

Logické a číslicové systémy

Jaroslav Šípál

Autor: Jaroslav Šípál
Název díla: Logické a číslicové systémy
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Zpracoval(a): Fakulta elektrotechnická
Kontaktní adresa: Technická 2, Praha 6
Tel.: +420 2 2435 2084
Tisk: (pouze elektronicky)
Počet stran: 208
Vydání: 1.

ISBN 978-80-01-05314-0

Recenzent: Vratislav Davídek

Innovative Methodology for Promising VET Areas
<http://improvet.cvut.cz>



**Program
celoživotního
učení**

Tento projekt byl realizován za finanční podpory Evropské unie.
Za obsah publikací odpovídá výlučně autor. Publikace (sdělení) nereprezentují názory Evropské komise a Evropská komise neodpovídá za použití informací, jež jsou jejich obsahem.

VYSVĚTLIVKY



Definice



Zajímavost



Poznámka



Příklad



Shrnutí



Výhody



Nevýhody

ANOTACE

Moderní člověk je v dnešní době obklopen mnoha stroji i přístroji, které pracují buď na základě jeho pokynů, nebo jsou plně automatizovány. Řízení strojů nebo automatů je možné zařadit do jedné ze tří skupin, které jsou ovládání, řízení regulací a vyšší formy řízení.

LITERATURA

- [1] BARTSCH Hans Matematické vzorce Mladá fronta Praha 2000; ISBN 80-204-0607-7
- [2] Getting Started with MATLAB® 8; The MathWorks Inc. 2012
- [3] HÄBERLE H. a kol. – Průmyslová elektronika a informační technologie; Europa Sobotáles Praha 2003; ISBN 80-86706-04-4
- [4] REKTORYS Karel a kol. Přehled užití matematiky I+II vyd. Prometheus Praha: 2000; ISBN 80-7196-179-5
- [5] SCHMID D. a kol. – Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku; Europa Sobotáles Praha 2005; ISBN 80-86706-10-9

Obsah

1 Úvod, motivace	9
1.1 Ovládání	10
1.2 Řízení regulací.....	12
1.3 Vyšší formy řízení	14
1.4 Opakovací otázky	15
2 Terminologie.....	16
2.1 Systém	17
2.2 Spojitost a nespojitost fyzikální veličiny.....	20
2.3 Signály.....	21
2.4 Používané zkratky	24
2.5 Opakovací otázky	27
3 Realizace logických a číslicových systémů	28
3.1 Realizace základních logických funkcí různými technologiemi	30
3.2 Schematické značky pro logické obvody	34
3.3 Úprava logických výrazů.....	36
3.4 Matematické programy.....	38
3.5 MATLAB	39
3.6 Opakovací otázky	44
4 Kombinační logické funkce a Booleova algebra, pravdivostní tabulky, Karnaughovy mapy, minimalizace, realizace pevnou logikou a programem	45
4.1 Logické funkce	45
4.2 Výroková algebra	46
4.3 Booleova algebra.....	49
4.4 Karnaughova mapa.....	52
4.5 Časová posloupnost logických signálů.....	56
4.6 Opakovací otázky	61
4.7 Příklady k procvičení.....	62
4.8 Rozdělení systémů.....	66
4.9 Opakovací otázky	67
4.10 Kombinační logické funkce.....	68
4.11 Použití kombinačních logických obvodů	70
4.12 Multiplexery a demultiplexory	71
4.13 Převodník kódu.....	74
4.14 Bezpečnostní obvody	78

5	Sekvenční logické funkce, podstata sekvenčního chování, zpětné vazby, sekvenční a časové logické členy, synchronní a asynchronní realizace.....	79
5.1	Sekvenční logické funkce, Sekvenční logické obvody	79
5.2	Binární paměť.....	80
5.3	Synchronní a asynchronní realizace	83
5.4	Opakovací otázky	88
6	Minimum o fuzzy logice a neuronových sítí	89
6.1	Úvod	89
6.2	Východiska fuzzy logiky	91
6.3	Fuzzy logika jako zobecnění binární logiky.....	96
6.4	Prahové a majoritní funkce v binární logice	97
6.5	Logické výrazy	98
6.6	Souvislost s AND a OR.....	99
6.7	Použití v zabezpečovací technice	100
6.8	Důvod pro fuzzy zobecnění.....	101
6.9	Postup při fuzzy zobecnění.....	102
6.10	Zobecnění logických výrazů	104
6.11	Fuzzy zobecnění AND, OR, NOT.....	105
6.12	Fuzzy zobecnění negace – fuzzy NOT.....	106
6.13	Fuzzy zobecnění AND a OR.....	107
6.14	Postačuje minimum a maximum	110
6.15	Příklad fuzzy diagnostického systému	111
6.16	Určení pravdivosti vstupních termů – fuzzifikace	112
6.17	Vyčíslení pravdivosti – inference.....	113
6.18	Vyčíslení jednoznačného výsledku – defuzzifikace.....	114
6.19	Defuzzifikace	115
6.20	Výstupní termy	116
6.21	Postup defuzzifikace bez implikace	117
6.22	OR mezivýsledků – sjednocená plocha.....	118
6.23	Metoda těžiště – CoG	120
6.24	Metoda bisekce – CoA	121
6.25	Metoda maxima – LM, RM.....	122
6.26	Metody těžiště singletonů – CoGS.....	123
6.27	Obdoba váženého průměru.....	124
6.28	Mamdaniho fuzzy systém.....	125
6.29	Ladění fuzzy systému	126
6.30	Popis systému	127

6.31	Rovnoměrné rozmístění všech termů	128
6.32	Zhuštěné vstupní termy	132
6.33	Zředěné vstupní termy	135
6.34	Zhuštěné výstupní termy	137
6.35	Zředěné výstupní termy	139
6.36	Shrnutí kapitol	141
7	Neuronové sítě	142
7.1	Úvod	142
7.2	Principy	143
7.3	Umělé neuronové sítě	146
7.4	Perceptron	148
7.5	Algoritmus zpětného šíření (Back-propagation)	151
7.6	Hopfieldova síť	153
7.7	ART síť	154
7.8	Aplikace	155
7.9	Kontrolní test	156
8	Číslicové systémy	157
8.1	Úvod	157
8.2	Číslicové filtry	158
8.3	FIR	160
8.4	IIR	161
8.5	Aplikační oblasti	163
8.6	Numerická regulace	164
8.7	Poruchy a kvalita regulace	165
8.8	Stabilita a přechodové děje	166
8.9	Statické systémy	167
8.10	Popis soustavy	168
8.11	Charakteristika	169
8.12	Modifikace soustavy	171
8.13	Elektrické systémy	174
8.14	Tepelné a mechanické systémy	176
8.15	Nabíjení kapacitoru	177
8.16	Vybíjení kapacitoru	179
8.17	Souvislost tepelných a elektrických soustav	181
8.18	Souvislost tepelných, hydraulických a elektrických soustav	182
8.19	Zdroje napětí a proudu pro různé fyzikální děje	183

8.20	Kmitavé soustavy	186
8.21	Nelinearity	189
8.22	Identifikace soustav	192
8.23	Regulace	194
8.24	Zpětná vazba.....	195
9	PID regulátory	196
9.1	Implementace	197
9.2	Varianty	199
9.3	Přírůstkový algoritmus	200
9.4	Souvislost s FIR systémem.....	201
9.5	Varianty PI, PII.....	202
9.6	Varianta P	203
9.7	Varianta PI.....	204
9.8	Realizace číslicových regulátorů.....	208

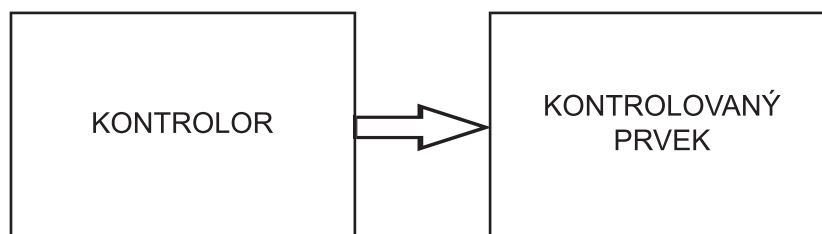
1 Úvod, motivace

Moderní člověk je v dnešní době obklopen mnoha stroji i přístroji, které pracují buď na základě jeho pokynů, nebo jsou plně automatizovány. Řízení strojů nebo automatů je možné zařadit do jedné ze tří skupin, které jsou nazvány:

- ovládání (tak zvané otevřené – přímé řízení, bez zpětné vazby),
- řízení regulací (uzavřené zpětnovazební řízení),
- vyšší formy řízení.

1.1 Ovládání

Ovládání patří mezi nejjednodušší způsoby řízení. Tímto způsobem je zajištěno spouštění jednoho nebo více zařízení. Tato zařízení mohou být pouze zapnuta nebo vypnuta, případně vykonávají určitý sled operací. Grafické schéma řízení ovládáním je na obrázku č. 1.1.



Obr. 1. 1: Základní schéma řízení ovládáním



Ovládaný člen je stroj, který je řízen ovládacím členem. Pro přiblížení je možné si představit následující příklad. Ovládaným členem je kotoučová pila a ovládacím členem silový vypínač elektrické energie. Zapnutím vypínače, ovládacího členu, je kotoučová pila, ovládaný člen, uvedena do provozu. Vypnutím vypínače je provedeno odstavení z provozu.

Jiným příkladem může být soubor pasových dopravníků, které na sebe navazují. Zapnutím tohoto souboru dochází k postupnému spouštění všech dopravníků. Jako první se uvede do provozu dopravník, který je ve směru toku materiálu poslední. Až když bude v normálním provozu (ustálený stav), dojde ke spuštění předchozího dopravníku. Tímto způsobem, proti toku dopravovaného materiálu, jsou postupně uvedeny všechny dopravníky do provozu. Odstavení může být postupné tak, že jako první je vypnut ten dopravník, který byl uveden do provozu jako poslední. Další dopravníky jsou odstavovány v časových intervalech. Délka časového intervalu mezi popudem pro vypnutí a skutečným vypnutím jednotlivého dopravníku musí zajistit vyprázdnění tohoto dopravníku od materiálu. Takto jsou postupně odstavovány všechny dopravníky, postupně po směru toku materiálu.

Ovládání je možno podle způsobu provedení rozdělit do několika skupin:

- místní,
- dálkové,
- automatické,
- programové.

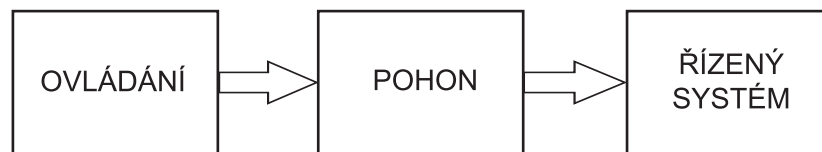
Místní ovládání se používá u jednoduchých strojů a zařízení. Zejména je možné vidět ho u domácích spotřebičů a elektrického nářadí.

Dálkové ovládání je velmi časté ve výrobním procesu, kde dochází k ovládání více strojů nebo zařízení z centrální dozorní nebo operátorského stanoviště. Velmi často je provedena kombinace místního a dálkového ovládání strojů pomocí přepínače. Tento způsob se uplatní především při dílčích opravách strojů.

Automatické ovládání je takové, kdy ovládaný člen je uváděn/odstavován do/z provozu jinými než lidskými popudy. Jako příklad může posloužit automatické čerpání vody z jímky. Čidlo měřící výšku hladiny dá popud ke spuštění nebo odstavení čerpadla.

Programové ovládání je použito u souboru strojů. Například při spuštění velkých pohonných jednotek je nutné zajistit mazání a chlazení spouštěného stroje během celého provozu a nějaký čas po odstavení. Pokud by k tomu nedošlo, byl by stroj poškozen. Takže na povel spuštění stroje, jsou nejprve uvedena do provozu čerpadla mazacího oleje. Po dosažení potřebného tlaku mazacího oleje jsou uvedena do provozu čerpadla zajišťující oběh chladicí kapaliny. Po splnění těchto dvou požadavků je hlavní pohon uváděn do provozu. Příkladem podobného spuštění souboru zařízení v oblasti domácích spotřebičů může být automatická pračka.

Ovládání můžeme zobrazit podrobněji, jak je znázorněno na obrázku č. 1.2. Ovládanou soustavou je například čerpadlo, které pohání elektromotor (akční člen). Připojení k elektrickému napájení zajišťuje silový vypínač, který je ovládán místně nebo dálkově (řízení).

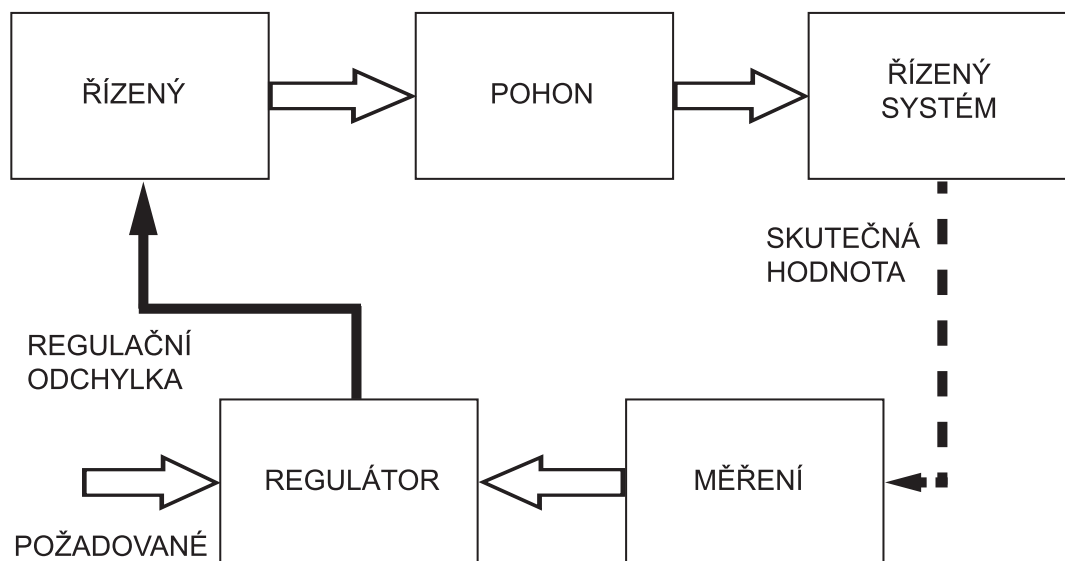


Obr. 1. 2: Podrobnější schéma řízení ovládání

1.2 Řízení regulací

Vyšší úroveň řízení je řízení regulací (regulace nebo automatické řízení). To znamená, že systém je řízen tak, aby jedna nebo více fyzikální veličin byly udržovány na předepsaných parametrech. Příkladem takového systému může být plynová pec (ovládaná soustava), která provádí přehřev materiálu z důvodů určité povrchové úpravy (např. kalení). Materiál dodaný dovnitř pece musí být ohřát na stanovenou teplotu a tuto teplotu musí regulační obvody pece (regulátor a řízení) udržovat určitou dobu (žádaná hodnota). To znamená, že teplota musí být měřena (měřící člen) a podle její velikosti je regulován regulační armaturou (akční člen) přívod topného plynu. Schématické znázornění celého procesu je na obrázku č. 1.3.

V ovládané soustavě je jeden nebo více parametrů měřeno. Může se jednat o libovolnou fyzikální veličinu: teplota, tlak, rychlost, síla, napětí apod. Měřící člen zpracuje měřenou veličinu na příslušný signál a předá ji do regulátoru. Protože se jedná o předání informace ze soustavy, je tato větev nazývána zpětnou vazbou. Do regulátoru zároveň vstupuje žádaná hodnota (veličina). Jedná se požadovanou velikost regulovaného parametru. Rozdílem signálů žádané veličiny a zpětné vazby vzniká regulační odchylka. Signál regulační odchylky vstupuje do bloku řízení, který podle velikosti vytvoří příslušnou řídicí veličinu pro akční člen. Svou činností pak akční člen ovlivní soustavu a její parametry.



Obr. 1.3: Schéma řízení regulací

Výše uvedený příklad je možno aplikovat na schématu. Pro technologický proces je potřebná určitá teplota – žádaná veličina. V prostoru plynové pece je naměřena teplota, která je nižší než žádaná. Regulátor vyhodnotí rozdíl mezi žádanou a měřenou teplotou a vytvoří příslušnou regulační odchylku. Ta vstupuje do bloku řízení, který ji vyhodnotí tak, že je nutno zvýšit přívod plynu do pece. Velikost řídicí odchylky odpovídá změně postavení aktuátoru – plynového regulačního ventilu. Ventil propustí více plynu do pece a hořením se uvolní větší množství

energie a tím dochází ke zvýšení teploty. Celý regulační pochod se opakuje, dokud sledovaný parametr nedosáhne nastavené hodnoty.

1.3 Vyšší formy řízení

Ve složitých systémech jsou regulátory a řídicí jednotky součástí řídicího systému. Tento systém potom používá vyšší formy řízení. Tyto vyšší formy řízení zahrnují činnosti, které podporují výsledný účinek řídicího procesu.

1.4 Opakovací otázky

1. Popište způsoby ovládnání.
2. Jaký je rozdíl mezi ovládnáním a regulací?

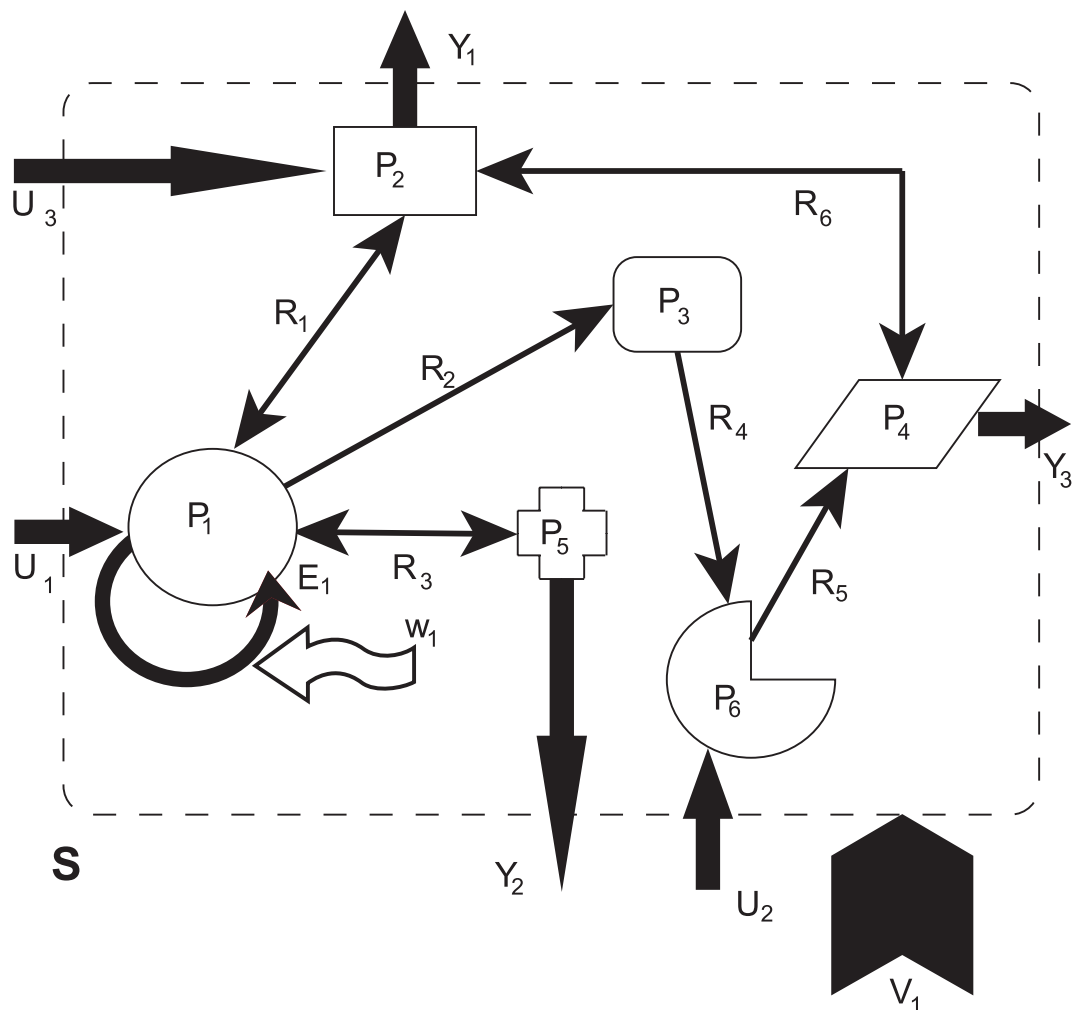
2 Terminologie

Teoretickým základem pro ovládání je matematická logika. Tato oblast je zastoupena především binární logikou. Vysvětlovány jsou logické funkce, protože požadavky na řízení strojů a jejich souborů jsou zadávány slovně a pro řešení je nutný matematický zápis, který popisuje technologické požadavky. Jednotlivé prvky matematického zápisu je možné technicky realizovat. Zjednodušováním matematického zápisu je provedena optimalizace počtu fyzických prvků, potřebných k realizaci řídicího obvodu.

2.1 Systém



Pod pojmem systém je nutné rozumět soubor určitých prvků, jejich vztahů a vlastností, schématický náčrtek je na obrázku č. 2.1. Definicí systému rozumíme ucelenou množinu „S“, která se skládá z množiny prvků a množiny jejich vzájemných relací. Na systém „S“ působí množina vstupů a množina poruch. Systém „S“ zase na vnější okolí působí množinou výstupů. Pokud systém „S“ má nějaké předepsané chování působí v něm množina žádaných veličin a množina regulačních odchylek.



Obr. 2.1: Schéma systému



Přiblížení obecné definice čtenářům je možné uskutečnit na technickém příkladu letícího letadla. Samotný stroj je složen ze stovek součástí, kde každá má svou specifickou funkci. Dále jsou v letadle lidé, posádka i cestující. Protože se letadlo pohybuje v prostoru a čase, působí na něj vnější vlivy, jako jsou teplota, síla a směr větru aj. Jiné vlivy, které je možno označit jako poruchové, mohou být náhlé turbulence, úder blesku i poruchy zařízení letadla. Některé z těchto poruch mohou mít velký vliv na hlavní činnost letadla – let, například porucha motoru.

Jiné, například porucha toalety, silně ovlivní nálady mezi cestujícími, ale hlavní činnost není ohrožena. Mezi jednotlivými prvky jsou vytvořeny vztahy, a to buď na základě fyzikálních zákonů, společenského postavení, sympatií nebo antipatií. Všechny tyto prvky, stavy, vztahy, vnější veličiny i poruchy ovlivňují výsledek, kterým je bezpečný, spokojený let a dosažení cíle.

Z uvedeného příkladu je zřejmé, že systém nemusí být pouze nějaký stroj, ale že lze rozlišit systémy technické, fyzikální, sociální, výchovné, matematické, historické, společenské, živočišné a jiné, ale také jejich vzájemné kombinace. Tato rozmanitost systémů ukazuje, že není jednoduché tyto systémy nějakým způsobem rozdělit a popsat.

Může se tedy jednat o strojní systémy, elektronické systémy, společenské systémy, botanické systémy, zoologické systémy a samozřejmě jejich kombinace. Jako příklad technického systému může být uveden automobil. Pokud bude popisováno letící dopravní letadlo jako celek, může být chápáno jako technicko-sociální systém, uzavřený skleník je botanickým systémem apod.

Systémy mohou být rozděleny podle relací mezi vstupními a výstupními veličinami na: statický a dynamický; lineární a nelineární; jednorozměrný a vícerozměrný atd.

