

# Genetické algoritmy a genetické programování

Josef Hynek

- Řešení úloh prostřednictvím soutěže v rámci populace vyvíjejících se potenciálních řešení
- Základní principy evolučních výpočetních technik
- Návrh efektivních algoritmů a možnosti využití
- Automatická tvorba programů na základě darwinovské evoluční teorie



## Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.

*Používání elektronické verze knihy je umožněno jen osobě, která ji legálně nabyla a jen pro její osobní a vnitřní potřeby v rozsahu stanoveném autorským zákonem. Elektronická kniha je datový soubor, který lze užívat pouze v takové formě, v jaké jej lze stáhnout s portálu. Jakékoliv neoprávněné užití elektronické knihy nebo její části, spočívající např. v kopírování, úpravách, prodeji, pronajímání, půjčování, sdělování veřejnosti nebo jakémkoliv druhu obchodování nebo neobchodního šíření je zakázáno! Zejména je zakázána jakákoliv konverze datového souboru nebo extrakce části nebo celého textu, umístování textu na servery, ze kterých je možno tento soubor dále stahovat, přitom není rozhodující, kdo takovéto sdílení umožnil. Je zakázáno sdělování údajů o uživatelském účtu jiným osobám, zasahování do technických prostředků, které chrání elektronickou knihu, případně omezují rozsah jejího užití. Uživatel také není oprávněn jakkoliv testovat, zkoušet či obcházet technické zabezpečení elektronické knihy.*





Copyright © Grada Publishing, a.s.



Copyright © Grada Publishing, a.s.

# Obsah

Předmluva .....	9
1. Úvod .....	13
Část I: Genetické algoritmy.....	17
2. Genetický algoritmus krok za krokem.....	19
3. Proč genetické algoritmy fungují?.....	27
4. Příklad – optimalizační úloha .....	33
5. Zvyšování účinnosti genetického algoritmu .....	41
5.1 Kódování .....	42
5.2 Ohodnocující funkce .....	43
5.3 Seleční mechanismus .....	45
5.4 Genetické operátory .....	50
5.5 Vytvoření nové populace.....	53
5.6 Paralelní genetické algoritmy .....	54
5.7 Závěr .....	57
6. Proč genetické algoritmy selhávají .....	59
6.1 Důvody pro možný neúspěch .....	59
6.2 Kdy genetický algoritmus použít?.....	65
7. Hybridní genetické algoritmy .....	67

<b>8. Úlohy s omezujícími podmínkami .....</b>	<b>71</b>
<b>8.1 Klasifikace optimalizačních úloh .....</b>	<b>72</b>
<b>8.2 Ilustrativní příklad .....</b>	<b>74</b>
<b>8.3 Metody práce s omezujícími podmínkami .....</b>	<b>75</b>
8.3.1 Penalizační metoda .....	75
8.3.2 Opravné algoritmy a speciální operátory .....	77
8.3.3 Dekodéry .....	79
<b>8.4 Shrnutí .....</b>	<b>81</b>
<b>Část II: Evoluční algoritmy v úlohách s omezujícími podmínkami ...</b>	<b>83</b>
<b>9. Problém splňování logických formulí .....</b>	<b>85</b>
9.1 Definice problému .....	86
9.2 Tradiční metody řešení .....	86
9.3 Genetické algoritmy .....	87
9.4 Hybridní genetický algoritmus .....	88
<b>10. Problém N dam .....</b>	<b>91</b>
10.1 Tradiční algoritmy pro řešení problému N dam .....	92
10.2 Genetické algoritmy .....	93
10.3 Hybridní genetické algoritmy .....	95
10.4 Návrat k heuristickému algoritmu .....	96
10.5 Shrnutí .....	98
<b>11. Problém určení minimálního počtu kontejnerů .....</b>	<b>101</b>
11.1 Definice problému .....	101
11.2 Tradiční algoritmy pro řešení problému .....	102
11.3 Genetické algoritmy .....	104
11.4 Hybridní evoluční algoritmus pro seskupovací problémy .....	105

