optimization of the coupling's parameters was extended by minimization of weight of an auxiliary mass attached to the primary body to achieve better vibration suppression. The system called auxiliary mass damper was further extended by an active force actuator, which was coupled between the primary and secondary masses. Thus, the goal of optimization process was to find best values of both structure and control variables. Another application was devoted to identification of parameters of equivalent circuit diagram of an induction motor. Then the attention was paid to inverse heat conduction problem during cooling of both stable and rotating steel surfaces by water sprays. Last application was focused

on identification of structure mass, stiffness and damping parameters of a cantilever beam based on its position observation. In addition, possibilities and performance of genetic programming on test examples has been studied and discussed. Numerical results of all the applications are presented together with internal settings and adjustments of genetic algorithms. Genetic algorithm was found to be a suitable "solver" for all these applications and promising for large class of various problems. High potential of genetic algorithms in the context of identification and optimization tasks in engineering mechanics has been outlined and further research directions recommended.

ŽIVOTOPIS

Narozen 11.10.1971 v Havlíčkově Brodě, národnost česká, ženatý, syn Jan, trvalé bydliště Dolnoplní 10 Brno.

Vzdělání:

- od roku 1994 doktorandské studium v oboru Inženýrská mechanika na Ústavu mechaniky těles FS VUT Brno.
- Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, obor mechatronika, ukončeno v roce 1994 státní závěrečnou zkouškou a obhajobou diplomové práce napsané v angličtině na téma: „Modelling of the Steering System for Articulated Road Vehicles“, která byla vypracována během pětíměsíčního pobytu v Německu na University of Stuttgart.
- Gymnázium v Jihlavě, specializace elektrotechnika, ukončeno maturitou 1989.

Praxe:

1996-1997 - vědecký pracovník Ústavu mechaniky těles, FS VUT Brno.

1997- dosud- zástupce vedoucího Centra mechatroniky, ÚT AVČR, pobočka Brno.

Vědecká práce:

Výzkum v oblasti identifikace, optimalizace a modelování mechatronických soustav s použitím metod umělé inteligence.

Přibližně 30 publikací ve vědeckých časopisech a na konferencích doma i v zahraničí.

Výuka:

Základní kurzy - kinematika, dynamika.

Specializace - počítačová podpora konstrukce letadel.

Jazykové znalosti: aktivně anglicky, pasivně německy a rusky.