Podle počtu vstupních a výstupních veličin rozdělujeme systémy na:

- systém s jedním vstupem a jedním výstupem označovaným SISO (single input, single output)
- systém s několika vstupy a jedním výstupem označovaným MISO (multi input, single output)
- systém s jedním vstupem a několika výstupy označovaným SIMO (single input, multi output)
- systém s několika vstupy a několika výstupy označovaným MIMO (multi input, multi output)

Z časového hlediska a podle relací jsou systémy děleny:

- lineární s časově stálými parametry – LTI (Linear Time Invariant System); příkladem může být vztah napětí a proudu na odporu
- lineární s časově nestálými parametry – LTNI (Linear Time Non-Invariant System); příkladem může být vztah napětí a proudu na fotoodporu
- nelineární s časově stálými parametry – NTI (Nonlinear Time Invariant System); příkladem může být vztah rychlosti výtoku kapaliny otvorem u dna otevřené nádrže
- nelineární s časově nestálými parametry – NTNI (Nonlinear Time Non-Invariant System); příkladem může být vztah mezi počtem narozených dětí a uzavřených manželství ve společnosti



Příkladem statického systému může být například napěťový dělič. Výstupní napětí je dáno velikostí rezistorů a vstupního napětí. Tento vztah je popsán vzorcem

$$u_2 = u_1 \times \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}. \text{ V tomto vztahu není žádná časová závislost a je popsán pouze}$$

závislostí na vstupním napětí. Naproti tomu elektrický proud procházející fotoodporem závisí nejen na napájecím napětí, ale také na intenzitě dopadajícího světla. To znamená, že v průběhu 24 hodin se relace mění a systém je dynamický.

Lineární systémy jsou systémy, v nichž všechny členy pracují s lineární závislostí výstupu na vstupu, například síla hydraulického lisu v závislosti na pohybu řídicího pístu. Nelineární systém má aspoň jeden člen s nelineární závislostí mezi vstupem a výstupem. Příkladem nelineární relace je odpor vzduchu jedoucího automobilu.

Systém s jedním vstupem a jedním výstupem je možno si představit jako lednici. Vstupní hodnotou je veličina, která reprezentuje ztráty tepla v chladícím prostoru. Výstupní veličinou je skutečná teplota v chladícím prostoru. Naproti tomu letící letadlo má několik vstupů: rychlost a směr větru, venkovní teplota vzduchu, hmotnost nákladu apod. Výstupy jsou: úhel směrových a výškových klapek, tah motoru apod.

V tabulce č. 1 jsou používané symboly množin, jejich veličiny jsou pak označovány malým písmenem.

Tabulka 1: Používané symboly

$S = \{P;R;U;Y;V\}$	P – množina prvků	R – množina relací	U – množina vstupů
Y – množina výstupů	W – množina žádaných hodnot.	E – množina regulačních odchylek	V – množina poruch

Veličiny systému jsou: vstupní (akční) veličiny „ $u(t)$ “; výstupní veličiny „ $y(t)$ “; stavové veličiny „ $x(t)$ “; regulační odchylka „ $e(t)$ “; poruchová veličina „ $v(t)$ “ a žádaná veličina „ $w(t)$ “.

2.2 Spojitost a nespojitost fyzikální veličiny

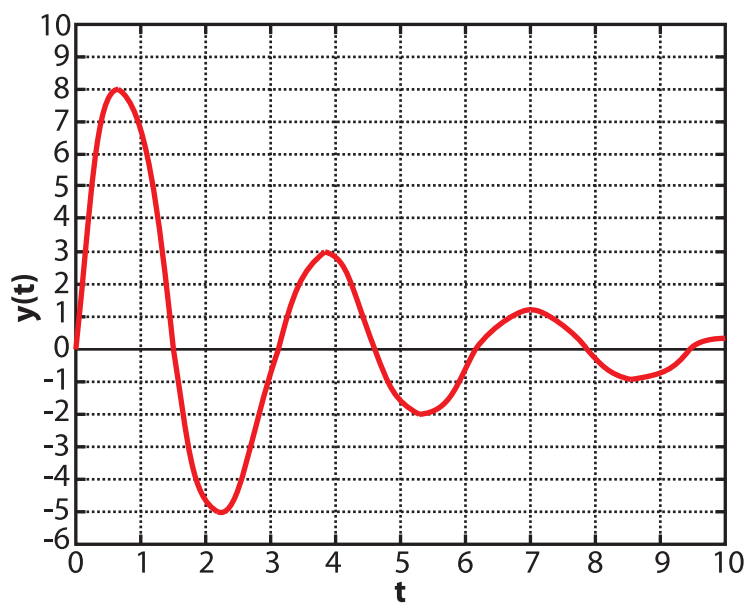
Fyzikální děje v přírodě i okolí probíhají ve velké většině spojitým způsobem. Hodnoty fyzikálních veličin nám popisují stav daného děje. Totéž platí i pro ovládaný systém (stroj nebo skupina strojů). Informace o hodnotách sledovaných veličin, ale i řídicí povely jsou nazývány signály.

2.3 Signály

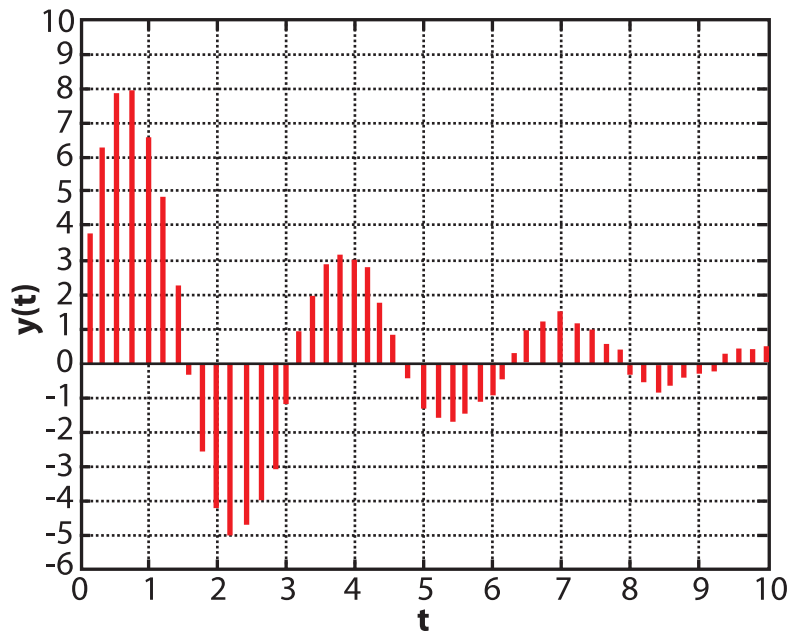
V teorii řízení je důležitá informace. Nositel informace je signál, zdroje signálu jsou vysílače, příjem signálu zajišťují přijímače. Signály jsou rozděleny podle vztahu k nezávisle nebo závisle proměnné. Nezávisle proměnná je čas a závisle proměnná je amplituda. Rozdělení signálů je následovné:

- Signály spojité v čase (v každém časovém okamžiku je známá hodnota amplitudy):
 - Analogové signály, příklad na obrázku č. 2.3.
 - Kvantované signály, příklad na obrázku č. 2.3.
- Signály nespojité v čase (mezi jednotlivými vzorky není známá hodnota amplitudy):
 - Vzorkované (diskrétní) signály, příklad na obrázku č. 2.3.
 - Amplitudově a časově nespojité (číslicové) signály, příklad na obrázku č. 2.3.

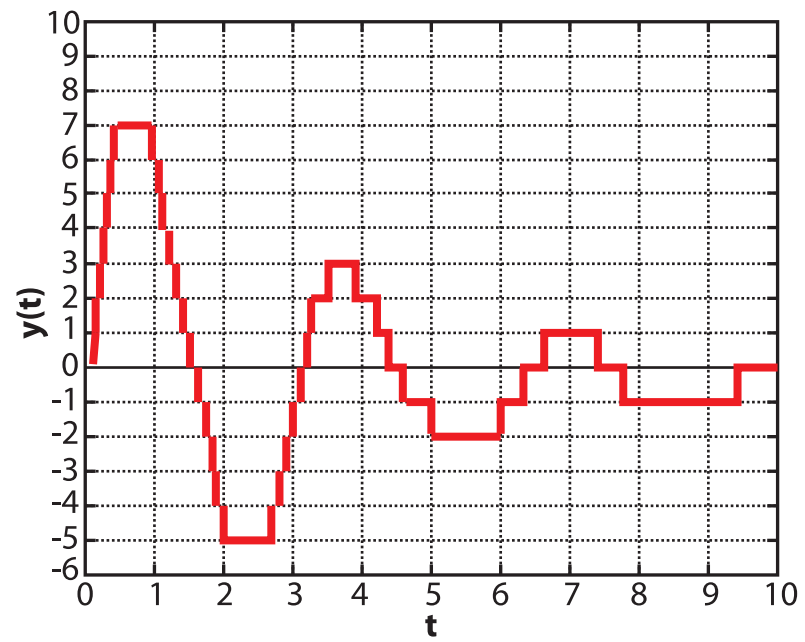
a)



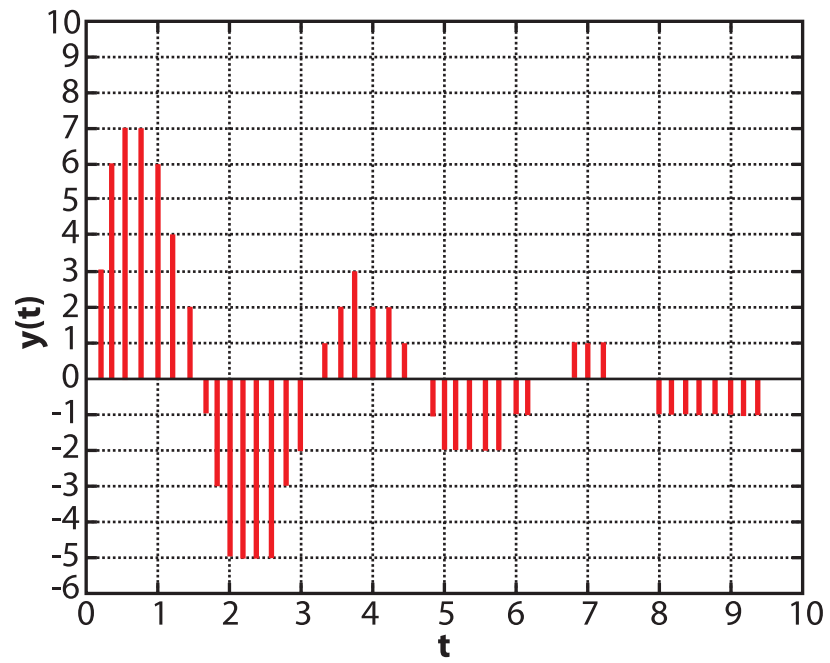
b)



c)



d)



Obr. 2.3: Analogový, kvantovaný, vzorkovaný, amplitudově nespojitý signál

2.4 Používané zkratky

V oblasti zabývající se řízením strojů jsou používány zkratky, které charakterizují způsob řízení strojů. Používané zkratky jsou převzaty z anglické terminologie, jedná se zejména:

- CNC
- PLC
- PAC
- HMI
- DCS

Číslicové řízení – CNC (Computer Numerical Control)

Rozvoj průmyslové výroby s sebou přinesl potřebu zvýšené výroby na obráběcích a tvářecích strojích. Řízení strojů, které bylo klasické ruční nebo vačkové, bylo nahrazováno číslicovým řízením. První číslicově řízené stroje se objevovaly ve 40. a 50. letech 20. století. Řídicí instrukce pro servomechanismy těchto strojů byly na děrné pásce (NC stroje). S rozvojem výpočetní techniky byly stroje touto výpočetní technikou vybaveny (CNC stroje).

V moderních CNC systémech je vysoce automatizovaný komponentový design s využitím programů CAD (Computer-Aided Design) a CAM (Computer-Aided Manufacturing). Tyto programy vytvoří počítačový soubor, který vypisuje sled příkazů potřebných k provozu konkrétního stroje, které mohou být vybaveny různými obráběcími nástroji – obráběcí centra.

PLC (Programmable Logical Controller)

Programovatelný automat (PLC) nebo programovatelný regulátor je digitální počítač, který je používán k řízení chodu strojů a výrobních procesů. PLC jsou používány v mnoha průmyslových odvětvích. Na rozdíl od univerzálních počítačů, je PLC určen pro zpracování informací z více vstupů, je odolnější vůči změnám teplot, vůči elektrickému rušení a proti vibracím a nárazům. Programy pro kontrolu činnosti zařízení jsou obvykle uloženy v bateriově zálohované nebo pevné paměti. PLC pracuje v reálném čase a systému, protože výstupní příkazy, musí být reakcí na změny vstupních podmínek.

PAC (Programmable Automation Controller)

PLC jsou postupně doplňovány novými a novými funkcemi, které již nejsou jednoduchými funkcemi logického typu. Jsou doplněny nejenom regulačními úlohami, ale celou škálou úloh, v nichž se vyskytují i velmi náročné numerické algoritmy a algoritmy umělé inteligence. Pro jejich označení se někdy používá

zkratka PAC (Programmable Automation Controller), který je možné přeložit jako „programovatelný systém pro automatizaci“.

HMI (Human Machine Interface)

Významově tato zkratka popisuje uživatelské rozhraní. Jedná se o místo, kde dochází k interakci mezi lidmi a stroji. Cílem interakce mezi člověkem a strojem v uživatelském rozhraní je efektivní fungování a ovládání stroje, a dále zpětná vazba od stroje. Jedná se o informace o stavu stroje nebo jeho součástí a o hodnotách měřených veličin probíhajícího technologického procesu. Tyto informace pomáhají provozovateli při přijímání operativních rozhodnutí při řízení strojů a procesů.

Uživatelské rozhraní je systém, který obsahuje hardware (fyzické) a software (logické) komponenty. Existují různé systémy uživatelských rozhraní od jednoduchých mechanických až po počítačové systémy. V současné době se pro řízení průmyslových procesů používají vizualizační programy SCADA (supervisory control and data acquisition), které umožňují spojení zobrazovaných dat s animacemi.

DCS

Tyto systémy (Distributed control system) jsou velké systémy pro řízení procesů (Process Control Systems PCS – někdy jsou tyto zkratky použity jako synonyma), které začaly být používány v 60. letech s příchodem prvních řídicích počítačů, které představovaly centralizované řešení číslicového řízení velkých technologických celků jako např. chemických procesů, elektráren atp. Byly budovány jako suilně centralizované řešení. V 70. letech se objevily první řídicí minipočítače, které sice umožnily částečnou decentralizaci. Tato řešení se používala celá 70. léta a na začátku 80. let. Tyto systémy se obvykle dělí na DCS: pro elektrárny, pro jaderný program, pro ostatní technologické procesy, řídicí systémy budov.

Některé DCS systémy jsou specializované, některé jsou naopak použitelné ve více oblastech. Výjimku tvoří řídicí systémy, kde jsou mimořádně vysoké požadavky na bezpečnost a spolehlivost řídicího systému. Vysoce bezpečné a spolehlivé systémy jsou velmi drahé a nejsou proto nasazovány tam, kde toho není nezbytně třeba.

DCS systém je charakterizován důslednou hierarchickou výstavbou se třemi úrovněmi řízení, které jsou zdola nahoru:

- senzorická úroveň – snímače, aktuatory,
- úroveň bezprostředního řízení (technologické řízení a regulace),
- operátorská úroveň,
- nadřazená úroveň.

V každém případě však velké DCS představují stále jediný řídicí systém s vysokou mírou spolehlivosti v oblastech, kde je potřeba ošetřit velký počet vstupů a výstupů nejrůznějšího charakteru a kde spolehlivost a bezpečnost je naprosto kategorickým požadavkem. Jejich předností je rovněž kompaktnost celého systému.

2.5 Opakovací otázky

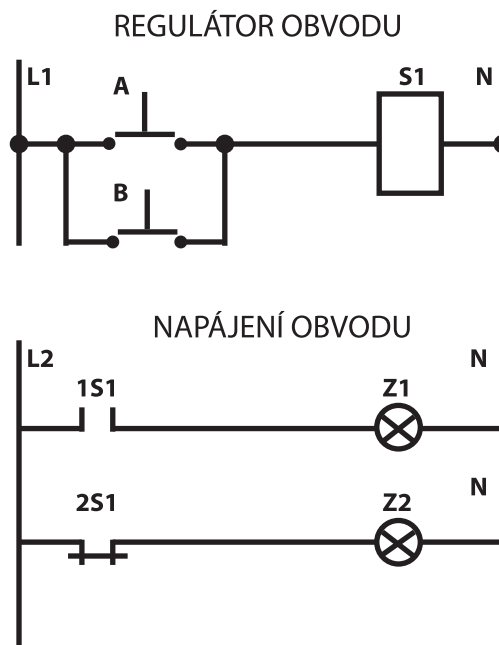
1. Vysvětlete, co se rozumí pod pojmem systém, a uveďte příklad.
2. Vysvětlete co je signál a jakým způsobem se signály rozdělují.
3. Vysvětlete význam zkratk: CNC; PLC; PAC; HMI; DCS.

3 Realizace logických a číslicových systémů

Binární systémy je možné provádět různými technologiemi, v nichž jsou aplikovány logické funktoři. Např. v ovládacích schématech, pomocí tranzistorů a i v mechanickém provedení.

- Pevná logika
- FPGA
- Program uC
- DSP
- PC
- PLC
- Ovládací schémata

Ovládací schémata jsou elektrotechnická výkresová dokumentace, v níž je znázorněn ovládací i silový obvod. Prvky silového obvodu jsou ovládány vypínači, silovými kontakty stykačů nebo relé. Ovládací obvod je složen z ovládacích prvků, jako jsou tlačítka, vypínače, časovými i koncovými spínači, cívkami relé nebo stykačů. Obojí je možné nahradit prvky slaboproudé elektroniky.



Obr. 3.1: Příklad ovládacího schématu

Na obrázku je nakresleno schéma ovládacího i silového obvodu s jednoduchou funkcí. Stiskem tlačítka A je přivedeno ovládací napětí na cívku stykače S1, který sepne. Jeho spínací kontakt 1S1 připojí k napětí spotřebič (žárovku) Z1 a zároveň

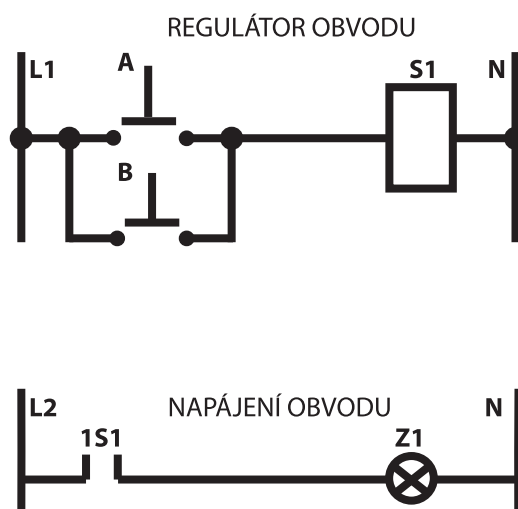
rozpínací kontakt 2S1 odpojí spotřebič Z2 od napětí. Funkce obvodu je taková, že stiskem tlačítka A nebo se rozsvítí žárovka Z1 a zhasne žárovka Z2. Uvolněním tlačítka A nebo B bude výsledek opačný.

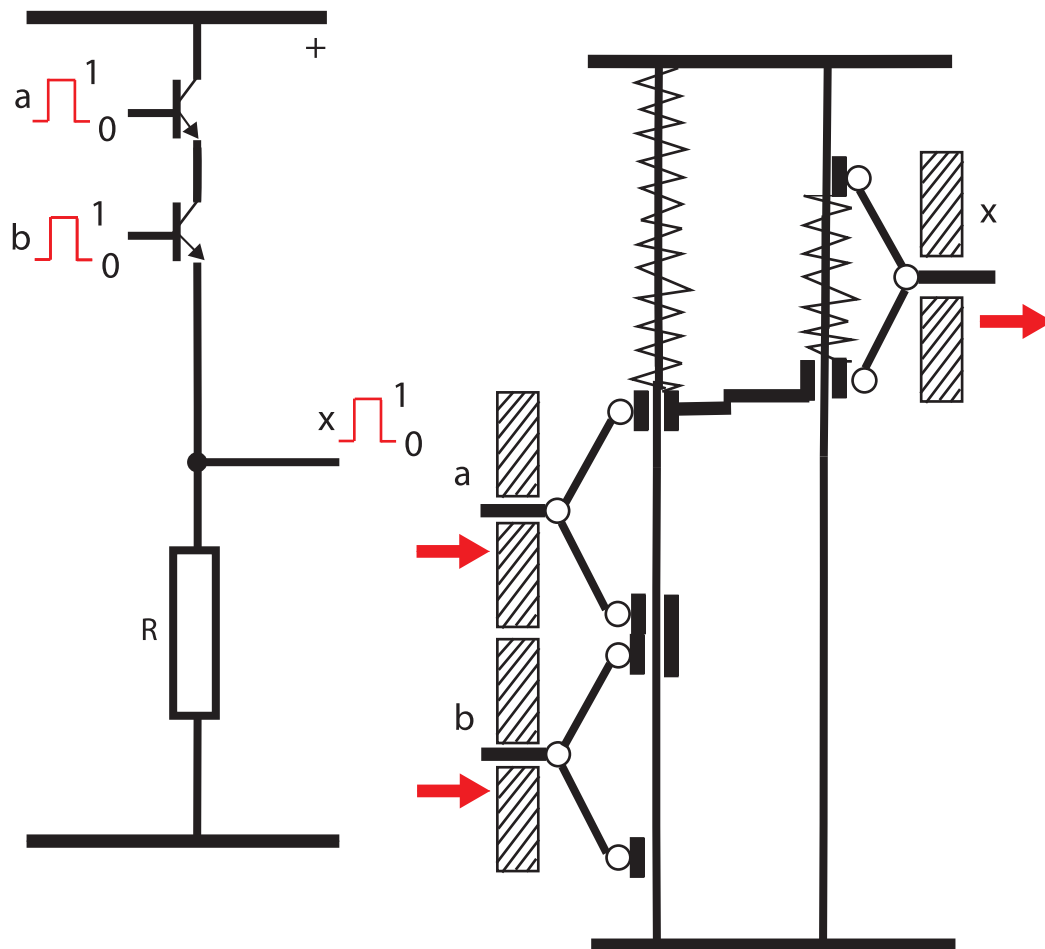
Nezávisle proměnná A nebo B realizuje dvě logické funkce, ekvivalenci a negaci.

3.1 Realizace základních logických funkcí různými technologiemi

Logická funkce konjunkce – AND

V následujících příkladech je možno prostudovat technickou realizaci konjunkce dvou nezávisle proměnných. Závisle proměnná nabývá pravdivých hodnot jen tehdy, když současně obě nezávisle proměnné jsou pravdivé. V ovládacím obvodu je řešení sériové zapojení tlačítek. Realizace pomocí tranzistorů je řešena sériovým zapojením tranzistorů. V mechanické podobě je potřeba působit na obě mechanická táhla (a, b), aby bylo možno překonat sílu pružiny.