<b>12. Problém obchodního cestujícího .....</b>	<b>111</b>
12.1 Definice problému .....	112
12.2 Tradiční algoritmy pro řešení problému .....	112
12.3 Genetické algoritmy pro problém obchodního cestujícího.....	114
12.4 Hybridní genetické algoritmy pro problém obchodního cestujícího....	118
<b>Část III: Genetické programování .....</b>	<b>121</b>
<b>13. Genetické programování .....</b>	<b>123</b>
13.1 Úvod do problematiky .....	123
13.2 Základy genetického programování .....	125
13.3 Vytvoření počáteční populace .....	127
13.4 Genetické operátory .....	129
<b>14. Zvyšování účinnosti genetického programování.....</b>	<b>135</b>
14.1 Nadbytečné části kódu .....	136
14.2 Automaticky definované funkce .....	137
14.3 Genetické programování s typováním .....	139
14.4 Využití cyklů v genetickém programování .....	142
<b>15. Příklad – strojové učení.....</b>	<b>145</b>
15.1 Zadání úlohy .....	146
15.2 Řešení pomocí genetického programování .....	146
15.3 Poznámky k průběhu hledání řešení .....	148
<b>16. Příklad – umělý mravenec.....</b>	<b>151</b>
16.1 Zadání úlohy .....	151
16.2 Řešení pomocí genetického programování .....	153
16.3 Poznámky k průběhu hledání řešení .....	155

<b>17. Příklad – interaktivní evoluce .....</b>	<b>163</b>
<b>17.1 Zadání úlohy .....</b>	<b>164</b>
<b>17.2 Řešení pomocí genetického programování .....</b>	<b>165</b>
<b>17.3 Možnosti zlepšování navrženého řešení .....</b>	<b>167</b>
<b>Závěrečné slovo.....</b>	<b>169</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>171</b>
<b>Rejstřík .....</b>	<b>179</b>



# Předmluva

V současné době patří nejrůznější heuristické metody založené na darwinovském principu evoluce mezi velice populární a často používané optimalizační techniky. Každoročně jsou organizovány desítky odborných konferencí zabývajících se problematikou evolučních algoritmů a jejich aplikací, vycházejí stovky publikací a někteří autoři dokonce již začínají varovat před přílišnou popularizací evolučních technik, která sice na jedné straně přitahuje nové uživatele, ale na straně druhé nutně vede k nerealistickým očekáváním.

Evoluční algoritmy jsou snadno aplikovatelné a do značné míry i univerzální, ale bez podrobné znalosti jejich fungování a podrobné analýzy problému nelze automaticky očekávat, že pouhou aplikací evolučních technik na libovolný problém je možné dosáhnout uspokojivých výsledků. Klíč k opravdu efektivnímu nasazení evolučních algoritmů je ukryt ve využívání maxima znalostí o struktuře a charakteru konkrétního problému, ve vzájemném prolínání evolučních algoritmů s tradičními technikami, které byly pro řešení těchto problémů využívány v minulosti, v procesu, který souhrnně nazýváme hybridizací. A právě k takovému pochopení možností praktického využití evolučních algoritmů by ráda přispěla i tato kniha.

Tomuto cíli byla podřízena i vlastní struktura knihy, která se dělí do tří částí, jež jsou dále členěny do jednotlivých kapitol. Po stručném úvodu do problematiky je ve druhé kapitole nejprve vysvětlen princip fungování jednoduchého genetického algoritmu a třetí kapitola objasňuje teoretické základy, o než se genetické algoritmy (byť s jistým zjednodušením) opírají. Čtvrtá kapitola ilustruje způsob aplikace genetického algoritmu na hledání maxima funkce dvou proměnných. Kapitola pátá potom rozšiřuje možnosti dříve prezentovaného jednoduchého genetického algoritmu z hlediska využití rozmanitých způsobů kódování, selekčních mechanismů, rekombinačních operátorů i strategií vytváření nové populace a nastiňuje též možnosti paralelizace příslušných výpočtů. V mnoha publikacích neprávem opomíjené problematice příčin možného selhání genetického algoritmu je věnována kapitola šestá, která současně nabízí některé možnosti, jak se těmto situacím včas a pokud možno i elegantně vyhnout. Sedmá kapitola, která první část této knihy uzavírá, je věnována možnostem hybridizace genetických algoritmů s jinými technikami, neboť právě touto cestou se celá oblast genetických algoritmů a jejich aplikací v současné době ubírá.

Posouzení reálných možností aplikace genetických algoritmů na úlohách s omezujícími podmínkami a ukázkám způsobu konstrukce hybridních evolučních algoritmů je věnována druhá část této knihy. V osmé kapitole je nejprve provedena klasifikace různých optimalizačních problémů a následně jsou zde popsány některé základní techniky pro práci s omezujícími podmínkami. V kapitole deváté až dvanácté jsou postupně popsány možnosti použití evolučních algoritmů při řešení čtyř úloh, které patří do třídy NP. S ohledem na snahu ukázat různé metody práce s omezujícími podmínkami a současně alespoň částečně představit obrovskou pestrost rozmanitých přístupů byl zde pro tyto účely využit problém splňování logických formulí, problém  $N$  dam, problém určení minimálního počtu kontejnerů a problém obchodního cestujícího. V každé z těchto kapitol jsou nejprve uvedeny různé heuristické metody, které se pro řešení dané úlohy používají, a poté je krok za krokem ukázán způsob hybridizace evolučního algoritmu s cílem nalezení co nejefektivnějšího výsledného algoritmu.

Třetí část knihy je věnována genetickému programování. Po úvodu do této problematiky v kapitole třinácté následuje kapitola s několika pokročilejšími tématy a návrhy řešení problémů, které jsou pro genetické programování specifické. Následující tři kapitoly ilustrují možnosti genetického programování na příkladu strojového učení, hledání programu pro umělého mravence a na závěr je uveden příklad interaktivní evoluce.

Souhrnně lze konstatovat, že hlavním záměrem v první části knihy bylo dát čtenáři do rukou co nejširší aparát nástrojů, které mu umožní proniknout do světa genetických algoritmů a aplikovat je na konkrétní problémy. Druhá část knihy by pak čtenáře měla inspirovat ke kritickému zamyšlení nad reálnými možnostmi genetických algoritmů a současně motivovat k úsilí využívat při jejich aplikaci hlubších znalostí o konkrétním problému. Třetí část potom zužitkovává principy genetických algoritmů, vyložené v části úvodní, a uvádí čtenáře do problematiky genetického programování, které se vyznačuje nejen odlišnou reprezentací individuí, ale i možnostmi použití.

Rozdílnému cíli všech tří částí této knihy byla přizpůsobena i použitá metodika. První a třetí část knihy vznikala jako produkt rozsáhlé literární rešerše a vlastního pedagogického působení autora knihy, s cílem co nejsrozumitelněji představit oblast genetických algoritmů a genetického programování. Vzhledem k nezbytnosti vyložit pojmy a techniky byla zvolena forma výkladu, která by měla být dobře čitelná i pro případného zájemce, který se snaží v dané oblasti rychle zorientovat.