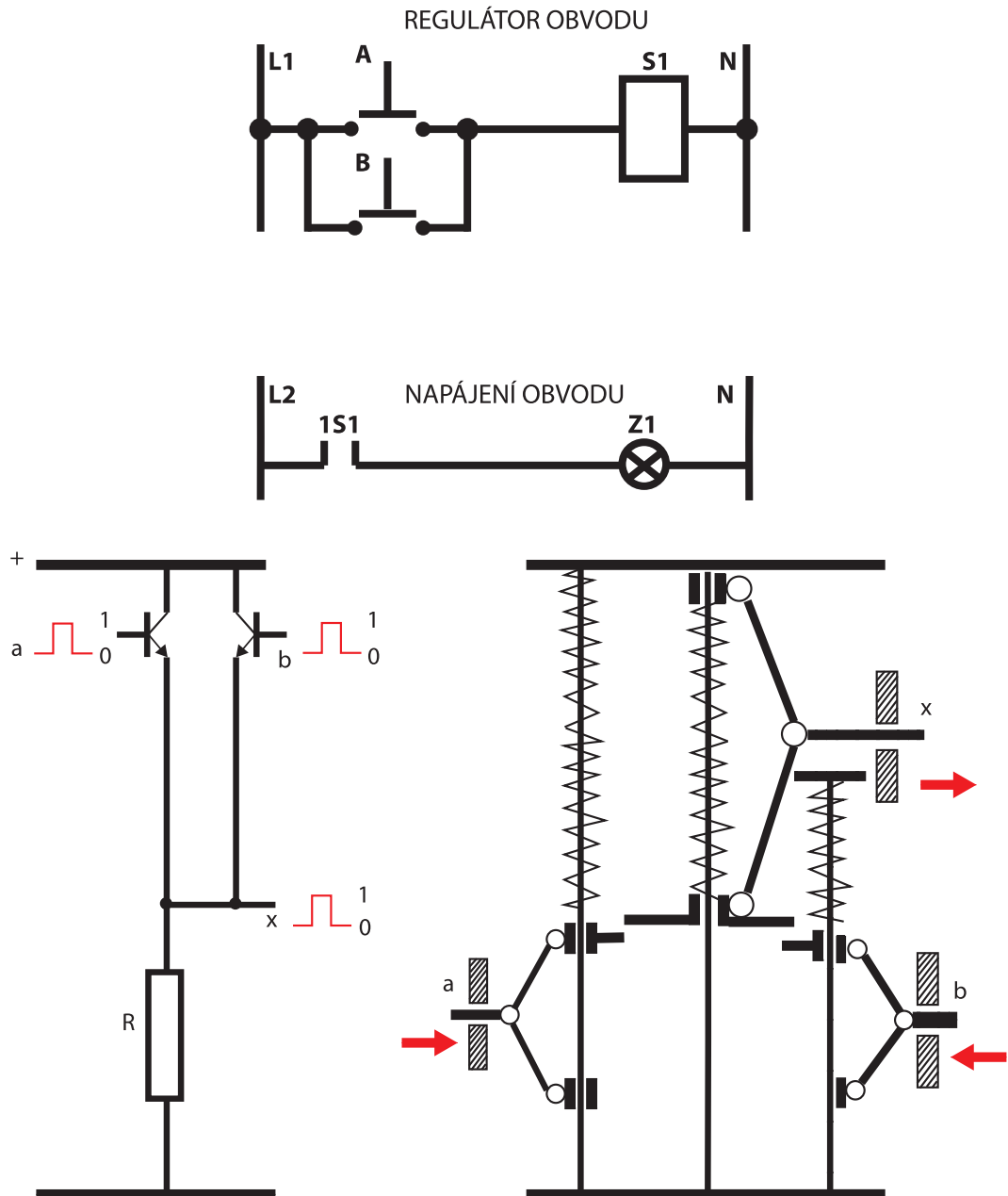




Obr. 3.2: Logická funkce konjunkce – AND

Logická funkce disjunkce – OR

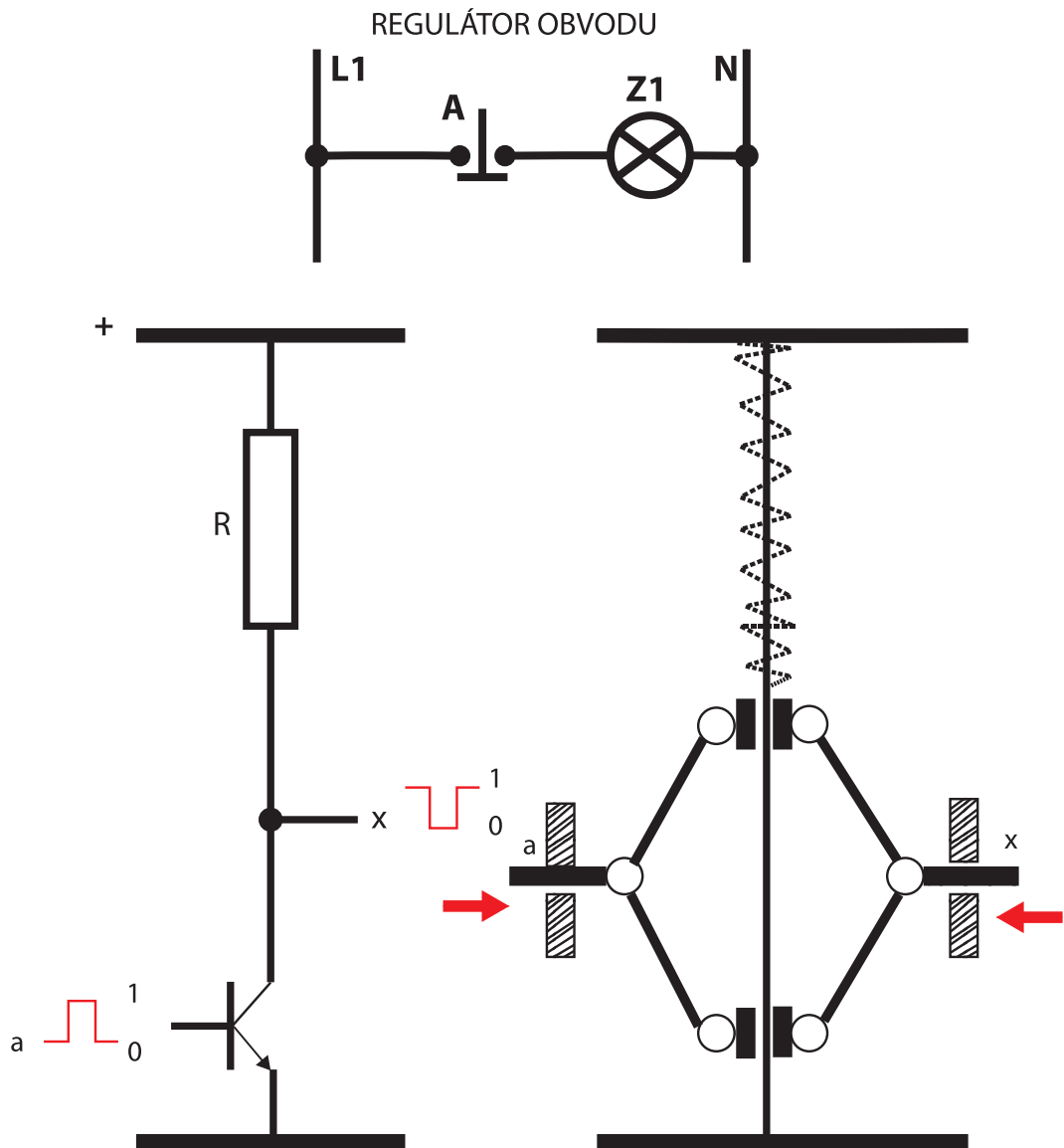
V následujících příkladech je možno prostudovat technickou realizaci disjunkce dvou nezávisle proměnných. Závisle proměnná nabývá pravdivých hodnot jen tehdy, když alespoň jedna nezávisle proměnná je pravdivá. V ovládacím obvodu je řešením paralelní zapojení tlačítek. Realizace pomocí tranzistorů je řešena rovněž paralelním zapojením tranzistorů. V mechanické podobě je potřeba působit alespoň na jedno z mechanických táhel (a, b).



Obr. 3.3: Logická funkce disjunkce – OR

Logická funkce negace – NOT

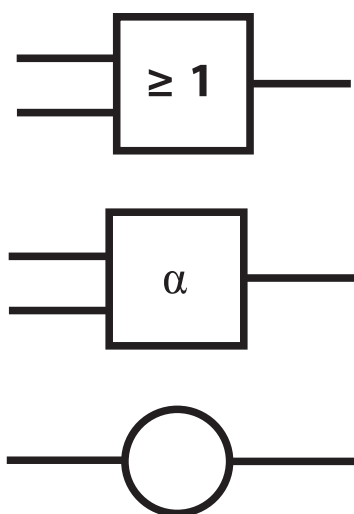
V následujících příkladech je možno prostudovat technickou realizaci negace jedné nezávisle proměnné. Závisle proměnná nabývá pravdivých hodnot jen tehdy, když nezávisle proměnná je nepravdivá. V ovládacím obvodu je řešením zapojení rozpínacích kontaktů tlačítka. Realizace pomocí tranzistoru je řešena zkratováním napětí tranzistorem. V mechanické podobě působením na mechanické táhlo (a) se provede opačná reakce táhla x.



Obr. 3.4: Logická funkce negace – NOT

3.2 Schematické značky pro logické obvody

Vzhledem k tomu, že logické operace je možné realizovat různými technologiemi, jsou vytvářena logická schémata. Ve schématech logických obvodů jsou používány schematické značky. Na obrázku č. 3.5 je schematická značka pro znázornění logického součtu, která má dva vstupy (vlevo) a jeden výstup. Na obrázku č. 3.6 je schematická značka pro logický součin, která má dva vstupy a jeden výstup. Kolečko na obrázku č. 3.7 značí negaci. Ve schématech není kresleno samostatně, ale vždy na vstupu nebo výstupu značek pro součin nebo součet.



Obr. 3.5, 3.6, 3.7: Součet, součin, negace

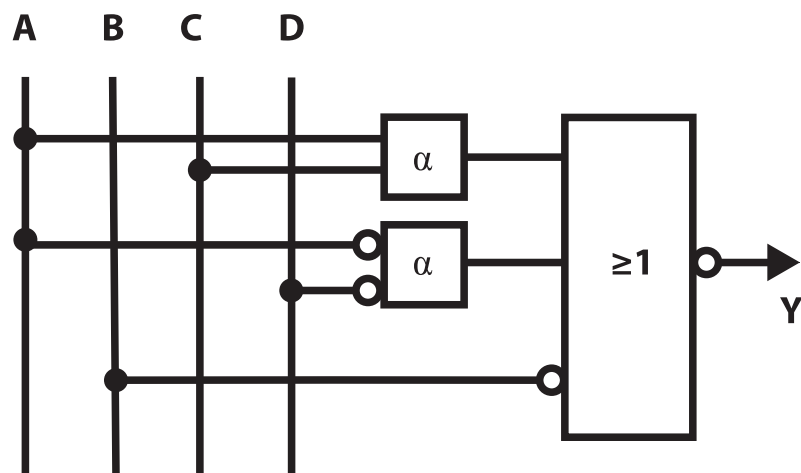
Poznámka: V některých, zejména starších schématech, mohou být značky jiného tvaru, ne čtverec nebo obdélník. Značka pro negaci je stejná.



Příklad 3.1

Nakreslete schéma logického obvodu, který je vyjádřen vztahem:

$$Y = \overline{A \times C + \overline{A} \times \overline{D}} + B$$



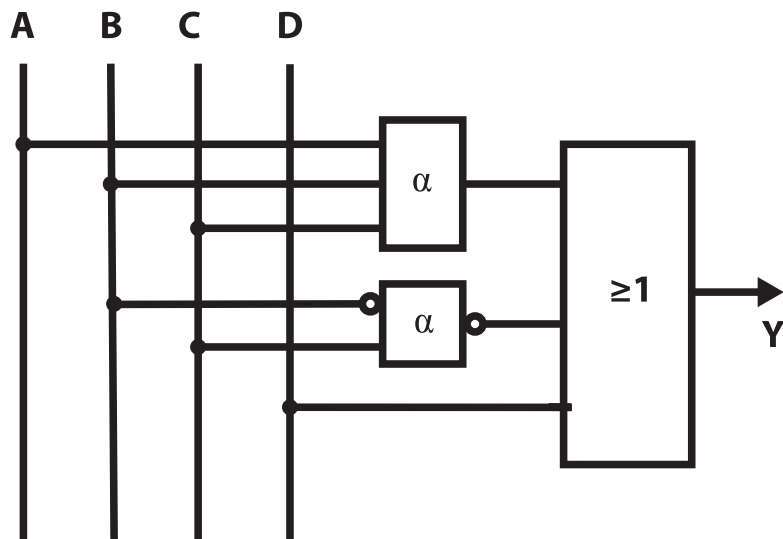
Obr. 3.8: Řešení příkladu 3.1



Příklad 3.2

Nakreslete schéma logického obvodu, který je vyjádřen vztahem:

$$Y = A \times B \times C + \overline{B \times C} + D$$



Obr. 3.9: Řešení příkladu 3.2

3.3 Úprava logických výrazů



Z předchozích příkladů je zřejmé, že každá logická operace je reprezentována jedním blokem v logickém schématu, který reprezentuje příslušnou technologii. Čím více logických bloků, tím více součástek a tím je větší pravděpodobnost poruch daného řídicího systému. Snížení počtu použitých logických bloků se dosáhne úpravou a zjednodušením logické funkce. Zjednodušení se provádí na základě pravidel Booleovské algebry. Pro názornost je uveden následující příklad:

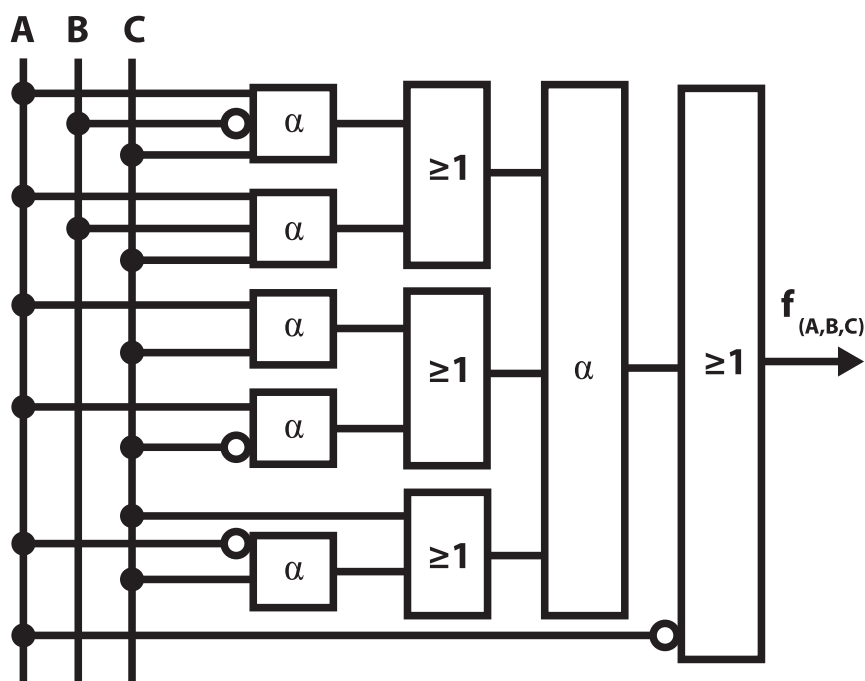


Příklad 3.3

Funkce $f(A, B, C)$ tří logických proměnných je zadána následujícím vztahem:

$$f_{(A,B,C)} = (A \times \bar{B} \times C + A \times B \times C) \times (A \times C + A \times \bar{C}) \times (\bar{C} + C\bar{A}) + \bar{A}$$

K její realizaci je potřeba 14 logických bloků a její logické schéma je nakreslena na následujícím obrázku.

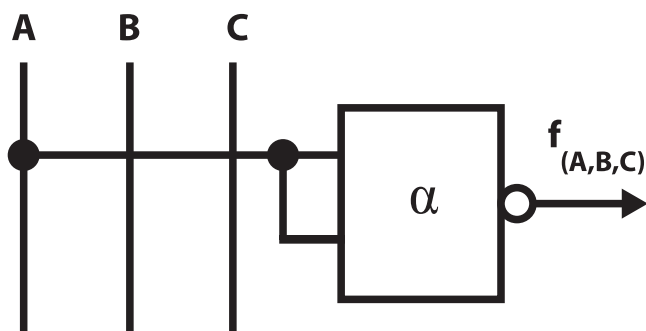


Obr. 3.10: Logické schéma 3.3

Po provedení matematických úprav logické funkce je výsledek následující:

$$\begin{aligned} f_{(A,B,C)} &= A \times C \times (\bar{B} + B) \times A \times (C + \bar{C}) \times (\bar{C} + \bar{A}) + \bar{A} \\ &= A \times C \times (\bar{C} + \bar{A}) + \bar{A} \\ &= \bar{A} \end{aligned}$$

To znamená, že výsledek nezáleží na hodnotách logických proměnných B a C. Výsledek je pouze negace A. Realizace v logickém schématu je na následujícím obrázku:



Obr. 3.11: Negace

Porovnáním obou schémat je zřejmé, že došlo k velké úspoře logických bloků a tím je snížena pravděpodobnost vzniku poruch řídicího systému.

3.4 Matematické programy

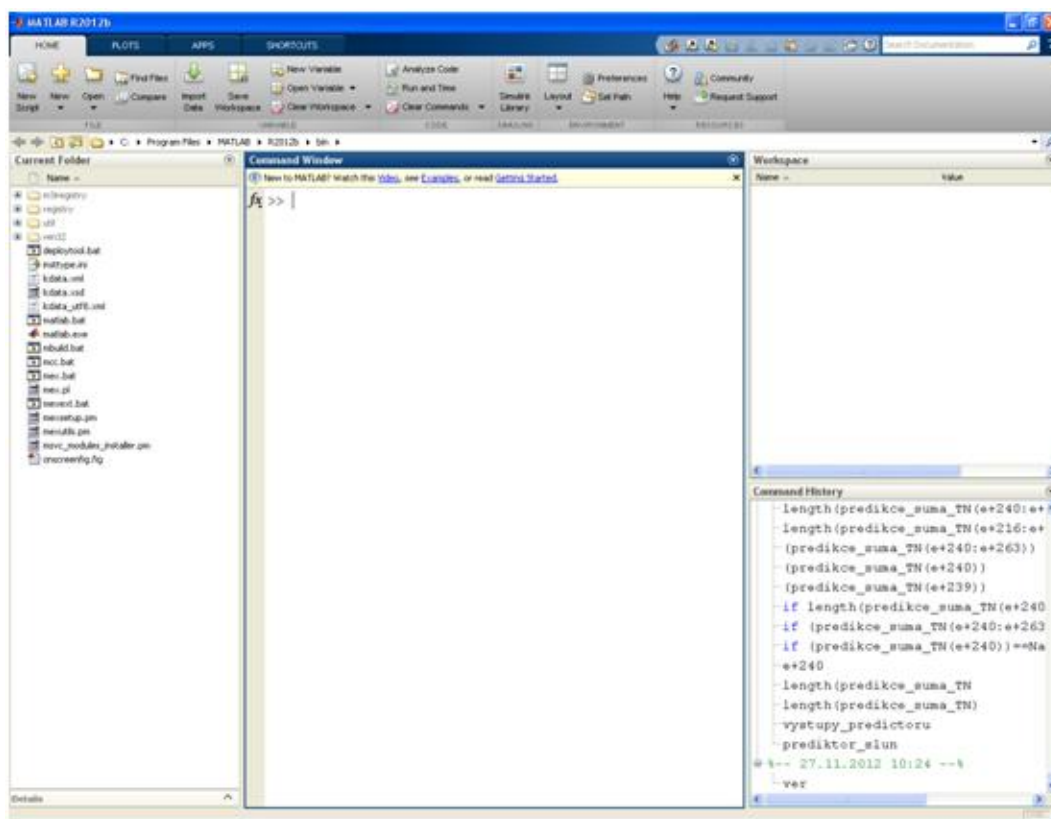
Pro řešení logických obvodů je k dispozici velké množství obecných i specializovaných programů. Jedná se například o Visual Basic, Fortran, C++ a také tabulkové procesory MS Excel a Open Office Calc. Dále existuje řada specializovaných programů pro kreslení elektrických a automatizačních schémat, kterými lze dané obvody rovněž navrhovat a řešit jejich chování. Pro řešení a studium systémů je velmi vhodné programovací prostředí MATLAB®.

3.5 MATLAB

Jedná se o integrované prostředí pro vědeckotechnické výpočty, které obsahuje mocné grafické a výpočetní nástroje. Primárně je určeno pro technické výpočty, analýzu a vizualizaci dat, vývoj a testování algoritmů, sběr a zpracování dat, zpracování signálů a obrazů, programování a tvorbu uživatelských aplikací. Výhodou tohoto prostředí je skutečnost, že obsahuje množství pomůcek, které umožní řešiteli soustředit se na řešený problém, ne na syntaxi jazyka.

Pro tyto účely MATLAB obsahuje nástroje:

- Počítačové nástroje a vývojové prostředí
- Knihovnu matematických funkcí
- Jazyk MATLABu
- Grafiku MATLABu
- Vnější rozhraní



Obr. 3.12: Základní obrazovka Matlabu

Umístění v adresáři a aktuální verze

Standardně je po instalaci program umístěn v adresáři: „c:\Program Files\MATLAB\R2012b*.*“, pro danou verzi. Současná verze je

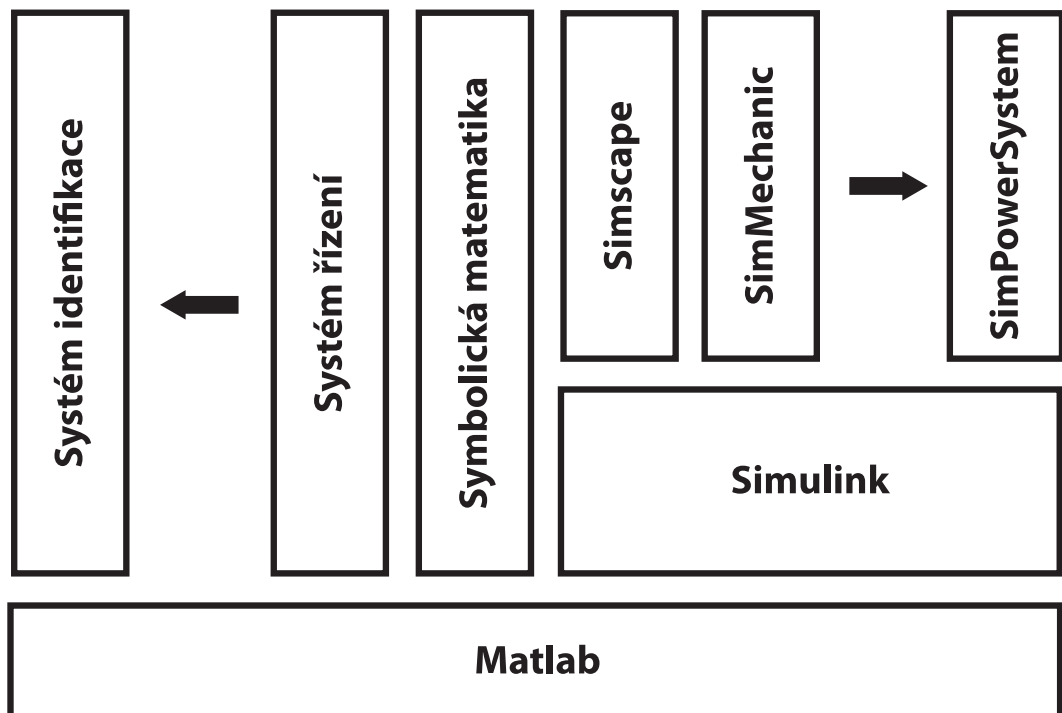
verze č. 8. Složka „R2012b“ je obchodní název instalovaného update. Každý rok jsou distribuovány dva update, jarní, označená písmenem „a“, podzimní, označená písmenem „b“. Instalací nového update nedojde k přepsání starého, ale je vytvořena nová složka:

```
c:\Program Files\MATLAB\R2012a\*. *
c:\Program Files\MATLAB\R2012b\*. *
```

Aktuální verze je zjištěna vypsáním do příkazového řádku příkazu:

```
>> ver
-----
MATLAB Version: 8.0.0.783 (R2012b)
MATLAB License Number: 270637
Operating System: Microsoft Windows XP Version 5.1 (Build 2600: Service Pack 3)
Java Version: Java 1.6.0_17-b04 with Sun Microsystems Inc. Java HotSpot(TM) Client VM mixed mode
-----
MATLAB                               Version 8.0           (R2012b)
Simulink                             Version 8.0           (R2012b)
Control System Toolbox               Version 9.4           (R2012b)
MATLAB Compiler                     Version 4.18          (R2012b)
Stateflow                           Version 8.0           (R2012b)
Symbolic Math Toolbox                Version 5.9           (R2012b)
System Identification Toolbox        Version 8.1           (R2012b)
Symbolic Math Toolbox                Version 5.1           (R2008b)
System Identification Toolbox        Version 7.2.1         (R2008b)
>>
```

Obr. 3.13: Zjištění aktuální verze



Obr. 3.14: Skladba prostředí MATLAB

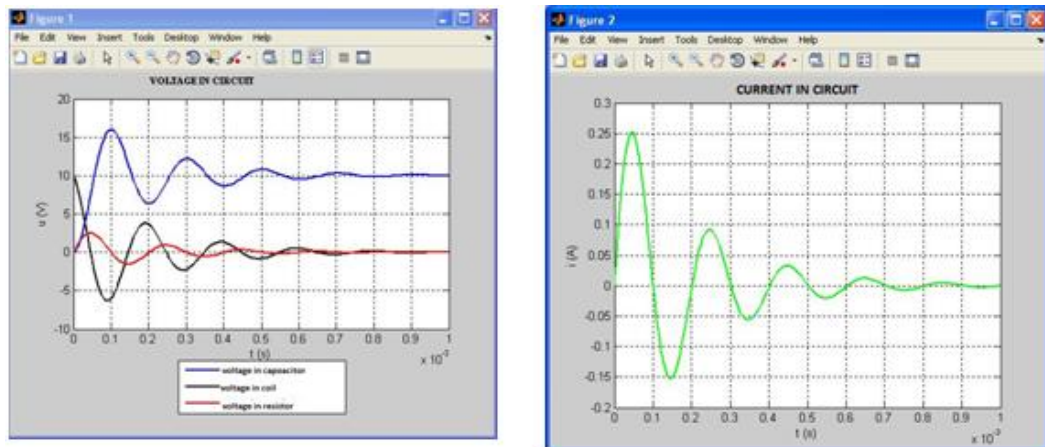
Prostředí MATLABu je modulární a umožňuje rozšíření v různých oblastech výpočtů. Základna MATLABu je rozšiřována knihovnou nástrojů označenou jako „toolbox“. Nejstarší a nejrozšířenější toolbox je „Simulink“, který umožní simulaci dynamických systémů. Rozšiřování Simulinku je provedeno tzv. „blocksety“, knihovnami použitelných bloků.

Dokumentace MATLABu je velmi obsáhlá, a proto se vyskytuje pouze v elektronické formě. Dokumentace obsahuje základní popis a syntaxi dané funkce, příklady, poznámky k novým verzím a tisknutelnou dokumentaci ve formátu „pdf“. Dokumentace je uspořádána podle kategorií i abecedy.



Příklad řešení

Pro příklad řešení a výstupů byla vybrána ukázka řešení napětí a proudů v sériovém RLC obvodu. Výpočet byl proveden numerickou derivací a integrací a výsledky zobrazeny v následujících grafech, obrázku č. 3.15.



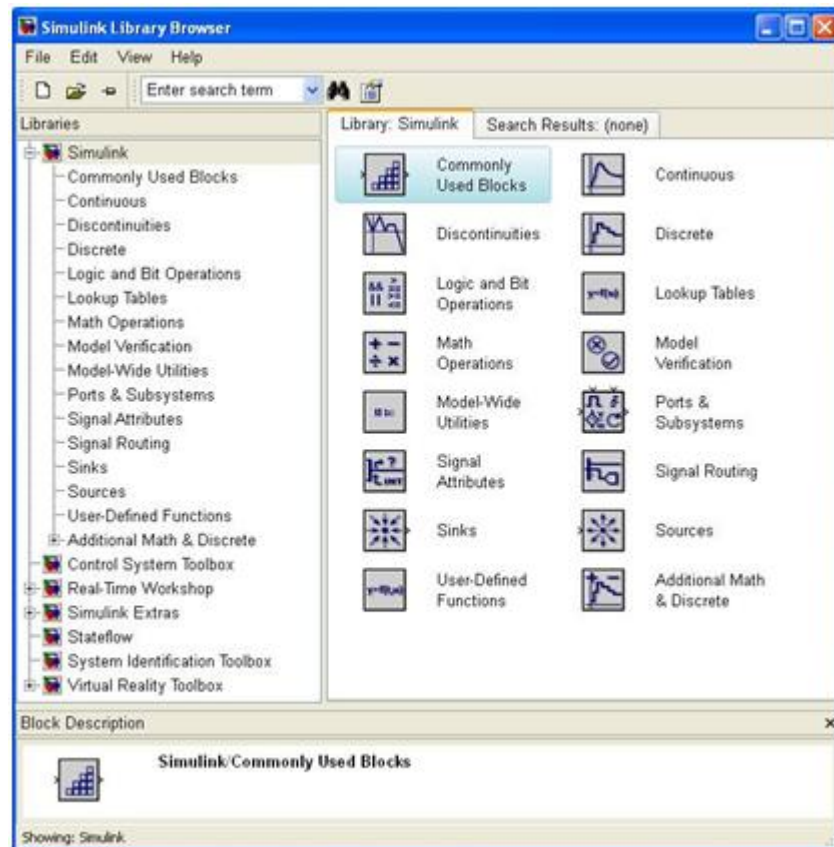
Obr. 3.15: Ukázka výsledků numerického řešení

SIMULINK

Účelem SIMULINKu je provést rozšíření MATLABu o základní nadstavbu, která bude umožňovat výpočty dynamického chování systémů pomocí prostředí blokových schémat. Pro systém, který je popsán diferenciálními nebo diferenčními rovnicemi, je vytvořen matematický model pomocí přednastavených bloků. Tyto bloky jsou uspořádány v knihovnách. Tyto knihovny jsou rozděleny do tzv. blocksetů:

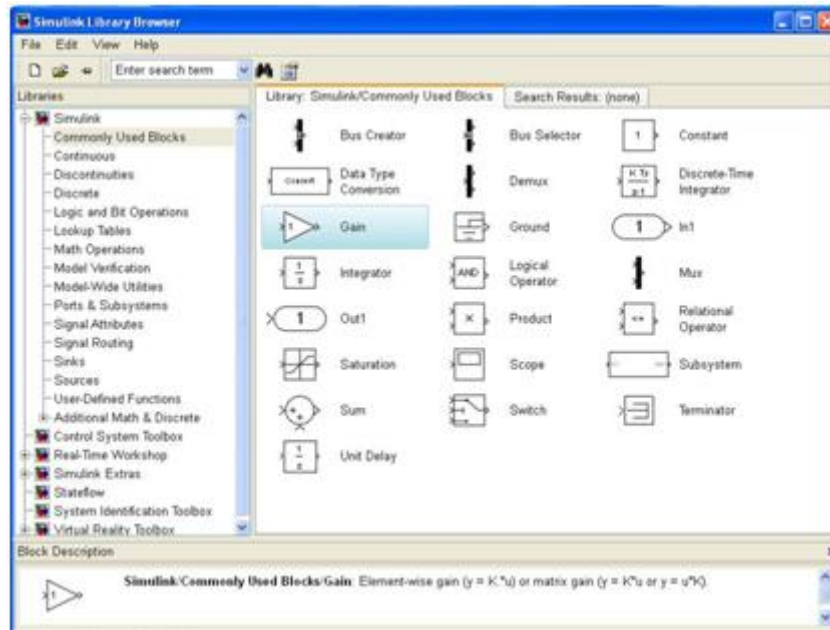
- Simscape (základní knihovna),
- SimDriveline,
- SimHydraulics – blockset pro řešení hydraulických systémů a mechanismů,
- SimMechanics,

- SimPowerSystems – blockset pro řešení elektrických silnoproudých systémů,
- apod.



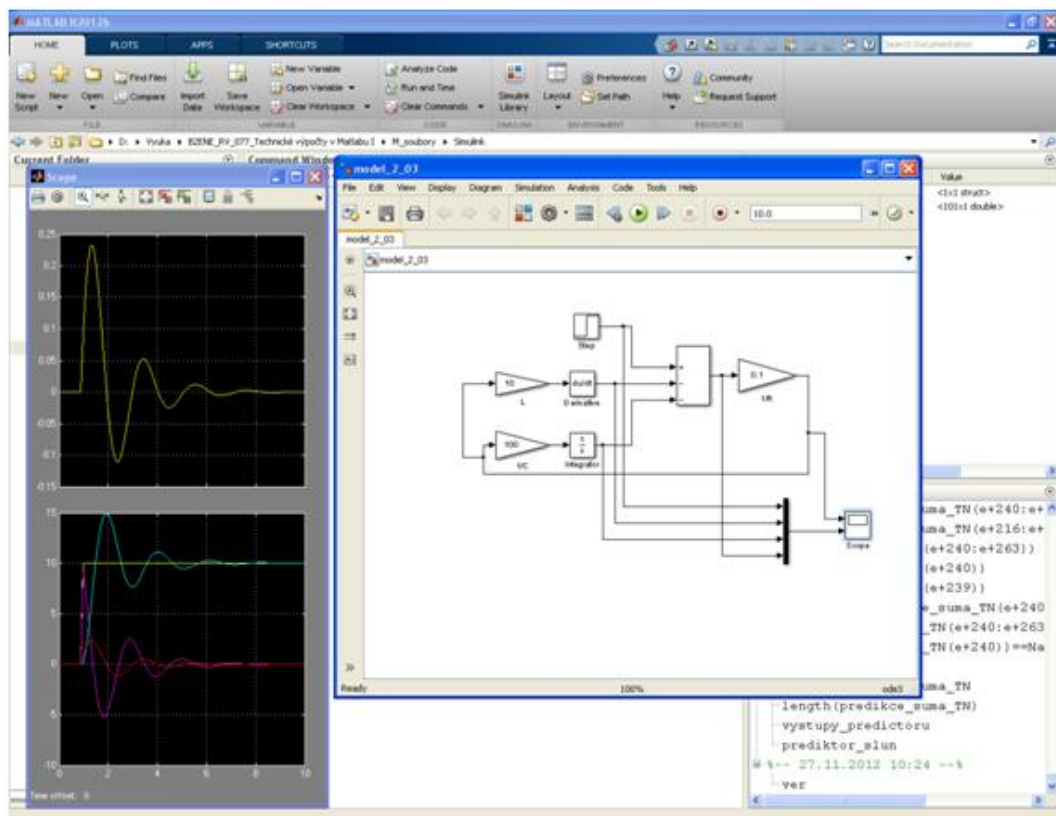
Obr. 3.16: Ukázka knihoven Simulinku

Blockset „Commonly Used Blocks“ nabízí nejčastěji používané bloky.



Obr. 3.17: Ukázka jednoho blocksetu

Pro srovnatelný příklad byla vybrána ukázka řešení dynamického chování RLC obvodu jako v předchozím případě. Daná integro-diferenciální rovnice byla namodelována pomocí předefinovaných bloků, okno v pravé části obrázku a průběh odezvy na jednotkový skok je zobrazen na stínítku osciloskopu, okno v levé části obrázku č. 3.18.



Obr. 3.18: Ukázka řešení chování systému v čase

3.6 Opakovací otázky

1. Nakreslete schematické značky pro logické operace.
2. Popište, jakými způsoby je možné realizovat logické řídicí obvody.
3. Nakreslete realizaci logického součtu pomocí ovládacího schématu.
4. Nakreslete realizaci logického součinu pomocí ovládacího schématu.
5. Nakreslete realizaci negace pomocí ovládacího schématu.
6. Nakreslete realizaci logického součtu pomocí tranzistorů.
7. Nakreslete realizaci logického součinu pomocí tranzistorů.
8. Nakreslete realizaci negace pomocí tranzistorů.
9. Nakreslete realizaci logického součtu pomocí mechanických táhel.
10. Nakreslete realizaci logického součinu pomocí mechanických táhel.
11. Nakreslete realizaci negace pomocí mechanických táhel.

4 Kombinační logické funkce a Booleova algebra, pravdivostní tabulky, Karnaughovy mapy, minimalizace, realizace pevnou logikou a programem

4.1 Logické funkce

Jak již bylo řečeno, teoretickým základem ovládní a řízení strojů nebo celých technologických celků je matematická logika, a proto je tato část zaměřena na zopakování některých oblastí matematické logiky, a to na výrokovou a Booleovu algebru. Použitím zákonů a pravidel je čtenář seznámen se zjednodušováním logických výrazů. Pro nalezení matematického výrazu slovního vyjádření je představen jeden z možných způsobů, pomocí Karnaughovy mapy. V kapitole číslo 3 je také představena realizace matematických formulací technickými prostředky.

4.2 Výroková algebra

Výrok

Pod pojmem výrok je možno si představit prohlášení různých lidí, dále různé pranostiky, definice, prohlášení apod. V matematické logice je tento pojem omezen definicí: „Výrok je každé tvrzení, kterému lze jednoznačně přiřadit pravdivostní hodnotu v každém čase.“ Tím je specifikováno, co je od výroku očekáváno. Výrokem může být i tvrzení, o jehož pravdivosti bude možno rozhodnout až v budoucnosti.

Výrok může nabývat dvou hodnot: pravda, nepravda. Pro označení pravdivých výroků je možné použít symboly: ano; true; 1; +; high; H. Pro nepravdivé výroky je používáno označení: ne; false; 0; -; low; L.



Pro lepší pochopení je uvedeno několik příkladů:

- „Úbytek napětí na odporu je přímo úměrný protékajícímu elektrickému proudu.“ Jedná se o výrok, který je pravdivý, hodnota je pravda.
 - „Indukčnost se rovná součinu proudu a napětí.“ Jedná se o výrok, který je nepravdivý, hodnota je nepravda.
 - „V souhvězdí Orion žijí myslící bytosti.“ Jedná se o výrok a jeho hodnota bude známa někdy v budoucnosti. Výsledkem bude odpověď ano nebo ne.
 - „Jak je venku?“ Nejedná se o výrok. Obecně lze otázky uvozené „jak, kolik“ zařadit do skupiny rčení, která nejsou výroky.
 - „Jdi si umýt ruce!“ Nejedná se o výrok, protože se jedná o rozkazovací větu.
-

Výrokový počet

Výrokovým počtem rozumíme tu část matematické logiky, která vyšetřuje vztahy mezi výroky, jen se zřetelem k jejich pravdivosti a nepravdivosti. Výrokový počet se nezabývá vnitřní strukturou atomárních výroků a zákonitostí, podle nichž se tvoří.

Znaky nebo slovní vyjádření, pomocí nichž se tvoří nové výroky, se nazývají <výrokotvorné> funktoři [logické spojky]. Atomárním výroky výrokového počtu je nazýván výrok bez funktořů.

Nejdůležitějšími funktoři jsou:

Funktor negace – znakem je pruh nad výroky \bar{A} a slovní spojení je: „ne; not; není pravda, že...“.

- Funktor konjunkce – znakem je $A \wedge B$. Slovní spojení logického součinu je: „a; a současně; and“.

- Funktor disjunkce – znakem je $A \vee B$. Slovní spojení logického součtu je: „nebo; or“.
- Funktor implikace – znakem je $A \rightarrow B$. Slovní spojení logické implikace je: „z ... vyplývá, že ...; jestliže ..., pak...!“
- Funktor ekvivalence – znakem je $A \leftrightarrow B$. Slovní spojení logické ekvivalence je: „právě když; tehdy a jen tehdy když...“.

Kombinací atomárních výroků jsou vytvářeny výrokové operace od nejjednodušších po složitě. Jejich význam je v tom, že je možno je jednoduše technicky interpretovat.

Logická funkce

V klasické algebře je známa definice funkce: funkce je zobrazení, kdy jedné nebo více nezávisle proměnným odpovídá jedna nebo více závisle proměnných. Tak je i v matematické logice definován pojem logická funkce. Logická funkce je relace mezi závisle a nezávisle logickými proměnnými. Logické proměnné jsou dvouhodnotové veličiny, které nabývají hodnot 0 nebo 1.

Funkce logických proměnných může být funkcí jedné i více proměnných.

$$y = f(x_1; x_2; x_3; \dots; x_n)$$

Každou logickou funkcí je možno vyjádřit třemi způsoby s rovnocenným výsledkem:

- Kombinací funktorů negace; disjunkce; konjunkce
- Několikanásobným použitím Pierceovy funkce. Pierceova funkce je označována funktorem NOR. Jedná se o negaci disjunkce dvou výroků.
- Několikanásobným použitím Shefferovy funkce. Shefferova funkce je označována funktorem NAND. Jedná se o negaci konjunkce dvou výroků. Její použití je upřednostňováno z toho důvodu, že každou operaci v logické funkci je nutno realizovat jedním technickým prvkem. Vyjádřením logické funkce Shefferovou funkcí je výhodné, protože je použito nejméně technických prvků.

Logické funkce je možné řešit pravdivostní tabulkou. Jedná se o tabulkové vyjádření všech kombinací nezávisle proměnných, které mohou nastat. Počet všech možností, které mohou nastat, se vypočítá podle vzorce:

$$k = 2^n,$$

kde k je počet všech možností a n je počet proměnných.

Způsob řešení je objasněn na následujícím příkladu.



Příklad 4.1

Pomocí pravdivostní tabulky zjistěte hodnoty logické funkce Y, která je funkcí tří logických proměnných a je vyjádřena vzorcem:

$$Y = (A + \bar{B}) \times (B + C) \times (C + \bar{A})$$

Podle vzorce je vypočteno 8 možností pro nezávisle proměnné.

A	B	C	Not A	Not B	A+not B	B+C	C+not A	Y
0	0	0	1	1	1	0	1	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	1	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	1	1	0
1	0	0	0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	1	1	0	0
1	1	1	0	0	1	1	1	1

První tři sloupce jsou pro nezávisle proměnné (atomární výroky), které se doporučuje vyplnit postupně od posledního sloupce (v tomto případě C) střídáním hodnot 0 a 1. Další sloupec (v tomto případě B) střídá hodnoty 0 a 1 na dvojnásobném počtu řádků než poslední sloupec (v tomto případě C). Poslední sloupec (v tomto případě A) potom střídá hodnoty 0 a 1 na dvojnásobném počtu řádků, než-li sloupec předchozí (v tomto případě B). Tímto způsobem je možné postupovat i v případě více proměnných. Další sloupce jsou postupným řešením logické funkce. Poslední sloupec je výsledek logické funkce. Pro hledanou kombinaci nezávisle proměnných je možné na příslušném řádku nalézt výslednou hodnotu logické funkce.

4.3 Booleova algebra

Technickými prvky používanými při řízení a ovládání strojů jsou tlačítka nebo vypínače. Jedná se o dvouhodnotové prvky. Pro matematický popis těchto součástí byla vytvořena dvouhodnotová algebra, která se po svém tvůrci, britském matematikovi Booleovi, nazývá Booleova algebra. Jedná se o výpočty s dvouhodnotovými proměnnými. Pro výpočty v Booleovské algebře jsou definovány zákony a pravidla tak, jako v jiných algebrách. Jedná se o zákony a pravidla:

- Komutativní zákon
- Asociativní zákon
- Distributivní zákon
- Pravidlo o neutrálnosti a agresivnosti 0 a 1
- Pravidlo o independenci (nezávislosti) prvků
- Pravidlo o vyloučeného třetího
- Pravidlo o dvojí negaci
- De Morganova pravidla
- Pravidlo o absorpci a absorpci negace

Zákony

Základní zákony komutativní, asociativní a distributivní, které jsou definovány pro jakoukoliv algebru, tedy i Booleovskou (tabulka č. 2), jsou vyjádřeny ve dvou formách, disjunktí a konjunktí. V klasické algebře se jedná o sčítání a odčítání. V Booleovské algebře se jedná o logický součet a logický součin.

Tabulka 2: Základní zákony

Zákon	disjunkce	konjunkce
Komutativní zákon	$A \vee B = B \vee A$	$A \wedge B = B \wedge A$
Asociativní zákon	$(A \vee B) \vee C = A \vee (B \vee C)$	$(A \wedge B) \wedge C = A \wedge (B \wedge C)$
Distributivní zákon	$(A \vee B) \wedge C = A \wedge C \vee B \wedge C$	$(A \wedge B) \vee C = (A \vee C) \wedge (B \vee C)$

V praxi se pro logické funktoři disjunkce, konjunktce a negace se mohou používat i jiné způsoby označení. Ukázka různé způsoby značení je v tabulce č. 3.

Tabulka 3: Jiný typ označení logických operací

$A \vee B$	$A + B$	$A \cup B$	A or B
$A \wedge B$	$A \times B$	$A \cap B$	$A \alpha B$
\bar{A}	$\neg A$		not A

Pravidla

Booleovská algebra je doplněna ještě řadou pravidel, která jsou používána při zjednodušování logických funkcí. Přehled všech pravidel je v tabulce č. 4.

Tabulka 4: Pravidla Booleovské algebry

Pravidlo	Sčítání	Násobení
Pravidlo o neutrálnosti 0 a 1	$A + 0 = A$	$A \times 1 = A$
Pravidlo o agresivnosti 0 a 1	$A + 1 = 1$	$A \times 0 = 0$
Pravidlo o independenci prvků	$A + A = A$	$A \times A = 0$
Pravidlo o vyloučeného třetího	$A + \bar{A} = 1$	$A \times \bar{A} = 0$
De Morganova pravidla	$\bar{A} + \bar{B} = \overline{A \times B}$	$\bar{A} \times \bar{B} = \overline{A + B}$
Pravidlo o absorpci	$A + A \times B = A$	$A + (A \times B) = A$
Pravidlo o absorpci negace	$A + \bar{A} \times B = A + B$	
Pravidlo o dvojí negaci	$\overline{\bar{A}} = A$	



Příklad 4.2

Zjednodušte funkci tří proměnných:

$$f_{(A,B,C)} = (A \times \bar{B} \times C + A \times B \times C) \times (A \times C + A \times \bar{C}) \times (\bar{C} \times C \bar{A})$$

Nejprve je provedeno vytknutí před závorky a u třetí závorky je provedena aplikace pravidla o absorpci negace.

$$f_{(A,B,C)} = A \times C \times (\bar{B} + B) \times A \times (C + \bar{C}) \times (\bar{C} \times \bar{A})$$

Dále je aplikováno pravidlo o independenci prvků, je provedeno roznásobení závorek a aplikace pravidla vyloučení třetího. Výsledkem je 0.

$$f_{(A,B,C)} = A \times C \times (\bar{C} \times \bar{A}) = 0$$

To znamená, že funkční hodnota je vždy nulová, nezávisle na kombinaci hodnot vstupních proměnných, takovou funkci nazýváme falsum.

4.4 Karnaughova mapa

V předchozí části byl řešen případ, kdy je známé matematické vyjádření logické funkce. Ve skutečnosti mohou nastat a také velmi často je potřeba řešit případy, kdy je znám výsledek logické funkce a je nutno najít matematické vyjádření. K tomu slouží grafická vyjádření tak zvané mapy. Jednou z nejznámějších a nejpoužívanějších je Karnaughova mapa. Je to jiný způsob vyjádření pravdivostní tabulky, který je použit ke zjednodušování logických výrazů. Pro lepší znázornění problému je uveden následující příklad.

Pravdivostní tabulka je vyjádření výsledků logického výrazu pro všechny kombinace nezávisle proměnných. Příklad pravdivostní tabulky pro tři nezávisle proměnné je uveden v řešeném příkladě 4.1. V prvních třech sloupcích jsou vyjádřeny hodnoty nezávisle proměnných. Poslední sloupec (úplně vpravo) zobrazuje hodnoty závisle proměnné.