Druhá část knihy byla psána se záměrem nikoliv porovnat efektivnost různých algoritmů na vybraných úlohách, ale zejména pokusit se u zde prezentovaných úloh vystopovat

evoluci jednotlivých přístupů, jelikož takto zprostředkovaný způsob myšlení může být velice užitečným zdrojem inspirace při návrhu hybridního evolučního algoritmu i pro zcela odlišný problém. Tímto úmyslem byl nutně ovlivněn výběr algoritmů, které jsou diskutovány u jednotlivých úloh, přičemž zejména mezi tradičními metodami řešení byly upřednostňovány takové algoritmy, které se podařilo využít při konstrukci hybridních evolučních algoritmů. V žádném případě nejde a nemůže jít o vyčerpávající přehled všech metod a pokusů, které kdy byly učiněny. Spíše šlo o to, ukázat takové algoritmy (ať již tradiční nebo genetické), které určitým způsobem přispěly k hledání nových postupů a umožnily najít dokonalejší metody pro řešení jednotlivých problémů.

Nejlepší algoritmy uváděné v druhé části této knihy jsou či byly pro daný problém v době psaní této knihy ty nejlepší známé a vzhledem k jejich charakteru je pravděpodobné, že budou dále zdokonalovány. V této souvislosti je třeba zopakovat a zdůraznit, že cílem nebylo najít a popsat nejlepší algoritmy pro zde popisované problémy k určitému datu, ale ukázat postup myšlení, kterým je třeba se ubírat při hledání a návrhu efektivního algoritmu pro určitý problém.

Z důvodu čitelnosti a srozumitelnosti bylo záměrně ustoupeno od přesné formulace algoritmů pro řešení jednotlivých úloh, čímž by výsledný text byl zbytečně zatížen a rozkouskovaný, přičemž hlavní myšlenka hybridizace jako způsobu návrhu skutečně efektivních evolučních algoritmů by se mohla v technických detailech jednotlivých algoritmů snadno ztratit. Každý algoritmus je proto pouze stručně popsán a současně je uveden odkaz, který zájemce o daný algoritmus pro řešení konkrétního problému dovede k pramenům, kde je tento algoritmus jednoznačně a podrobně definován. Analogicky nejsou v této knize publikovány podrobné výsledky relevantních experimentů. Je tomu tak jednak pro jejich rozsáhlost, ale i pro poměrně značnou neporovnatelnost, pramenící z různých hardwarových platforem, různých implementací evolučních algoritmů, odlišné množiny testovacích příkladů či nemožnosti zjistit konkrétní nastavení jednotlivých parametrů. V případech, kde již určité porovnání bylo provedeno, je v textu uveden příslušný závěr včetně relevantního odkazu.

V neposlední řadě je třeba objasnit volbu konkrétních problémů, na nichž jsou v druhé části této knihy možnosti aplikace evolučních algoritmů demonstrovány. Problém splňování logických formulí byl do této množiny zařazen zcela automaticky jako nejstarší a nejnámější NP-úplný problém. Problém  $N$  dam je další typickou netriviální úlohou, na které jsou testovány různé algoritmy pro řešení problémů, navíc právě tento problém byl autorem intenzivně zkoumán, přičemž výsledkem byl návrh heuristického algoritmu, který umožňuje řešit i poměrně rozsáhlé instance tohoto problému. Problém určení minimálního počtu kontejnerů byl vybrán jako zástupce celé škály seskupovacích problémů, pro něž se podařilo právě vhodnou kombinací tradičních technik operačního výzkumu a evolučních algoritmů navrhnout velmi efektivní hybridní algoritmus. Problém obchodního cestujícího je jedním z nejčastěji studovaných kombinatorických problémů a do této knihy byl zařazen zejména proto, že v oblasti evolučních algoritmů se celá řada instancí tohoto problému užívá jako obecně akceptovaný benchmark. Volbou uvedených problémů jsou zde navíc stejným dílem zastoupeny problémy splňování omezujících podmínek (*constraint satisfaction problems*) i problémy hledání vázaného extrému (*constraint optimization problems*).