V případě Karnaughovy mapy je výsledný sloupec zobrazen jako obdélníkové pole. Na každé straně obdélníka jsou vyjádřeny hodnoty nezávisle proměnných. Je jedno, která nezávisle proměnná ke které straně bude přiřazena. Hodnoty nezávisle proměnných je vhodné vyplňovat tak, aby tyto hodnoty u sousedního sloupce/řádku byly změněny o jeden bit. Na takto vyplněné strany je možné pohlížet jako na souřadnice buněk, které tvoří pole pro hodnoty závisle proměnné. Buňky tohoto pole jsou vyplněny hodnotami závisle proměnné podle kombinace hodnot nezávisle proměnných. Pro lepší pochopení je uveden následující řešený příklad s vysvětlivkami.



Příklad 4.3

Je dáno toto zadání pro funkci požární signalizace. V prostoru jsou umístěny tři nezávislé požární senzory. Když alespoň dva senzory zaznamenají oheň, je nutno vyhlásit požární poplach. Vyjádřeno matematicky: Pro logickou funkci Y tří proměnných platí, že hodnota funkce Y nabývá pravdivých hodnot, když alespoň dvě vstupní proměnné nabývají pravdivých hodnot.

Postup řešení:

Nejprve je provedeno znázornění problému v pravdivostní tabulce. Jedná se o funkci tří nezávisle proměnných „ $Y = f(X_1, X_2, X_3)$ “. Počet všech kombinací nezávisle proměnných je vypočten podle vzorce je roven 8. To znamená, že pravdivostní tabulka bude mít mimo hlavičky 8 řádek. V souladu s postupem uvedeným v řešeném příkladu č. 4.1 je provedeno vyplnění hodnot nezávisle proměnných. Sloupec pro závisle proměnnou „ Y “ je vyplňován na základě formulace zadání. V zadání je velmi důležité věnovat pozornost výrazu, zda se jedná o: „alespoň dvě“ (náš příklad) nebo „pouze dvě“. V obou případech je jiný výsledek řešení. Vytvořená pravdivostní tabulka pro zadaný příklad je následující:

X_1	X_2	X_3	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Pole pro hodnoty závisle proměnných „ Y “ může nabývat různé tvary, např. „ 2×4 “ nebo „ 4×2 “. Pro pole s osmi buňkami více možností není. V tomto případě byl vybrán tvar Karnaughovy mapy „ 2×4 “. K vodorovné straně pole byly přiřazeny nezávisle proměnné „ X_1 “ (horní řádek hlavičky) a „ X_2 “ (spodní řádek hlavičky). Ke svislé straně pole byla přiřazena zbývající nezávisle proměnná „ X_3 “. Přiřazení jednotlivých nezávisle proměnných k jednotlivým stranám záleží pouze na vkusu řešitele a neovlivní výsledek řešení. V dalším kroku postupu jsou vyplněny hodnoty nezávisle proměnných tak, že při posunu k sousednímu sloupci/řádce dochází ke změně o jeden bit (Grayův kód). Výsledek je zobrazen na následující tabulce:

		X_2			
		X_1			
X_3	$X_1 X_2$	00	10	11	01
	0				
1					

Buňky pole jsou vyplněny hodnotami závisle proměnné tak, aby odpovídaly příslušné kombinaci hodnotám nezávisle proměnných:

		X_2			
		X_1			
X_3	X_1X_2	00	10	11	01
	0	0	0	1	0
1	0	1	1	1	

X_3

Řešení je provedeno následujícím postupem. V mapě se spojují políčka obsahující hodnotu 1 do bloků (těles) podle následujících pravidel:

- Bloky by měly být co největší, aby při pokrytí všech jedniček bylo bloků co nejméně.
- Počet spojených políček v jednom bloku musí být roven celočíselné mocnině čísla 2. Tedy (1; 2; 4; 8; 16; atd.).
- Jednotlivé bloky se mohou překrývat

		X_2			
		X_1			
X_3	X_1X_2	00	10	11	01
	0	0	0	1	0
1	0	1	1	1	

X_3

Logický výraz jednoho bloku se nazývá term a je tvořen konjunkcí vstupních proměnných, které nemění svou vstupní hodnotu. Minimální logická funkce je vytvořena disjunktí formou těchto termů. Výsledný matematický výraz logické funkce je:

$$Y_{(X_1; X_2; X_3)} = X_1 \times X_2 + X_1 \times X_3 + X_2 \times X_3$$

Karnaughovu mapu je možné také řešit pokrýváním políček s nulami. Výsledná logická funkce je negací disjunkce termů. Výsledek předchozího příkladu by byl následující:

$$Y_{(X_1; X_2; X_3)} = \overline{\overline{X_1 \times X_2} + \overline{X_1 \times X_3} + \overline{X_2 \times X_3}}$$

Forma řešení mapy je volena podle toho, kterých políček je méně.

4.5 Časová posloupnost logických signálů

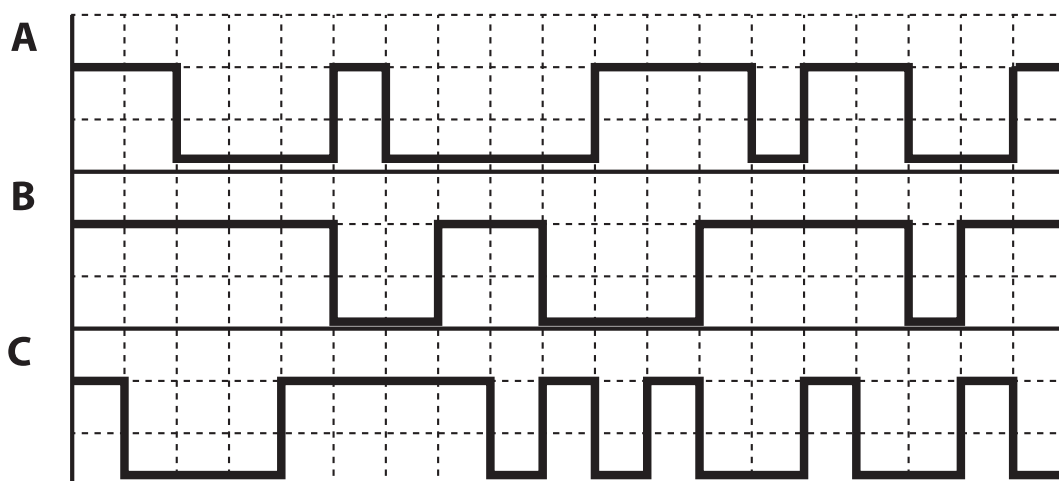
V předchozí části byly logické obvody řešeny jako statické, bylo provedeno řešení bez vlivu času, to znamená, byly vyhledány všechny kombinace. V praktickém životě je nutné počítat s tím, že v závislosti na čase se budou měnit hodnoty nezávisle proměnných. Z toho vyplývá, že se může i hodnota závisle proměnné s časem měnit, jak je ukázáno na příkladu. Zároveň v průběhu času mohou, ale nemusí nastat všechny kombinace nezávisle proměnných.



Příklad 4.4

Pro zadaný výraz najděte časový průběh výstupní logické hodnoty.

$$Y = A \times C + B \times C + A \times B$$

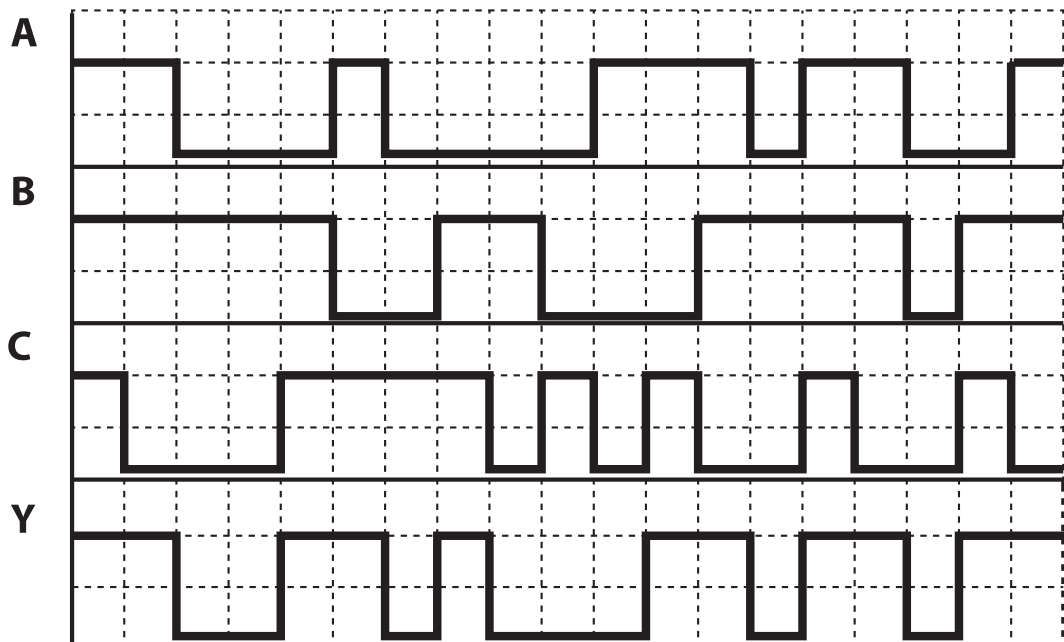


Časový průběh jednotlivých nezávisle proměnných je zobrazen na grafu. Takovýto typ příkladů má dva možné způsoby řešení.

a) Řešení prvním způsobem spočívá ve vytvoření pravdivostní tabulky pro všechny kombinace nezávisle proměnných. Z tabulky je potom pro příslušnou kombinaci nezávisle proměnných v daném intervalu nalezena výsledná hodnota logické funkce.

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

b) Ve druhém způsobu řešení si je potřeba uvědomit, že logická funkce je disjunkce tří konjunkcí. Při řešení se postupuje po jednotlivých konjunkcích. První konjunkce $A \times C$ říká, že výsledek nabývá hodnotu 1, jsou-li současně obě nezávisle proměnné rovny 1. V grafu jsou vyhledány ty časové intervaly, v nichž A i C jsou současně rovny 1 a v těchto intervalech je $Y = 1$. Tento způsob je použit i u dalších konjunkcí. Na závěr zůstanou některé časové intervaly nevyplněné, těm je potom nutno přiřadit hodnotu 0.



Realizace logických funkcí

V oblasti automatizační techniky je řízení strojů nebo jejich souborů podmíněno postupným plněním zadaných podmínek. Každou podmínku je možné vyjádřit jako logickou proměnnou, protože i jí je možno také, jako logické proměnné, přiřadit dvě hodnoty – „splněno“ nebo „nesplněno“. Z toho vyplývá snadná realizovatelnost logických proměnných a tím i logických funkcí. Logiku tohoto problému je nejlépe přiblížit na příkladě.



Příklad 4.5

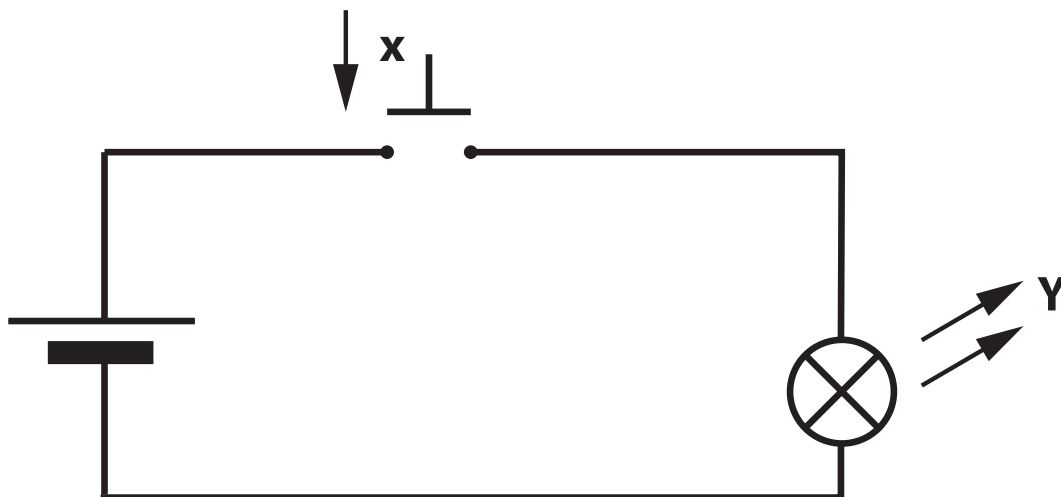
Existuje jedna nezávislá logická proměnná „X“. Tato proměnná může nabývat dvou hodnot 1 a 0. Druhá závislá logická proměnná „Y“ je výsledkem logické funkce:

$$Y = f(X)$$

Všechny možnosti, kterých může nabývat závisle proměnná Y, jsou popsány v tabulce.

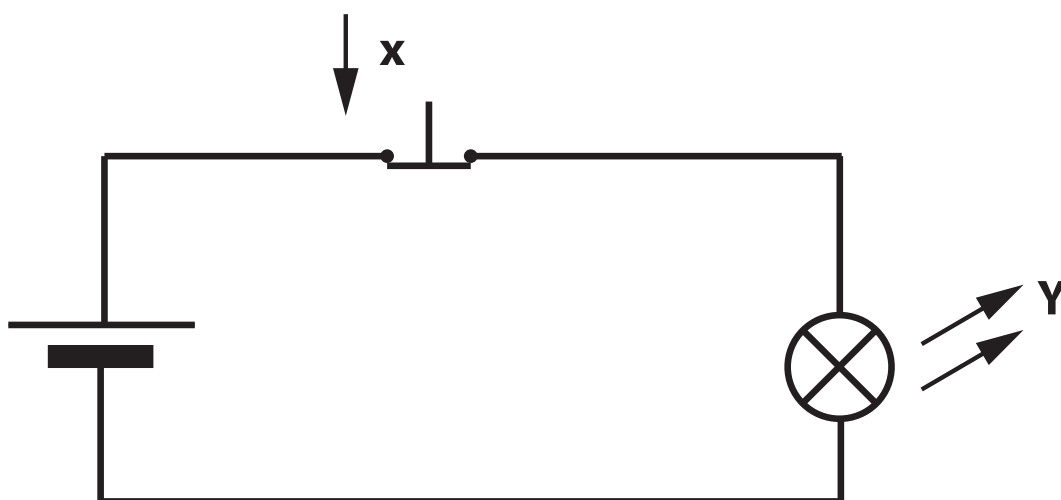
X	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄
1	0	0	1	1
0	0	1	0	1

Je zřejmé, že existují čtyři možnosti, to znamená čtyři logické funkce: falsum, negace, ekvivalence a verum. Jejich praktická realizace bude předvedena na následujícím jednoduchém elektrickém obvodu, složeném ze zdroje elektrického napětí, tlačítka, žárovky a vodičů. Nezávisle proměnná X je mechanická síla působící na tlačítko, závisle proměnná je svit žárovky. Nejprve logická funkce Y₃. Je-li stlačeno tlačítko, žárovka svítí, hodnota Y = 1, právě když X = 1.



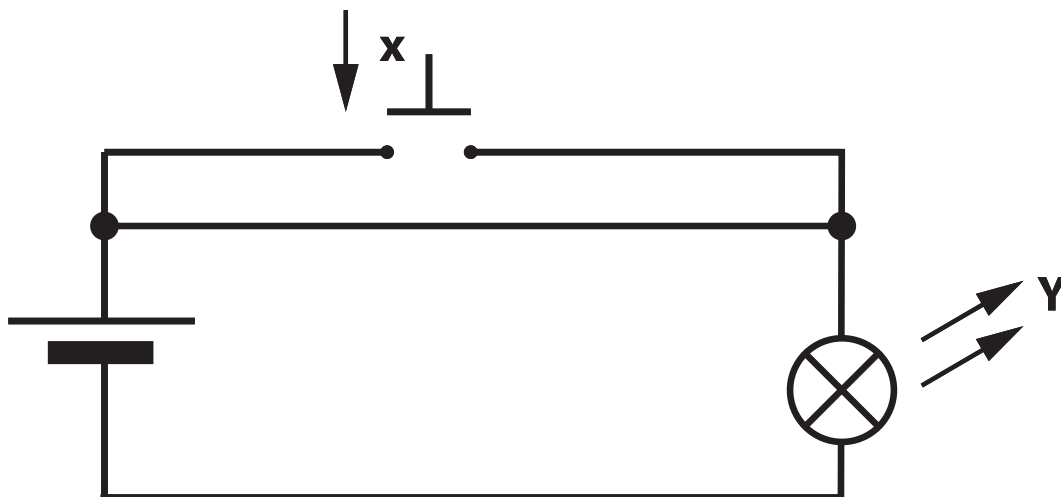
Obr. 4.1: Realizace logické funkce Y_3

Logická funkce Y_2 . Je-li stlačeno tlačítko, žárovka nesvítí, hodnota $Y = 1$, právě když $X = 0$.



Obr. 4.2: Realizace logické funkce Y_2

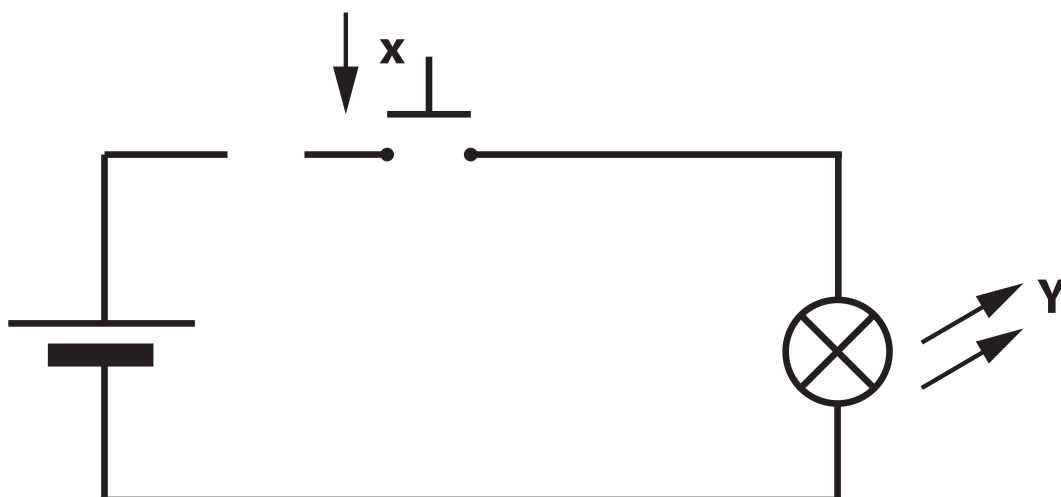
Logická funkce Y_4 . Nezáleží na tom, je-li stlačeno tlačítko nebo ne, žárovka svítí vždy, hodnota $Y = 1$ a není závislá na X .



Obr. 4.3: Realizace logické funkce Y_4

Logická funkce Y_1 . Nezáleží na tom, je-li stlačeno tlačítko nebo ne, žárovka nesvítí, hodnota

$Y = 0$ a není závislá na X .



Obr. 4.4: Realizace logické funkce Y_1

4.6 Opakovací otázky

1. Jaké tvrzení může a nemůže být výrokem a uveďte příklady.
2. Jaké znáte výrokové operace?
3. Ukažte a vysvětlete příklad konjunkce výroků.
4. Ukažte a vysvětlete příklad disjunkce výroků.
5. Ukažte a vysvětlete příklad negace výroků.
6. Vysvětlete pojem logická funkce.
7. Popište logické funkce jedné proměnné.
8. Na čem závisí počet kombinací logické funkce více proměnných?
9. Jaké znáte základní zákony a pravidla Booleovy algebry?
10. Co jsou mapy a k čemu slouží?
11. Co rozumíte pod pojmem časová posloupnost signálů?
12. Jaký je rozdíl mezi diagramem, znázorňujícím časovou posloupnost a pravdivostní tabulkou?

4.7 Příklady k procvičení



Pomocí pravdivostní tabulky ověřte platnost výrazu:

1. $A + B \times B = A$
2. $A + \bar{A} \times B = A + B$
3. $\overline{A \times B} = \bar{A} + \bar{B}$
4. $\overline{A + B} = \bar{A} \times \bar{B}$
5. $A \times (A + B) = A$
6. $A \times B = \overline{\bar{A} + \bar{B}}$
7. $A \text{ xor } B = \overline{A \times B + \bar{A} \times \bar{B}}$
8. $\overline{(A \text{ xor } B)} = A \times B + \bar{A} \times \bar{B}$
9. $A \times \bar{B} + A \times C + B \times \bar{A} = \bar{A} \times B + \bar{B} \times A + B \times C$
10. $(A + \bar{B}) \times (B + \bar{C}) \times (C + \bar{A}) = (\bar{A} + B) \times (\bar{B} + C) \times (\bar{C} + A)$

ŘEŠENÍ

1. L = P
 2. L = P
 3. L = P
 4. L = P
 5. L = P
 6. L = P
 7. L = P
 8. L ≠ P
 9. L = P
 10. L ≠ P
-



Zjednodušte funkci a ověřte pravdivost pomocí pravdivostní tabulky.

$$f_{(A,B,C)} = (A \times \bar{B} \times C + A \times B \times C) \times (A \times C + A \times \bar{C}) \times (\bar{C} + C\bar{A})$$

$$f_{(A,B,C)} = (A \times \bar{B} \times \bar{C} + A \times B \times C) \times (A \times C + A \times \bar{C}) \times (\bar{C} + C\bar{A})$$

$$f_{(A,B)} = A \times (\bar{A} \times B + B)$$

ŘEŠENÍ

$$f_{(A,B,C)} = 0$$

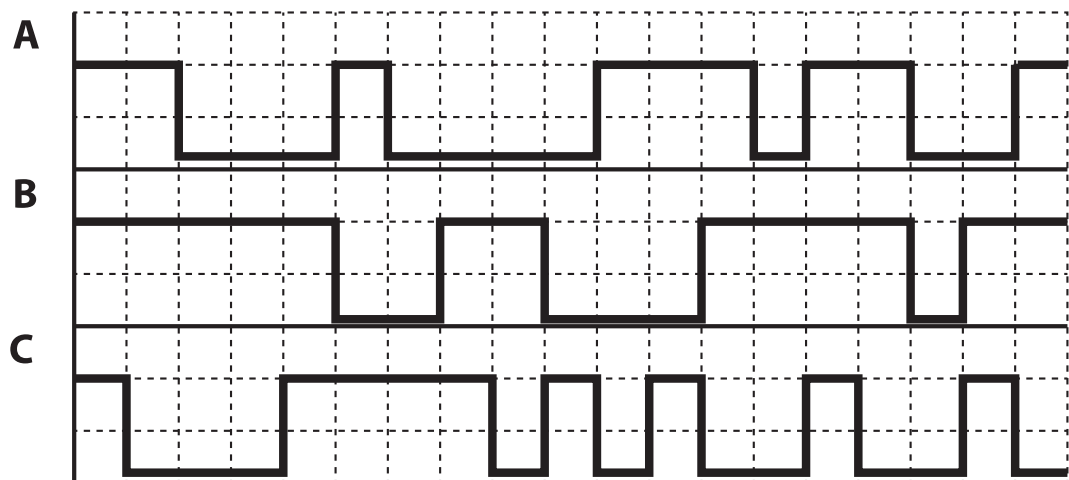
$$f_{(A,B,C)} = A \times \bar{B} \times \bar{C}$$

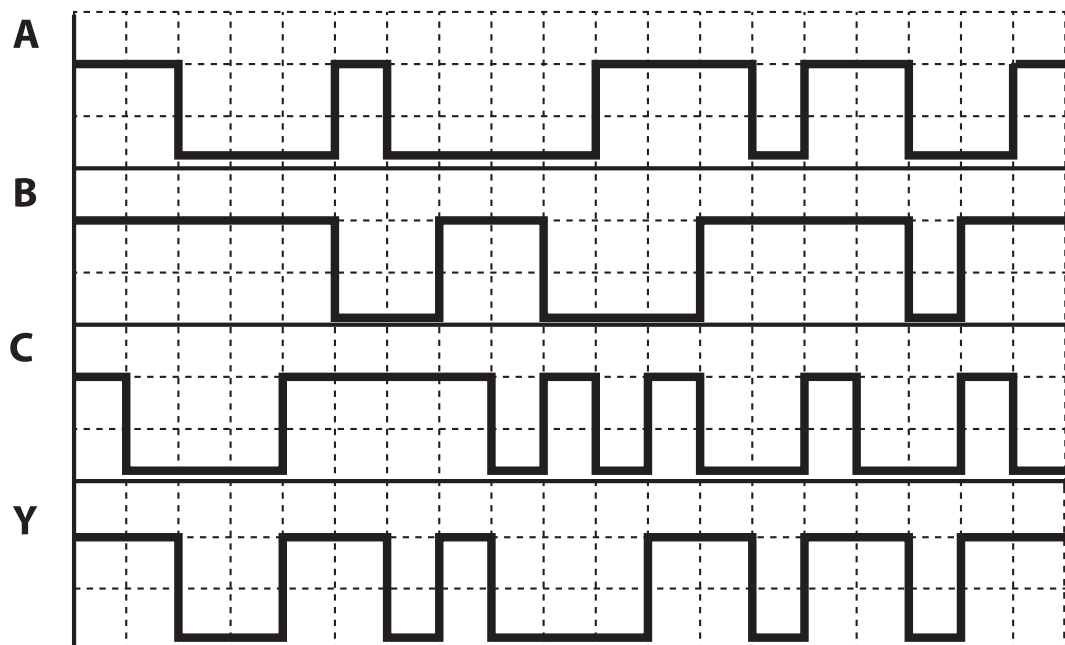
$$f_{(A,B)} = A \times B$$



Najděte časový průběh výstupního signálu pro logickou funkci

$$Y = \bar{A} \times \bar{B} \times C + \bar{A} \times B \times C$$





Příklad 4.6

Napište pravdivostní tabulku pro funkci čtyř proměnných, kdy $Y = 1$, je-li pouze na dvou vstupech hodnota 0, najděte matematický výraz pomocí Karnaughovy mapy.