Úlohy, na nichž jsou ilustrovány možnosti genetického programování, byly záměrně voleny tak, aby bylo možné naznačit nejen velmi široké pole aplikací, ale zejména popsat odlišnosti pramenící z charakteru jednotlivých úloh a zvláště pak způsobů hodnocení individuů. Proto zde čtenář nalezne vedle symbolické regrese i úlohu, ve které se hledá program pro navigaci robota, a příklad interaktivní evoluce, kdy hodnocení individuů zprostředkovává sám uživatel.

Jak již bylo uvedeno výše, přestože tato kniha popisuje desítky různých algoritmů, neměla by sloužit jen jako návod, jak tyto algoritmy použít pro řešení zde uvedených problémů. Mnohem významnější a důležitější jsou odhalené způsoby myšlení a naznačené příležitosti, které popisované evoluční algoritmy spolu s rostoucími možnostmi informačních technologií v současné době nabízejí.

# 1.

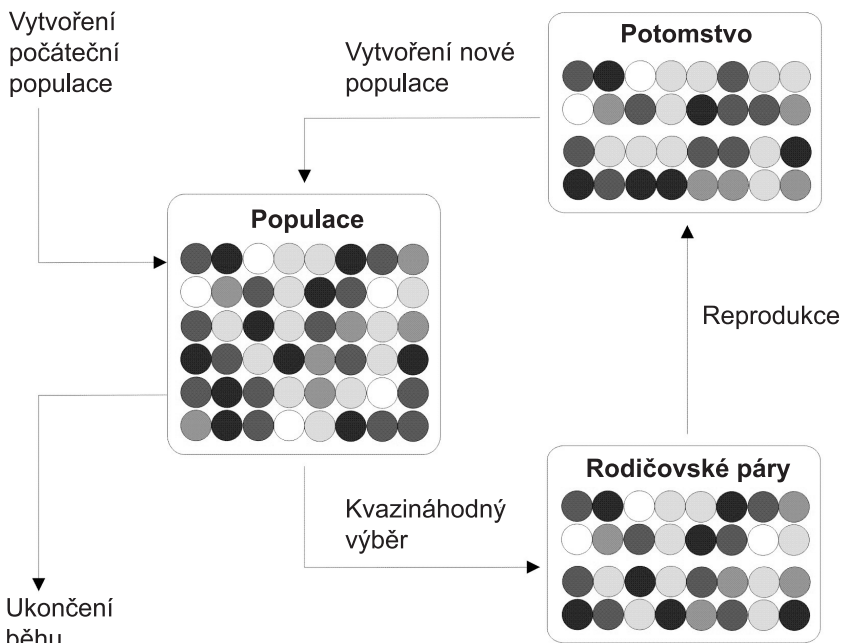
## Úvod

Při hledání skutečných kořenů, z nichž vyrůstá celá oblast evolučních algoritků, je třeba se vrátit zpět až do roku 1859, kdy Charles Darwin poprvé publikoval svoji proslulou knihu *O vzniku druhů přirozeným výběrem čili zachováním vhodných odrůd v boji o život*. Darwinova myšlenka, že populace živočichů a rostlin se vyvíjela po mnoho generací podle principu přirozeného výběru a přežití těch nejschopnějších, inspirovala po více než jednom století velice slibně se rozvíjející oblast výzkumu, jehož cílem je tyto přírodní procesy napodobit. Ačkoliv počátky rozmanitých evolučních procesy inspirovaných paradigmat řešení problémů lze vysledovat již na konci 50. let dvacátého století, tato oblast zůstávala další tři desetiletí stranou většího zájmu vědecké komunity. Tento stav byl zapříčiněn nejen nedostatečným výpočetním výkonem tehdejších počítačů, ale též počátečními metodologickými nedostatky jednotlivých přístupů [44]. V posledním desetiletí dvacátého století se však již evoluční algoritmy, což jsou stochastické optimalizační metody založené na darwinovském principu evoluce, staly velice populárními a obecně akceptovanými metodami, které dnes běžně používají vědci i praktičtí specialisté k řešení problémů v celé řadě nejrůznějších oborů. Pod obecný pojem evoluční algoritmy se běžně zařazují jako hlavní metodologie genetické algoritmy, evoluční strategie, evoluční programování a genetické programování. Přestože v této knize bude hlavní pozornost věnována ge-