ŘEŠENÍ

$$Y = C \times D \times \bar{A} \times \bar{B} + C \times \bar{D} \times A \times \bar{B} + C \times \bar{D} \times \bar{A} \times B + \bar{C} \times \bar{D} \times A \times B + \bar{C} \times D \times A \times \bar{B} + \bar{C} \times D \times \bar{A} \times B$$

$$Y = \overline{A \times B \times C + A \times C \times D + B \times C \times D + A \times B \times D + \bar{B} \times \bar{C} \times \bar{D} + \bar{A} \times \bar{B} \times \bar{D} + \bar{A} \times \bar{C} \times \bar{D} + \bar{A} \times \bar{B} \times \bar{C}}$$



Příklad 4.7

Napište pravdivostní tabulku pro funkci tří proměnných, kdy $Y = 1$, je-li současně alespoň na dvou vstupech hodnota 1, najděte matematický výraz pomocí Karnaughovy mapy.

ŘEŠENÍ

$$Y = A \times B + A \times C + B \times C$$

$$Y = \overline{\bar{A} \times \bar{B} + \bar{A} \times \bar{C} + \bar{B} \times \bar{C}}$$



Příklad 4.8

Napište pravdivostní tabulku pro funkci čtyř proměnných, kdy $Y = 1$, je-li současně pouze na třech vstupech hodnota 1, najděte matematický výraz pomocí Karnaughovy mapy.

ŘEŠENÍ

$$Y = A \times B \times \bar{C} \times D + \bar{A} \times B \times C \times D + \\ + A \times \bar{B} \times C \times D + A \times B \times C \times \bar{D}$$

$$Y = \overline{A \times B + C \times D + A \times B \times C + A \times C D} + \\ + \overline{A \times \bar{B} \times \bar{C} + C \times \bar{D} \times \bar{A} + C \times \bar{D} \times \bar{B} + A \times B \times C \times D}$$

4.8 Rozdělení systémů



Řídicí systémy se rozdělují podle své funkce do tří skupin. Jedná se o skupiny:

- logických systémů,
- číslicových systémů,
- hybridních systémů.

Logické systémy

Logické systémy jsou takové systémy, které komunikují se svým okolím pomocí dvouhodnotových prvků (ano, ne nebo 1,0 apod.) Informace tyto systémy zpracovávají podle pravidel Booleovské algebry, a proto jsou také nazývány Booleovské nebo binární systémy. Binární systém může být realizován kontaktním nebo bezkontaktním spínáním.

Číslicové systémy

Číslicové systémy jsou takové systémy, které pracují s aritmetickými operacemi a řídí se algebraickými pravidly. Jedná se zejména o základní algebraické operace sčítání, odčítání, násobení a dělení, není však vyloučeno ani používání složitějších operací nebo funkcí. Číslicový systém je realizován mikroprocesorem.

Hybridní systémy

Kombinací logických a číslicových operací v jednom systému je vytvořen hybridní systém.

Řídicí systémy se také rozdělují podle způsobu zpracování informací do dvou skupin. Jedná se o skupiny:

- kombinačního řízení,
- sekvenčního řízení.

Kombinační řízení

Při kombinačním řízení reaguje řízený systém jako kombinační logický obvod, tzn. že výstupní hodnota záleží pouze na kombinaci vstupních hodnot.

Sekvenčního řízení

Sekvenční řídicí jednotka řídí systém v závislosti na čase nebo na stavu řízeného procesu. Případně je možné obě funkce kombinovat.

4.9 Opakovací otázky

1. Jaké existují druhy systémů?
2. Jaké znáte druhy řízení?

4.10 Kombinační logické funkce

Všechny logické obvody je možno rozdělit podle způsobu řízení do dvou velkých skupin. Logické obvody první skupiny jsou nazývány kombinační logické obvody, s nimi bude čtenář seznámen v této kapitole. Logické obvody druhé skupiny jsou sekvenční logické obvody, které jsou obsahem kapitoly. Zásadním rozdílem mezi oběma skupinami je schopnost paměti stavu obvodu a časového řízení.

Řešení kombinačních logických obvodů

Kombinační logické obvody nemají žádnou paměť a jejich výstup záleží pouze na kombinaci vstupů. Tyto obvody je možno vytvořit pomocí kombinací:

- logických členů AND, OR a invertoru nebo:
- funkce NAND (Shefferovy funkce)
- funkce NOR (Piercovy funkce)

Pro řešení kombinačních logických obvodů je možno použít dvě formy řešení: disjunktční normální formu nebo konjunktční normální formu. Obě formy uvádí všechny logické funkce, které mohou být řešením úlohy. Disjunktční normální forma vyhledává taková řešení, v nichž výstupní proměnná nabývá hodnot 1. Naproti tomu konjunktční normální forma vyhledává řešení, kdy výstupní proměnná nabývá hodnot 0, které je dílčím řešením problému. Závěrečnou negací dílčího řešení je získáno řešení úlohy. Výsledek řešení nezáleží na formě řešení. Z toho důvodu je forma řešení vybírána podle obtížnosti postupu. Laicky řečeno, obsahuje-li Karnaughova mapa více jedniček, je vybrána disjunktční forma, v opačném případě konjunktční forma.



Příklad 4.9

Napište Karnaughovu mapu pro funkci čtyř proměnných, kdy $Y = 1$, je-li pouze na dvou vstupech hodnota 0, najděte matematický výraz.

		AB		B		A
		00	01	11	10	
C	D	CD				
	00	00	0	0	1	0
	01	01	0	1	0	1
	11	11	1	0	0	0
10	10	0	1	0	1	

Disjunktční normálová forma:

$$Y = C \times D \times \bar{A} \times \bar{B} + C \times \bar{D} \times A \times \bar{B} + C \times \bar{D} \times \bar{A} \times B + \bar{C} \times \bar{D} \times A \times B + \bar{C} \times D \times A \times \bar{B} + \bar{C} \times D \times \bar{A} \times B$$

Konjunktční normálová forma řešení:

$$Y = \overline{A \times B \times C + A \times C \times D + B \times C \times D + A \times B \times D + \bar{B} \times \bar{C} \times D + \bar{A} \times \bar{B} \times D + \bar{A} \times \bar{C} \times D + \bar{A} \times \bar{B} \times \bar{C}}$$

4.11 Použití kombinačních logických obvodů

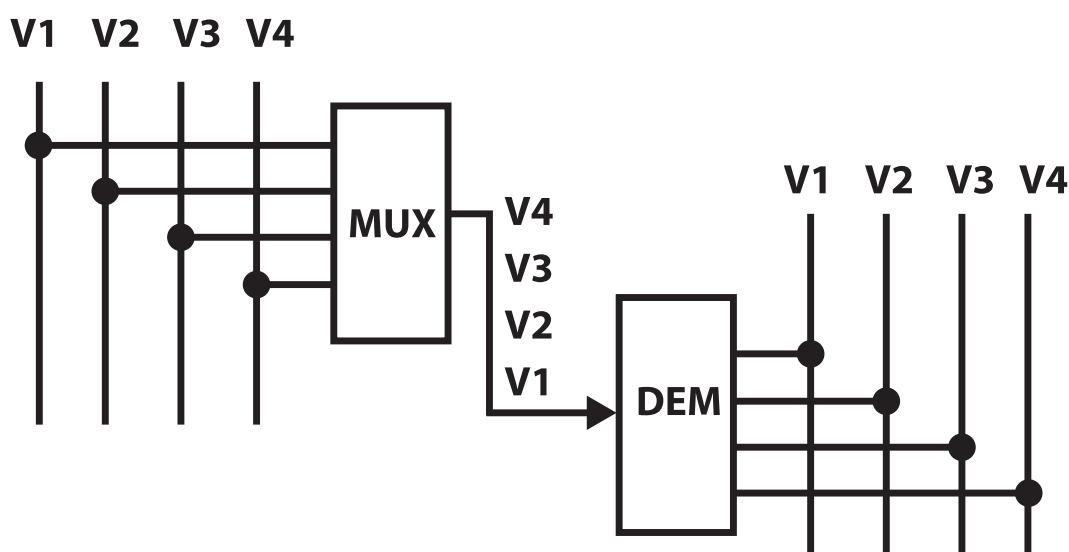
Vzhledem k tomu, že kombinační logické obvody nemají žádnou paměť, záleží výstupní informace pouze na kombinaci vstupních veličin. Popis jejich funkce je výhodné řešit pomocí pravdivostní tabulky. Své uplatnění proto nalézají především jako:

- multiplexery a demultiplexery,
- převodníky kódů,
- bezpečnostní obvody.

4.12 Multiplexery a demultiplexory

Vzhledem k tomu, že přenos informací (zejména na větší vzdálenosti) pomocí paralelní sběrnice vyžaduje větší množství paralelních vodičů, používají se pro přenos informací sériové linky. Například pro 16 bitovou paralelní informaci po převedení na sériovou linku bude stačit 6 informačních kanálů, jeden blokový, 4 adresovací a jeden informační.

Multiplexer (volič instrukcí) je zařízení, které zajišťuje převod informace přenášené paralelně na sběrnici na informaci přenášenou sériovou linkou. Demultiplexer (selektor instrukcí) je naopak zařízení, které sériovou informaci rozdělí do jednotlivých vodičů sběrnice.



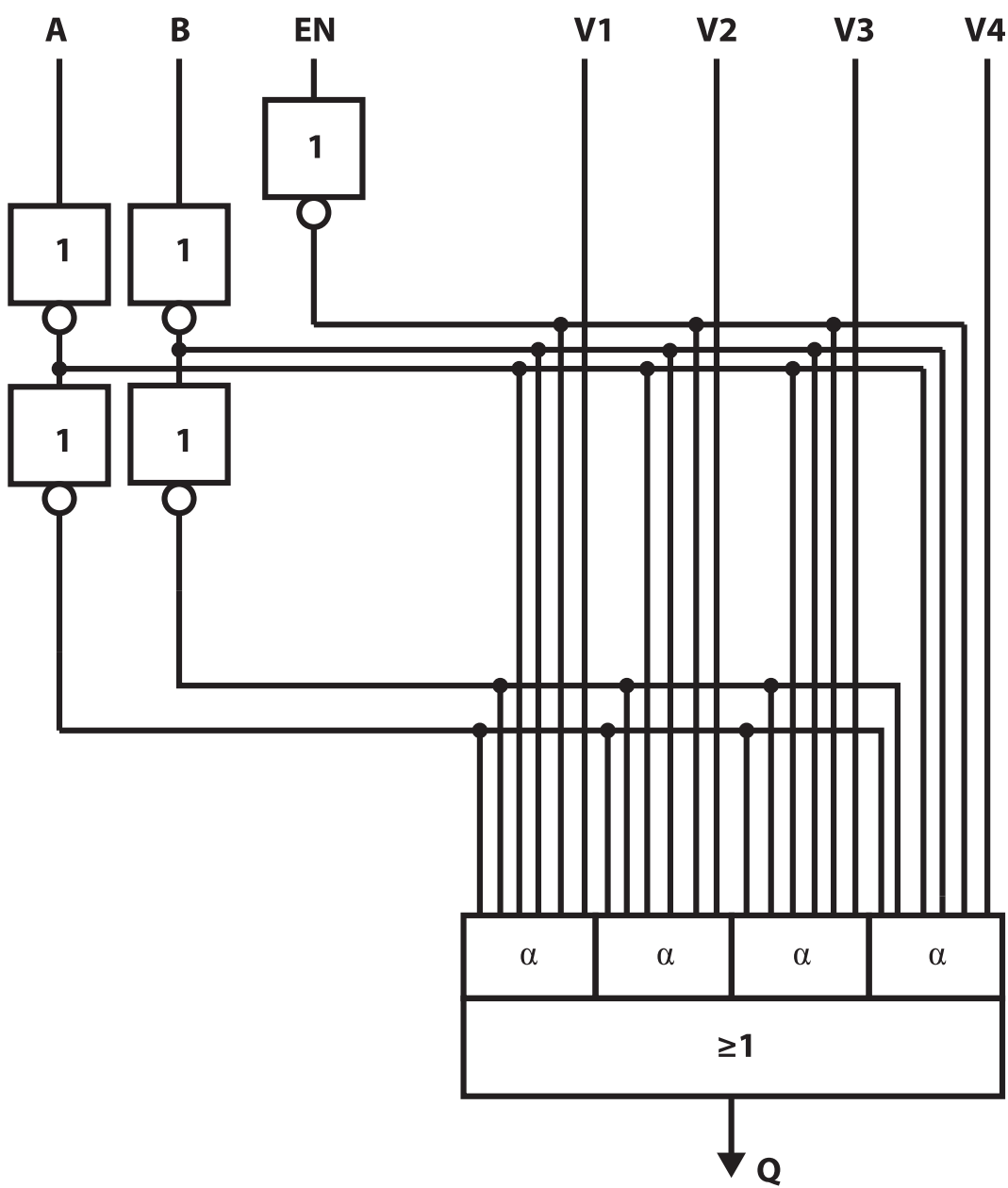
Obr. 4.5: Funkce multiplexeru a demultiplexeru

V levé části obrázku č. 4.5 je znázorněna čtyřbitová sběrnice, po které je přenášena informace. Sběrnice má označeny vodiče V1 až V4. Informace je přenášena paralelní kombinací čtyř bitů. Tato informace vstupuje do multiplexeru (MUX), v němž je převedena na sériovou informaci v pořadí bitů V1 až V4. Takto uspořádaná informace po sériové lince postupuje až k demultiplexeru, který ji opět rozloží do příslušných vodičů sběrnice.

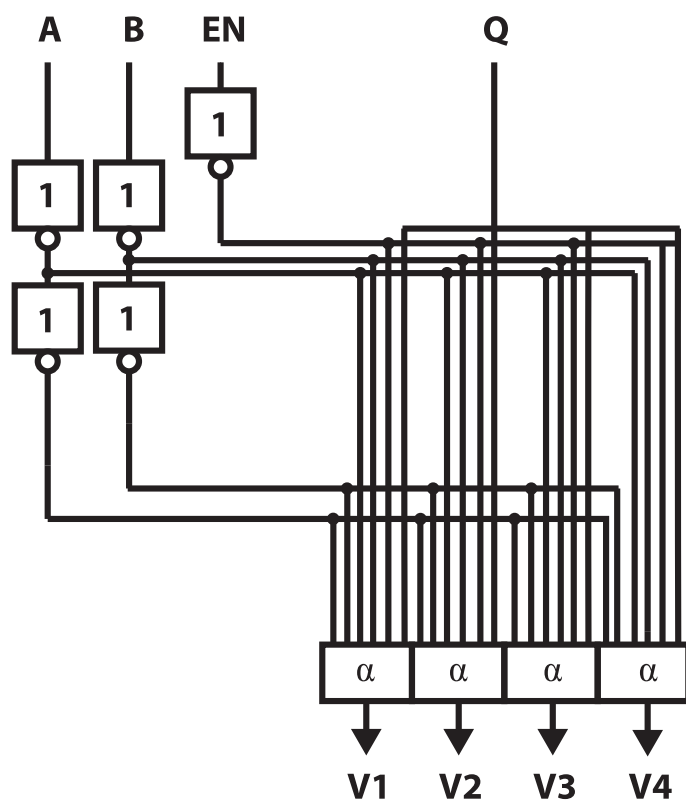
Na obrázku č. 4.6 je zakresleno logické schéma čtyřkanalového multiplexeru. Vstupy V1 až V4 jsou datové vstupy (vstupní informace). Vstupy A a B jsou adresové vstupy a EN je blokový vstup. Funkci multiplexeru popisuje následující pravdivostní tabulka.

Tabulka 5: Pravdivostní tabulka

EN	B	A	Q
0			0
1	0	0	V1
1	0	1	V2
1	1	0	V3
1	1	1	V4



Obr. 4.6: Multiplexer



Obr. 4.7 Demultiplexer

Na obrázku č. 4.7 je zakresleno logické schéma čtyřkanalového demultiplexeru. Vstup Q je rozdělen na výstupy V1 až V4. Vstupy A a B jsou adresové vstupy a EN je blokovací vstup. Funkci demultiplexeru popisuje následující pravdivostní tabulka.

Tabulka 6: Pravdivostní tabulka

EN	B	A	výstup
0			0
1	0	0	V1
1	0	1	V2
1	1	0	V3
1	1	1	V4

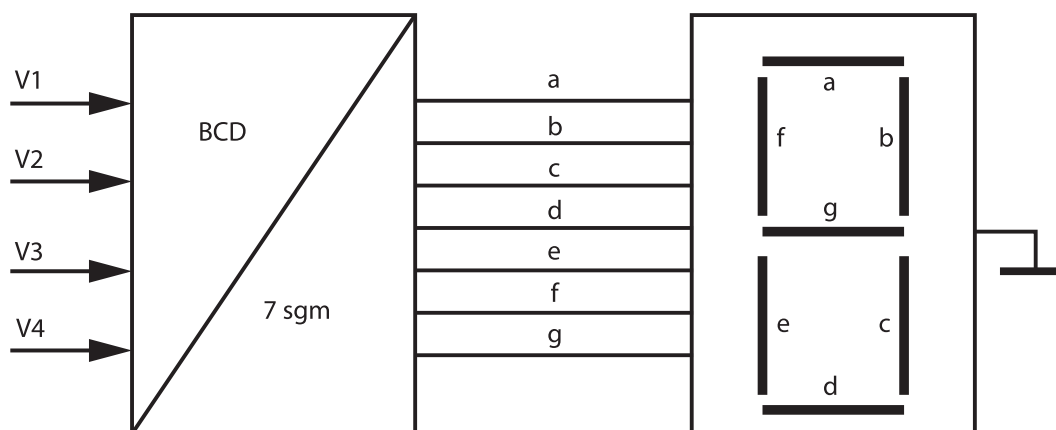
4.13 Převodník kódu

Logické systémy pracují s dvouhodnotovými veličinami (1 a 0, H a L, true a false apod.) existuje řada dvojkových kódů, označovaných jako BCD-kódy (Binary Coded Decimal).



Příklad 4.10

Vyřešte převodník mezi binárním kódem a sedmi segmentovou zobrazovací jednotkou. Náčrtek zadání je na následujícím obrázku. Každý segment je označen písmenem a rozsvícen uzavřením elektrického obvodu, tj. přivedením napětí na příslušný shodně označený vodič. Zobrazovací jednotka vykresluje 10 číslic (0 až 9). To znamená deset kombinací výstupních veličin. Počet výstupních veličin záleží na počtu vstupů podle vztahu (3.1). Pro tři vstupy je 8 výstupů, což je méně, než je požadováno. Pro čtyři vstupy je výstupů 16 a to je více, než je požadavek. Z toho vyplývá, že je nutné mít 4 vstupní veličiny, které jsou označeny V1 až V4.



Pravdivostní tabulka pro zadanou úlohu je následující:

	V4	V3	V2	V1	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
10	1	0	1	0	x	x	x	x	x	x	x
11	1	0	1	1	x	x	x	x	x	x	x
12	1	1	0	0	x	x	x	x	x	x	x
13	1	1	0	1	x	x	x	x	x	x	x
14	1	1	1	0	x	x	x	x	x	x	x
15	1	1	1	1	x	x	x	x	x	x	x

V prvním sloupci je zobrazované číslo. Vstupy V1 až V4 jsou uspořádány jako klasické vstupní veličiny pravdivostní tabulky. V pravé části této tabulky se nalézají výstupní hodnoty pro jednotlivé segmenty. Hodnota 1 znamená, svítí, 0 nesvítí a hodnota x neovlivní řešení, není potřeba. V dalším kroku řešení je nutno sestavit Karnaughovy mapy pro každý segment.

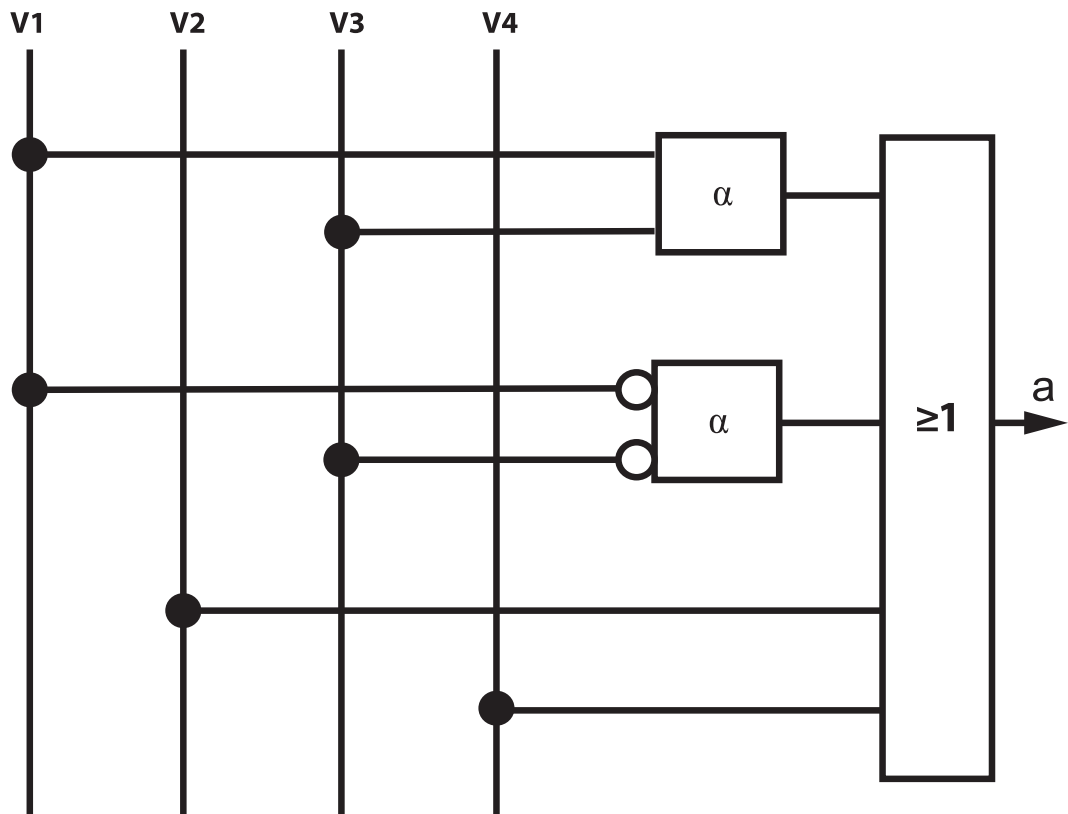
Pro segment „a“ je mapa následující:

		V1 V2		V2			
		00	01	11	10		
V3 V4	00	1	1	1	0		
	01	1	x	x	1		
	11	x	x	x	x		
	10	0	1	1	1		

Výrazy s hodnotou x je možné považovat za výraz s hodnotou 1. Výsledná funkce pro segment a má výraz:

$$Y_a = V2 + V4 + V1 \times V3 + \overline{V1} \times \overline{V3}$$

Pro vypočítaný výraz existuje následující schéma zapojení:



Stejným postupem bude vytvořeno řešení pro segmenty b až g. Tyto bloky jsou připojeny ke sběrnícím V1 až V4.