netickým algoritmům a genetickému programování, někdy bude záměrně použit termín algoritmy evoluční. Je tomu tak zejména proto, že i přes ne zcela přesné vymezení pojmů v této oblasti celá řada algoritmů prezentovaných zejména v druhé části této knihy svým charakterem přesahuje rámec běžného chápání pojmu genetický algoritmus (například porušením principu pevné délky chromozomů atd.).

Průkopníkem v oblasti genetických algoritmů se stal John Holland, který studoval elementární procesy v populacích, jež jsou z hlediska evoluce nepostradatelné. Na základě těchto výzkumů navrhl genetický algoritmus jako abstrakci příslušných biologických procesů [65]. V přírodě obvykle individua v rámci dané populace soupeří o zdroje potřebné k přežití, chrání se před predátory a usilují o možnost vlastní reprodukce. Nejúspěšnější jedinci, kteří obstojí v tomto náročném zápasu, mají potom příležitost žít déle, nalézt a přilákat vhodného partnera a následně společně zanechat relativně větší počet potomků než méně úspěšní jedinci, kteří mají omezenější možnosti se reprodukce účastnit, a počet jejich potomků je potom menší, nebo dokonce zemřou bez potomstva. Použitím tohoto principu je možné dosáhnout toho, že vlastnosti schopnějších či lépe přizpůsobivých jedinců zakódované v relevantní genové výbavě se předávají rostoucímu počtu potomků v dalších generacích. Navíc je zřejmé, že vhodnou kombinací vlastností rodičovského páru lze docílit toho, že jejich potomek (nebo potomci) bude mít lepší vlastnosti než kterýkoliv z obou rodičů a bude tedy lépe přizpůsoben životu v daném prostředí.

Hollandův genetický algoritmus je založen na přímé analogii s právě popsány procesy, které Darwin odhalil v živé přírodě. Genetický algoritmus proto pracuje s populací jedinců, přičemž každý z těchto jedinců reprezentuje vhodným způsobem zakódované řešení daného problému. Každému individu je přiřazeno jisté nezáporné ohodnocení, jež kvantitativně vyjadřuje míru vlastností konkrétního jedince vzhledem k řešenému problému a současně je i měřítkem reprodukční způsobilosti tohoto individua. Použitím imitace náhodného procesu přirozeného výběru spolu s geneticky inspirovanými operátory křížení,



Obrázek 1.1: Schematické znázornění funkce genetického algoritmu

mutace a inverze je dána individuům možnost reprodukce. V závislosti na použité strategii potom z původní populace a jejího potomstva vzniká populace nová (viz obrázek 1.1) a tím je jeden generační cyklus ukončen.

Opakuje-li se tento proces po mnoho generací, zdatnější jedinci (to jest lepší řešení daného problému) jsou při výběru upřednostňováni, jejich vlastnosti se šíří v rámci populace a kombinují se s vlastnostmi dalších zdatných jedinců. Po určitém počtu generací potom tímto způsobem obvykle vznikne populace s jedním či více jedinci, kteří odpovídají přijatelnému (nebo dokonce optimálnímu) řešení daného problému. Samozřejmě: protože tento algoritmus je stochastický, nelze garantovat, že jeho použitím bude nalezeno řešení optimální, ale ukazuje se, že genetické algoritmy jsou obecně vhodné k „nalezení přijatelného řešení v přijatelném čase“ [8].