4.14 Bezpečnostní obvody

Jedná se například o obvody elektronické požární signalizace (EPS) nebo obvody elektronického zabezpečovacího zařízení (EZS). Tyto obvody pracují na logickém principu alespoň dvě logické veličiny o hodnotě 1 ze všech veličin.

5 Sekvenční logické funkce, podstata sekvenčního chování, zpětné vazby, sekvenční a časové logické členy, synchronní a asynchronní realizace

5.1 Sekvenční logické funkce, Sekvenční logické obvody

Na rozdíl od kombinačních logických obvodů závisí u sekvenčního logického obvodu stav výstupů nejen na kombinaci stavů vstupů, ale i na vnitřním stavu obvodu, který obsahuje vnitřní binární paměť. Binární paměť je realizována pomocí bistabilních klopných členů.

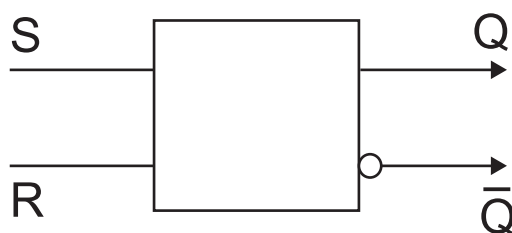
Klopné členy mohou být bistabilní nebo monostabilní. U bistabilního klopného členu jsou v ustáleném stavu možné dva rovnovážné stavy. V každém stavu bistabilní klopný člen setrvává, dokud nedojde ke změně. Pro přiblížení je možné si představit dvoupolohový přepínač.

Opakem je monostabilní klopný člen, který má pouze jeden rovnovážný stav. Po ukončení popudu, který monostabilní klopný člen vychýlí z rovnováhy, se člen vrací do svého původního stavu. Příkladem tohoto členu může být tlačítko.

Další způsob rozdělení klopných členů je na asynchronní a synchronní. V tomto případě je pohlíženo na změnu z pohledu času. U asynchronních klopných členů změna na výstupu závisí pouze na změně vstupů. U synchronních klopných členů nastane změna nejen na změně vstupů, ale i při průchodu synchronizačního (taktovacího) pulzu.

5.2 Binární paměť

Pro potřebu zachování hodnoty signálu slouží binární paměť. Binární paměť je schématicky zakreslena na obrázku č. 5.1. Vstupy jsou označeny písmeny „S“ (podle anglického slova set – nastavit) a „R“ (podle reset – zpětné nastavení). Hodnoty výstupů jsou komplementární (opačné) a nabývají hodnot podle pravdivostní tabulky.



Obr. 5.1: Značka binární paměti

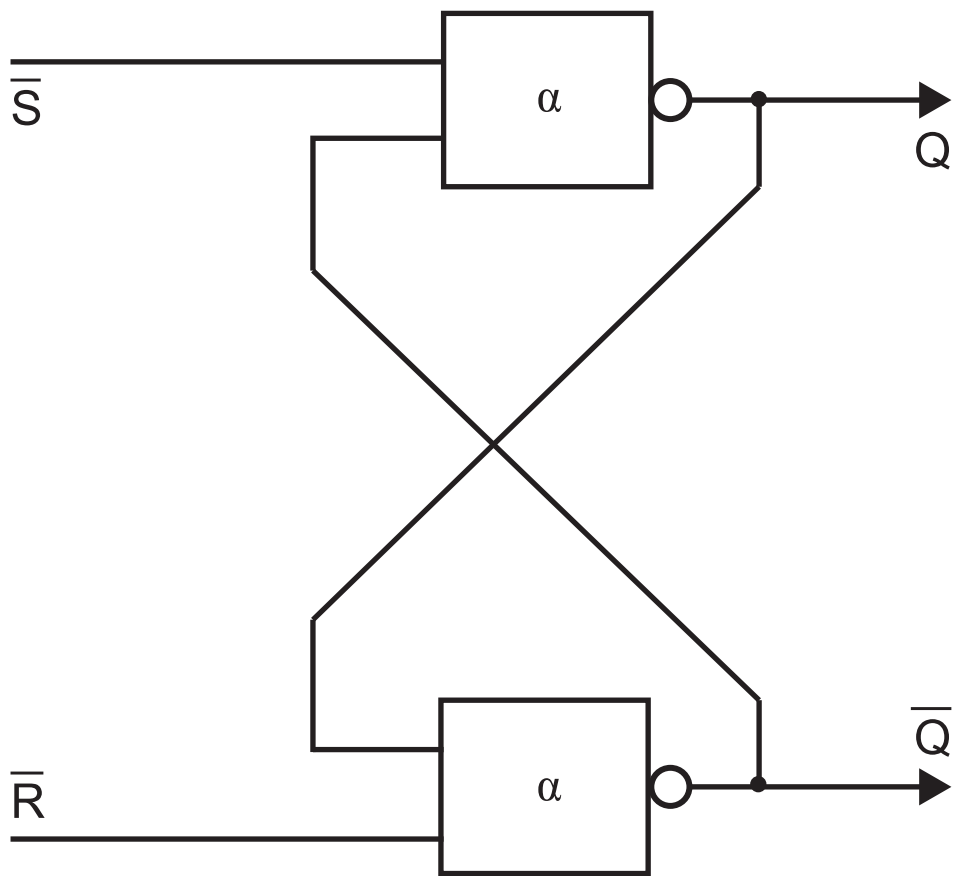
Tabulka 7: Pravdivostní tabulka binární paměti

S	R	Q	\bar{Q}
0	0	¹⁾	¹⁾
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	²⁾	²⁾
0→1	0→1	0 1 or 1 0	

¹⁾ jako předchozí stav

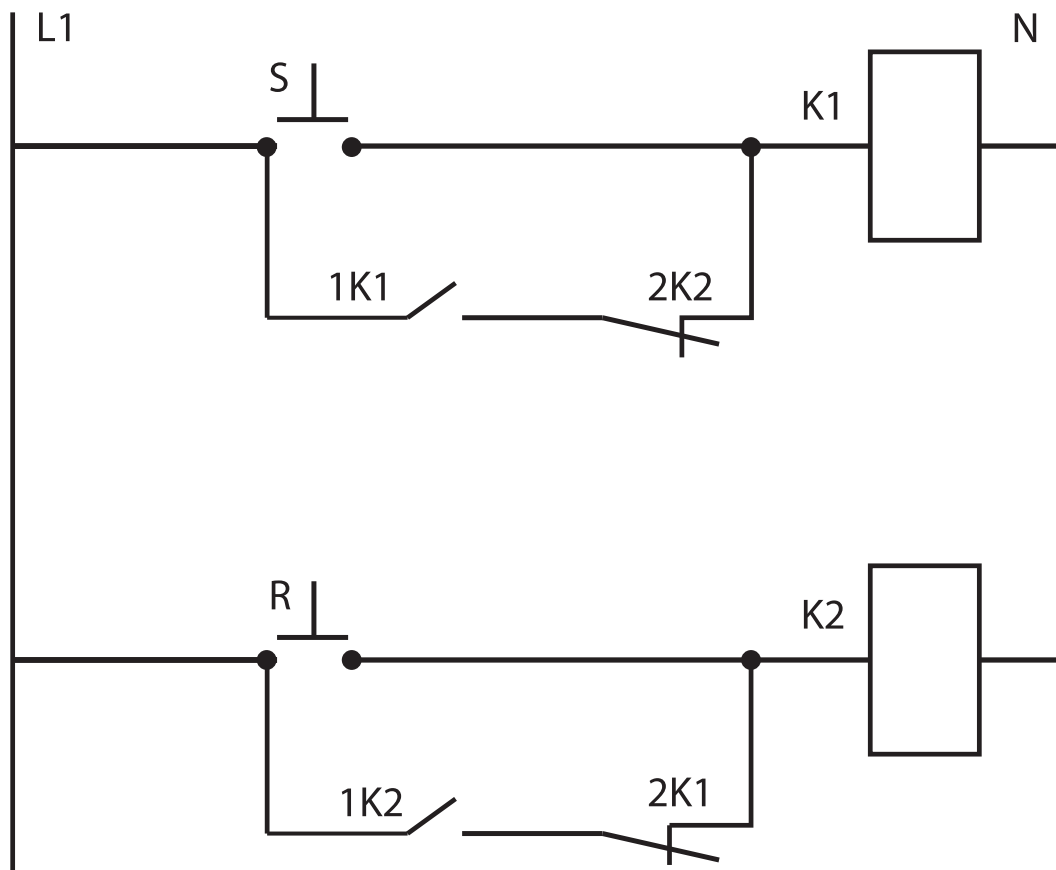
²⁾ zakázaný, neurčitý stav; projeví se tak, že při současné změně obou vstupů z 0 na 1, náhodně jeden z výstupů nabude hodnoty 0 a druhý 1.

Logickou funkci binární paměti je možné realizovat zapojením dvou členů typu „NAND“ (negovaný logický součin). Zapojení je na obrázku č. 5.2.

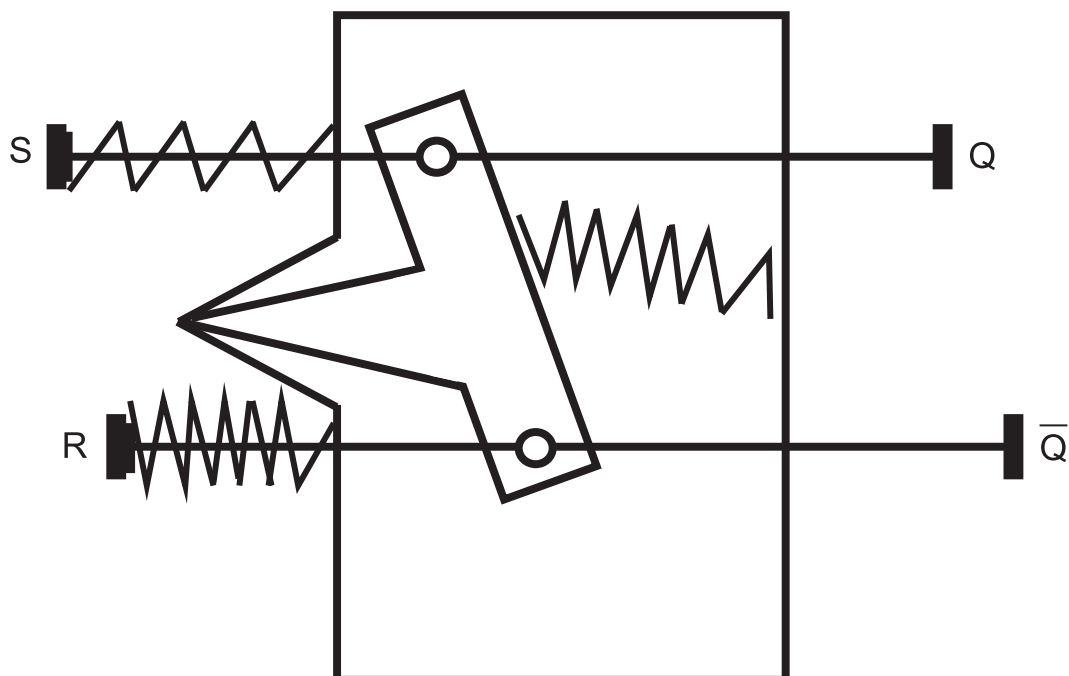


Obr. 5.2: Realizace pomocí členů NAND

Technická realizace binární paměti může být libovolná podle druhu řídicích veličin, mechanická (obrázek č. 5.4), elektrická (obrázek č. 5.3), hydraulická a elektronická.



Pic. 5.3: Elektrická realizace RS obvodu



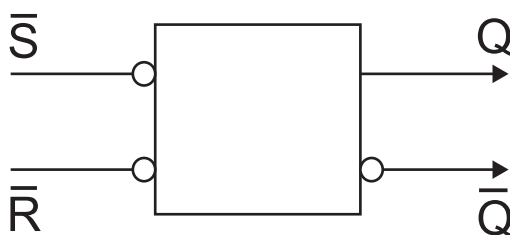
Pic. 5.4: Mechanická realizace RS obvodu

5.3 Synchronní a asynchronní realizace

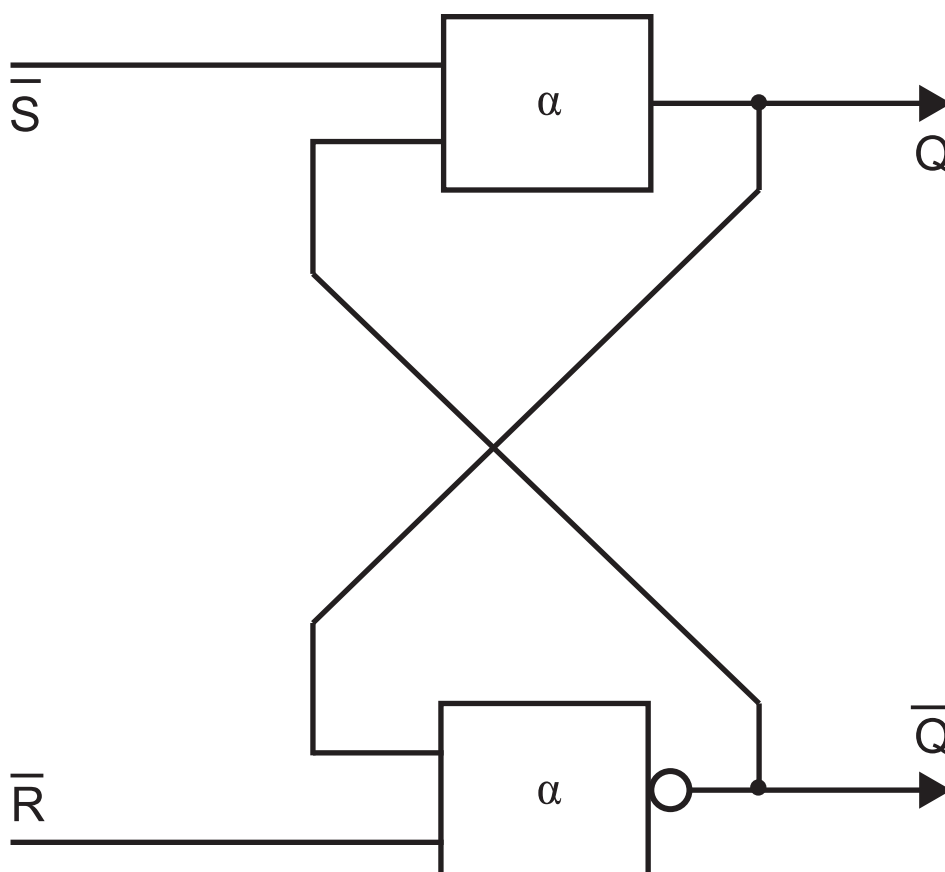
Asynchronní klopný člen

Asynchronní klopný obvod není řízen žádným časovým signálem a jeho stav může být změněn kdykoliv změnou vstupního signálu.

Základní asynchronní klopný obvod je obvod typu „RS“ realizovaný hradly „NAND“ schéma označení je na obrázku č. 5.5. Logické schéma zapojení je na obrázku č. 5.6.

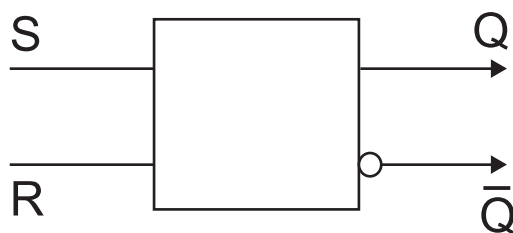


Obr. 5.5: Schématická značka

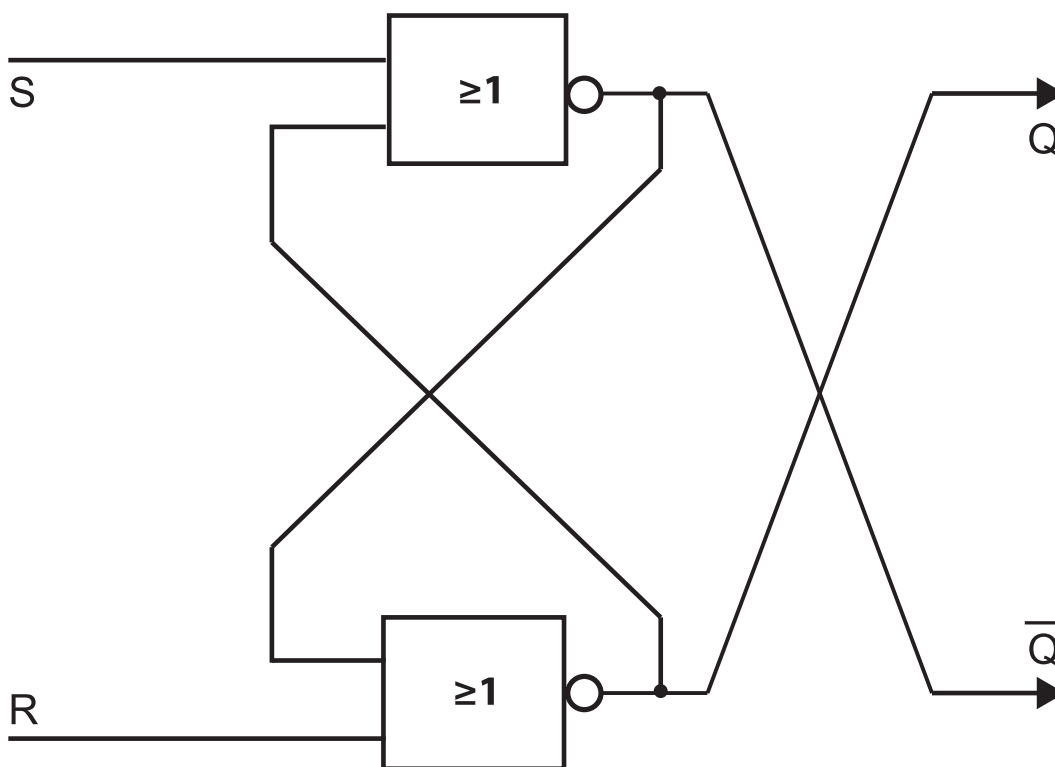


Obr. 5.6: Realizace hradly NAND

Pokud bude obvod typu „RS“ realizovaný hradly „NOR“ schéma označení je na obrázku č. 5.7. Logické schéma zapojení je na obrázku č. 5.8. Tyto obvody mají jeden neurčitý stav.

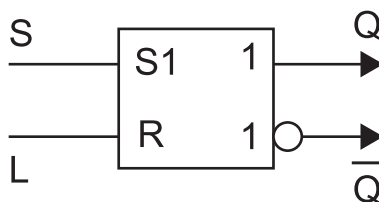


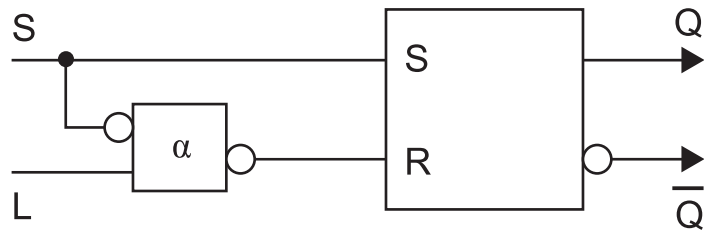
Obr. 5.7: Schématická značka



Obr. 5.8: Realizace hradly NOR

Další klopné obvody jsou obvody typu „SL“ (set, latch – blokování) nebo „EL“ (erase – výmaz, latch). Tyto obvody nemají zakázané ani neurčité stavy. Schématická značka a logické zapojení klopného obvodu typu SL je na obrázku č. 5.9. Schématická značka a logické zapojení klopného obvodu typu SL je na obrázku č. 5.10.

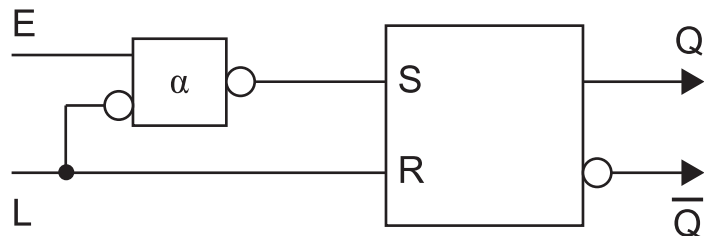
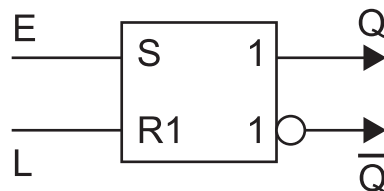




Obr. 5.9: Klopný obvod SL

Tabulka 8: Pravdivostní tabulka klopného obvodu SL

S	L	Q	\bar{Q}
0	0	Předchozí stav	
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	1	0



Obr. 5.10: klopný obvod EL

Tabulka 9: Pravdivostní tabulka klopného obvodu EL

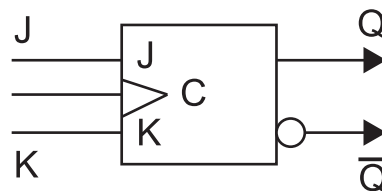
E	L	Q	\bar{Q}
0	0	Předchozí stav	
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1

Synchronní klopný člen

V běžném životě je možno se setkat se dvěma druhy sekvenčního řízení. Například ochrana člověka při vstupu do pracovního prostoru robota a zajištění bezpečného vstupu chodce do vozovky na světlem řízeném přechodu. V prvním

případě dochází k okamžitému zastavení pohybu robota. Ve druhém případě po stisknutí tlačítka dojde nejdříve k vyklizení vozovky a potom k signalizaci bezpečného přechodu pro chodce. V prvním případě je nutné použít asynchronní klopný člen, to znamená okamžitou reakci na změnu podmínek. Ve druhém případě bude použit synchronní klopný člen. Jedná se o člen, který je aktivován kromě změny vstupních hodnot ještě časovým vstupem. Pro časový vstup je použito pravoúhlého pulzu. Pro změnu výstupu je potom možné použít vzestupnou nebo sestupnou hranu tohoto pulzu.