Při porovnání genetického algoritmu s tradičními optimalizačními technikami lze snadno nalézt několik výrazných odlišností, které významným způsobem přispívají k univerzálnosti a robustnosti genetického algoritmu. Prvním zřejmým rozdílem je využití celé populace řešení z prohledávaného prostoru namísto jediného počátečního řešení, jak je tomu u většiny klasických algoritmů. Tato skutečnost podstatně ovlivňuje celkovou robustnost algoritmu a současně přímo vybízí k paralelizaci vlastního výpočtu.

Genetický algoritmus bez dalších modifikací, kterým bude věnována zejména druhá část této knihy, je algoritmem slepým, protože kromě ohodnocení jedinců v populaci nevyužívá žádnou apriorní informaci či znalost vážící se ke konkrétnímu problému nebo relevantnímu prohledávanému prostoru. To jej na jedné straně činí velmi obecným a univerzálním, na straně druhé je zřejmé, že právě toto ignorování specifických vlastností konkrétního problému bude znamenat, že algoritmus bude jen těžko schopen konkurovat speciálními algoritmy, které byly navrženy přímo pro daný problém.

Shrnutím předchozích řádků lze konstatovat, že síla genetických algoritmů spočívá v jejich robustnosti a univerzálnosti použití. Tento fakt ale rozhodně neznamená, že genetické algoritmy jsou technikou, která je snadno a okamžitě použitelná pro jakýkoliv problém. Jak již zde bylo uvedeno, existuje-li pro konkrétní problém specializovaný algoritmus, který využívá určité znalosti o daném problému, takový algoritmus obvykle předčí genetický algoritmus jak v rychlosti, tak i v kvalitě nalezeného řešení. Doménou genetických algoritmů tedy budou zejména problémy, k jejichž řešení žádná speciální technika není k dispozici nebo není ani známa.

Na straně druhé se v případě některých opravdu obtížných problémů zřetelně ukazuje, že vhodnou kombinací genetických algoritmů a dosud používaných speciálních technik, kdy využitím robustnosti genetického algoritmu, jež je doplněna o know-how konkrétního algoritmu pro daný problém, je možné dosáhnout velmi zajímavých výsledků. Příklady takovýchto postupů uvedeme v druhé části této knihy.

Genetické programování je rozšířením genetických algoritmů v tom smyslu, že zatímco genetické algoritmy pracují s individui, která jsou reprezentována chromozomy pevné délky, v tomto případě se jedná o hierarchicky strukturované počítačové programy, které po spuštění mohou představovat potenciální řešení daného problému. Ačkoliv se tento nápad objevil poprvé již v polovině devadesátých let minulého století [20], za pomyslného otce genetického programování je považován stanfordský profesor John Koza [76, 77]. Právě Koza vytvořil metodologii, která umožňuje pěstovat počítačové programy pomocí podobných principů, jaké používají genetické algoritmy – s tím, že výsledkem evolučního procesu je program, který řeší (či přibližně řeší) konkrétní problém. Kromě odlišného způsobu reprezentace individuí je podstatným rozdílem samozřejmě i oblast aplikací a genetické programování bylo s úspěchem použito k řešení celé řady problémů. Koza [80] uvádí více než dvě desítky příkladů, kdy byl s využitím genetického programování „znovuobjeven“

či dokonce vylepšen už patentovaný vynález, přičemž v šesti případech šlo o vynález patentovaný po 1. lednu 2000. Ve dvou případech genetické programování dokonce vytvořilo zcela nový patentovatelný vynález (v obou případech jde o regulátor, který má lepší vlastnosti než dosud běžně používané regulátory). Pro korektnost je třeba dodat, že většiny z těchto výsledků bylo dosaženo na vysoce paralelních počítačích (například tisíciprocessorový stroj) a potřebný výpočetní čas se pohyboval v řádu hodin až několika dnů (při vynálezu regulátoru šlo dokonce o běh trvající čtyři týdny). Příklady uvedené ve třetí části této knihy mají spíše ilustrativní charakter, ale na druhé straně jsou snadno realizovatelné i na běžném osobním počítači.



# Genetické algoritmy

# část I.