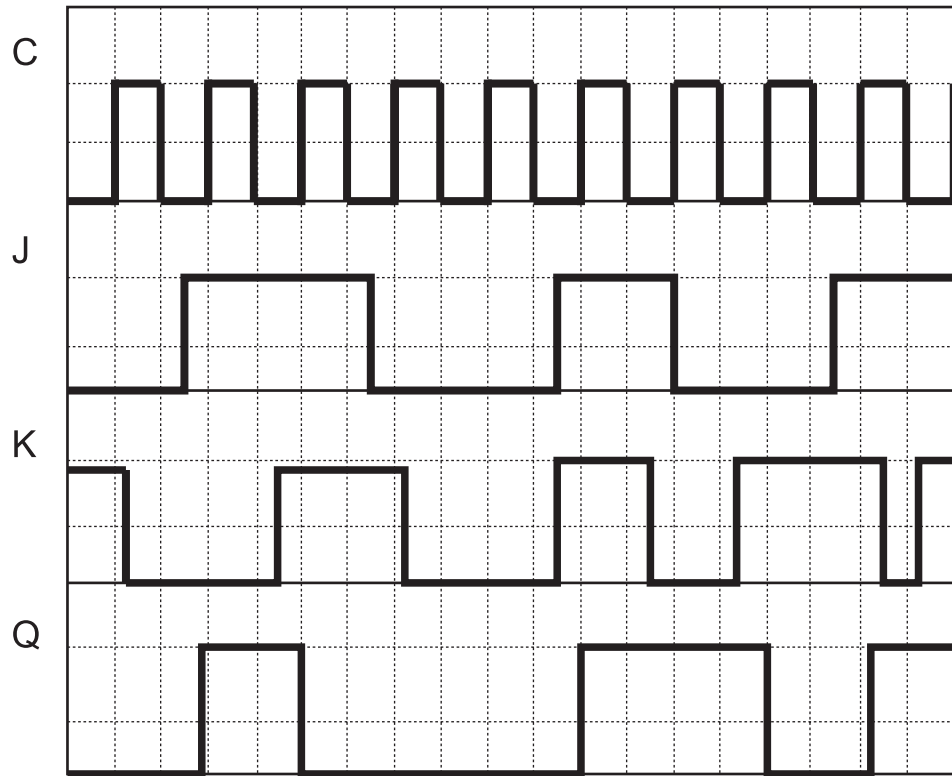
Vstupy do synchronního klopného obvodu jsou tři a jsou označeny „J“, „K“ a „C“ (clock – vstup pro hodinový pulz). Výstupy jsou zase komplanární (vzájemně opačné) označené „Q“ a „ \bar{Q} “. Schématická značka i příslušná pravdivostní tabulka pro řízení vzestupnou hranou hodinového vstupu je v tabulce 10. Časový průběh výstupního signálu v závislosti na změně vstupů je na obrázku č. 5.12. Na obrázku č. 5.13. je zakresleno logické schéma synchronního klopného členu řízeného vzestupnou hranou.



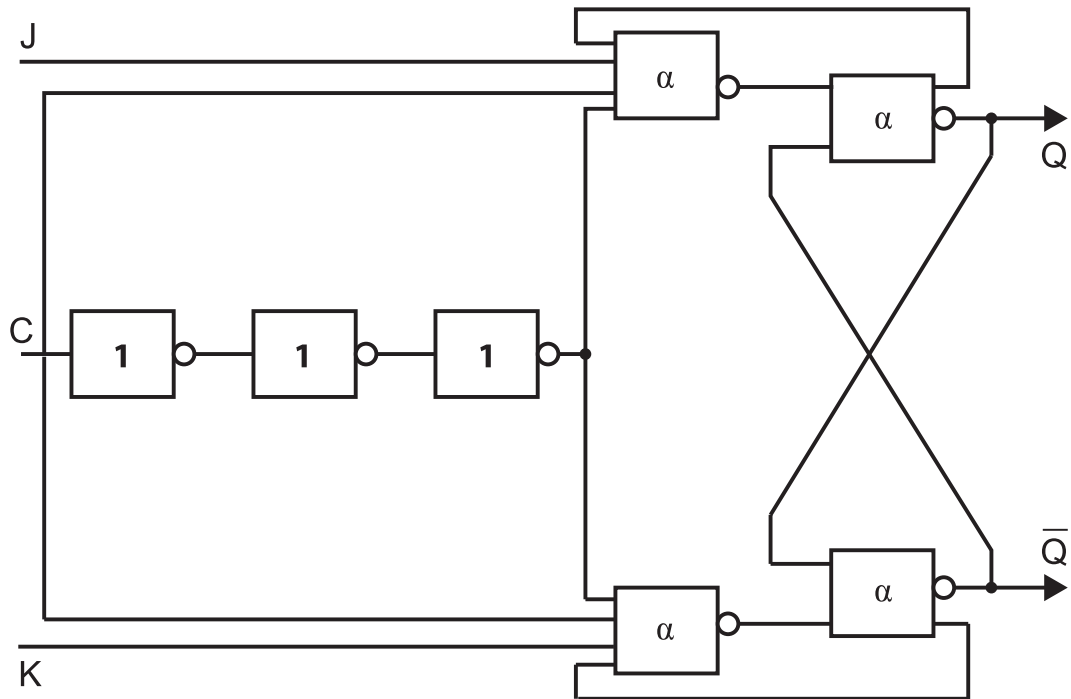
Obr. 5.11: Klopný obvod JK

Tabulka 10: Pravdivostní tabulka klopného obvodu JK

C	J	K	Q	\bar{Q}
	0	0	Předchozí stav	
	0	1	0	1
	1	0	1	0
	1	1	Negace předch.	



Obr. 5.12: Časový průběh výstupního signálu



Obr. 5.13: Logické schéma JK obvodu

5.4 Opakovací otázky

1. Popište funkci a použití sekvenčních logických obvodů.
2. Vysvětlete pojem binární paměť.
3. Vysvětlete funkci asynchronního klopného obvodu.
4. Vysvětlete funkci synchronního klopného obvodu.
5. Popište příklad použití synchronního klopného obvodu.

6 Minimum o fuzzy logice a neuronových sítí

6.1 Úvod

Fuzzy logika je jedním z oborů umělé inteligence. Jejím posláním je postihnout přirozenou neurčitost jevů kolem nás a neurčitost lidského myšlení a vyjadřování. Tak je možné popsané jevy zpřístupnit pro realizaci obvyklými technickými a umožnit jejich využití v praxi v různých oborech – technických i netechnických, od regulace, technické diagnostiky, až po geologii, lingvistiku, biologii, společenské vědy apod.



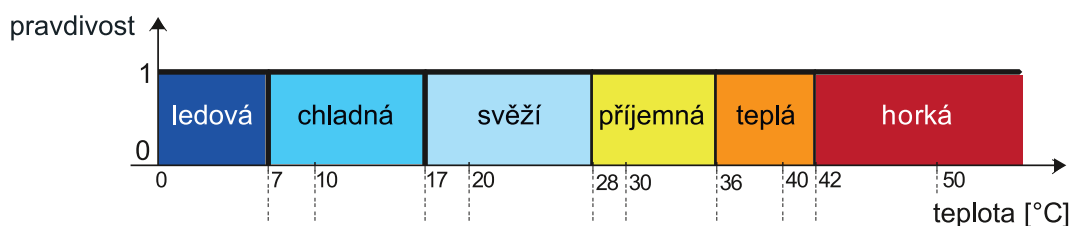
Neříkáme „ano, ano, ne, ne“

„Tvá řeč budiž ano, ano – ne, ne!“, takový by měl být podle Rodyarda Kiplinga styl vyjadřování správného muže. Takto jednoznačnou mluvu obvykle očekáváme od státníků a politiků, u nás se s ní ale setkáváme jen zřídka. Logické myšlení umožnilo nebývalý rozmach vědy a techniky od středověku až po současnost. Na základě dvouhodnotové logiky fungují veškeré počítače, řídicí a komunikační systémy a ostatní číslicová zařízení.

Situace je ale složitější. Ve svých představách o racionálním myšlení sice máme zařixováno, že na jasné otázky bychom měli dávat jasné odpovědi – buď ano, anebo ne. Zkusme například analyzovat, co vlastně říkáme výrokem nic není nemožné. Až příliš často používáme „zamlžující“ a „rozostřující“ slůvka asi, nejsem si jistý, možná, přibližně, zřejmě, pravděpodobně, domnívám se, předpokládám, podle mého názoru, víceméně, téměř, spíše ne, v zásadě ano, tak na 70% ano, někdy i kuriosní přibližně přesně. Někdy se jedná o pohodlnost v myšlení a nedostatečnou kulturu vyjadřování. Může jít i o záměrnou snahu „zamlžovat“ skutečnost, neřící celou pravdu a komplikovat její pochopení – nápadné je to v řeči právníků, diplomatů, politiků a jejich tiskových mluvčích.

Nesprávné subjektivní hodnocení

Při svém vidění, interpretaci viděného a následném hodnocení, nevědomky používáme své „filtry a šablony“, které jsou individuální a závislé na dosavadních zkušenostech a postojích. Také proto něco neobvyklého často hodnotíme komentářem typu „já snad špatně vidím“ nebo „to se mi snad jen zdá“ – mnohdy si ale bez vědomého komentáře viděnou skutečnost jen chybně zařadíme nebo vysvětlíme po svém. Jestliže naše znalosti a názory jsou zatíženy nejistotou, je přirozené a korektní je sdělovat i s „oznámkováním“ této neurčitosti.



Obr. 6.1: Ostré rozlišení teplotních pásem při posuzování vhodnosti vody ke koupání.

Další problém se vyskytuje při pokusu o vyhodnocení přesných a jednoznačných údajů. Obrázek znázorňuje pokus o rozlišení údaje o teplotě vody ze subjektivního pohledu zájemce o koupání. Jako hranice mezi pásmy s hodnocením příjemná a teplá je zde uvedeno 36 °C. Zdánlivě je tento ostrý způsob rozlišení přirozený. Diskutovat by se dalo snad jen o hodnotách teploty pro hranice jednotlivých pásem, protože každý hodnotíme teplotu a její „příjemnost“ jinak.

Fuzzy logika – obor matematiky

Proto byl vytvořen aparát fuzzy množin a fuzzy logiky. Jejím autorem je Lotfi Zadeh, který svůj první článek o ni uveřejnil v padesátých letech dvacátého století. Vzbudila živý zájem a rychle se rozvíjela, prohlubovala se a „košatila“ do velké tematické šíře, zejména ve svých aplikačních oborech. Jsou o ní napsány rozsáhlé monografie a učebnice. Obvyklý výklad je příliš komplikovaný na to, aby se fuzzy logika stala rutinní výbavou programátorů PLC, kteří by ji mohli ve své praxi používat a využívat její výhody.



Logika je vědní obor, zabývající se mechanismy lidského myšlení a usuzování. Její kořeny sahají až k filozofům antického Řecka. Logika se stala základem matematiky a matematického myšlení v jiných technických oborech, matematická logika se stala svébytným (a poměrně náročným) oborem matematiky. Součástí matematické logiky je i Booleova algebra. Ta našla své uplatnění i v technické praxi.

Tradiční logika je dvouhodnotová a pracuje s výroky (logickými proměnnými), které mají dvě hodnoty: pravda – nepravda, logická 1 – 0. Spojováním elementárních logických výroků logickými spojkami (např. a, nebo, buď – anebo, ani – ani, není pravda, že) vznikají složené výroky (logické funkce). Podle určitých pravidel matematické logiky lze z pravdivosti či nepravdivosti (pravdivostní hodnoty) dílčích výroků rozhodnout o pravdivosti výroku složeného.

6.2 Východiska fuzzy logiky

Číselné množiny

Ne vždy se musí jednat o „čítankové“ případy množin, např. o množinu jablek a hrušek. V technických aplikacích se často setkáváme s množinami, které mají význam intervalů na číselné ose. V uvedených příkladech lze např. rozlišit několik množin (intervalů) pro vyhodnocení teploty vody, teploty ložiska nebo intenzity jeho vibrací. Pokud hodnota vstupní jazykové proměnné, (např. teploty) patří do některé z množin (např. zvýšená), je pravdivý i výrok „teplota je zvýšená“. Pak je jednodušší nemluvit o množinách a příslušnostech k nim, ale přímo o pravdivosti a o funkcích pravdivosti jednotlivých vstupních výroků – vstupních termů.

Vícehodnotová a fuzzy logika

Přirozeným zobecněním dvouhodnotové logiky je logika tříhodnotová (např. s pravdivostními hodnotami: 0 (ve významu nepravda), 0,5 (částečná pravda, možná, nevím) a 1 (pravda), existují i logiky s větším počtem stupňů pravdivosti. Logická proměnná ve fuzzy logice má nekonečně mnoho pravdivostních hodnot v uzavřeném intervalu $[0, 1]$, při realizaci programem je počet hodnot omezen a je závislý na způsobu číselné interpretace hodnoty pravdivosti.

Fuzzy množiny

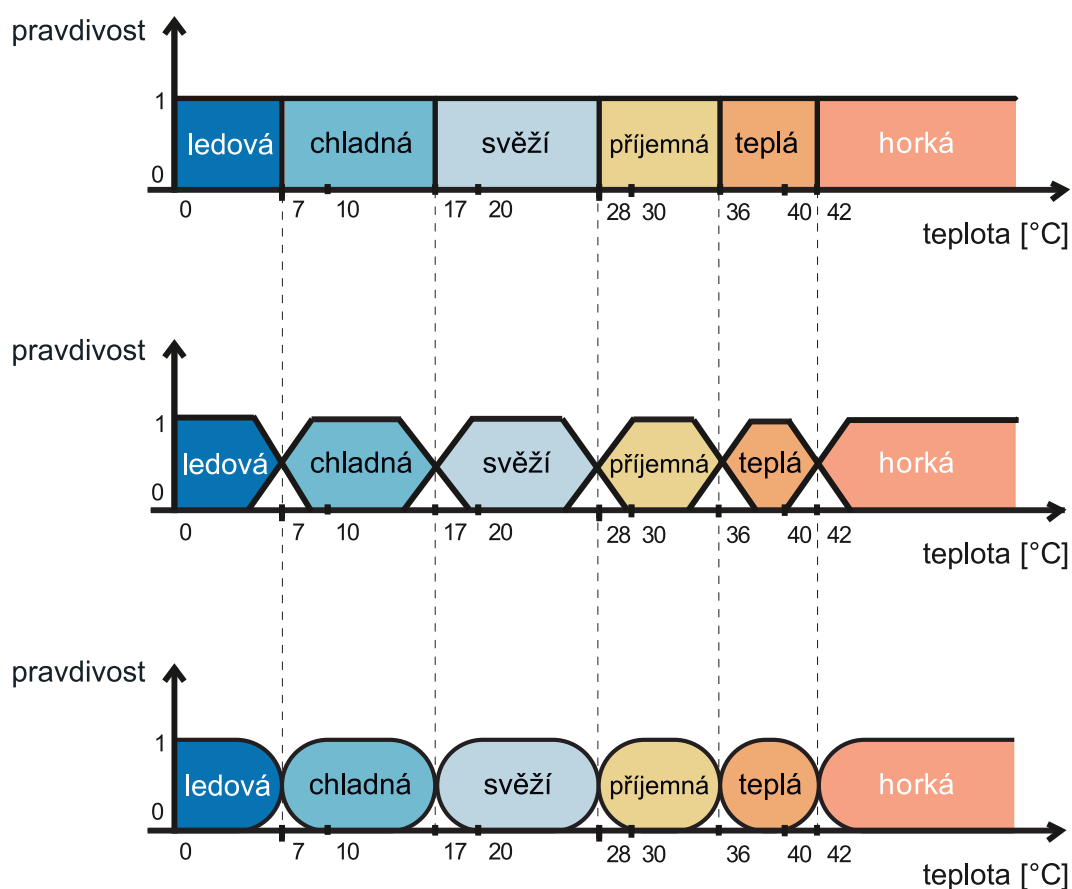
V teorii fuzzy množin se ke každému prvku přiřazuje míra jeho příslušnosti k fuzzy množině (příslušnostní funkce, membership function) s číselnou hodnotou z uzavřeného intervalu $[0, 1]$. Obvykle je označovaná symbolem μ , u něhož je jako dolní index vepsáno jméno množiny, např. μ_A odpovídá příslušnosti prvku k fuzzy množině A , μ_B označuje míru příslušnosti k množině B , $\mu_{\text{zvýšená}}$ označuje příslušnost k množině zvýšená apod.

Příslušnost k fuzzy množině

Je obvyklé, že prvek fuzzy množiny „do množiny trochu patří a trochu do ní nepatří“ (s příslušností od 0 do 1). Lze říci, že příslušnost prvku k množině je neostrá. Stejně neostrá je hranice fuzzy množiny – obrazně: mlhavá, zamlžená, roztřepaná, ochmýřená. Zde je i původ anglického přívlastku fuzzy. Oproti klasickým množinám je pro fuzzy množiny možné (a obvyklé), že jeden prvek současně patří do dvou nebo více fuzzy množin s různou mírou příslušnosti. Ve fuzzy logice lze tedy smírně řešit konflikty typu „buď mám pravdu já, anebo ty“ konstatováním „každý máme trochu pravdu“. Obdobně, jako pro klasické množiny, je i pro fuzzy množiny definován soubor množinových operací – mezi základní opět patří operace fuzzy průniku, sjednocení a doplňku, existují ale i další operace s fuzzy množinami. Podobně existuje úzká souvislost mezi množinovými a logickými operacemi.

Smíšené systémy a fuzzy logika

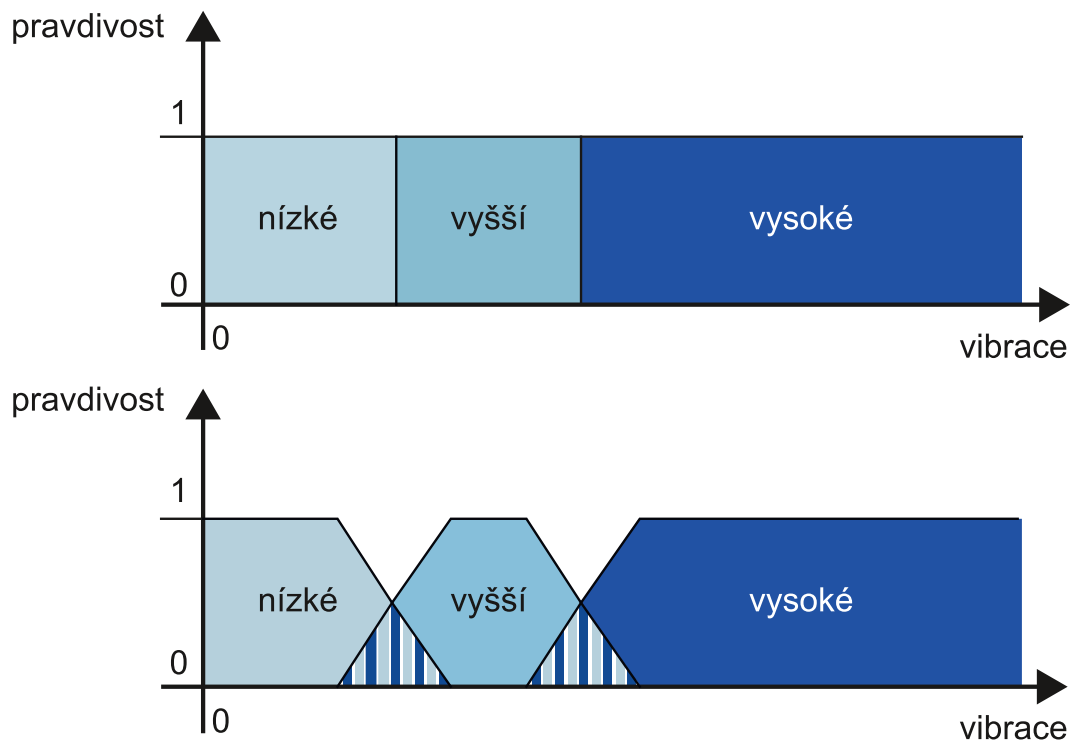
V technických aplikacích fuzzy systémů se často (skoro vždy) setkáváme se smíšenými systémy, jejichž vstupními proměnnými jsou číselné proměnné (jazykové proměnné), nad jejichž hodnotami jsou definovány logické proměnné (vstupní jazykové termy). Jestliže pro dvouhodnotovou logiku jsou přechody mezi pravdivostmi sousedních termů skokové (ostré), mohou být ve fuzzy logice pozvolné a pravdivostní funkce se mohou překrývat. Například pro 35 °C můžeme teplotu vody hodnotit jako částečně příjemnou a částečně už jako jako teplou, podobně pro 37 °C můžeme teplotu hodnotit jako částečně teplou a ještě částečně příjemnou.



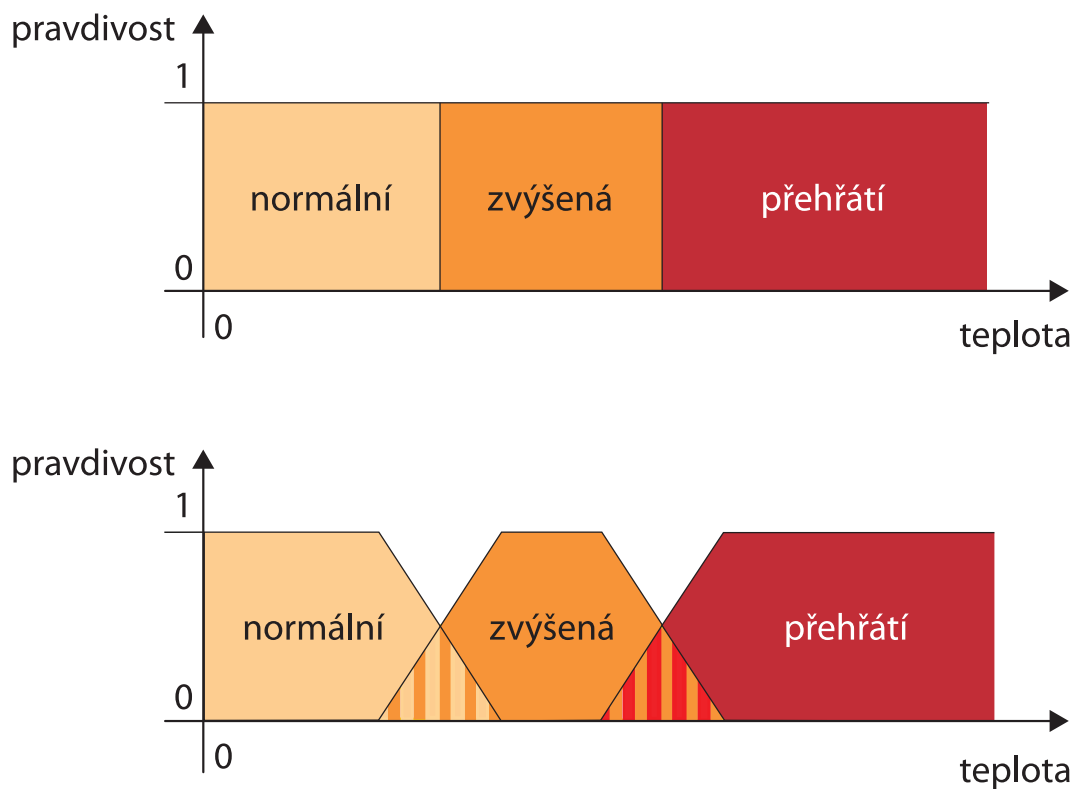
Obr. 6.2: Možné průběhy pravdivostních funkcí termů

Fuzzy systém pro diagnostiku ložiska

Například pro řešení diagnostiky ložiska ve fuzzy logice můžeme zobecnit postup, uvedený v závěru kapitoly 5. Místo dvouhodnotových termů budeme nyní pracovat s fuzzy termy, které jsou fuzzy proměnnými a nabývají hodnot z intervalu $[0, 1]$. Funkce pravdivosti pro intenzitu vibrací i pro teplotu mají tvar lomené funkce (lichoběžníky a rampy) a pro sousední termy se překrývají.



Obr. 6.3: Možné průběhy pravdivostních funkcí tří termů pro intenzitu vibrací ložiska.

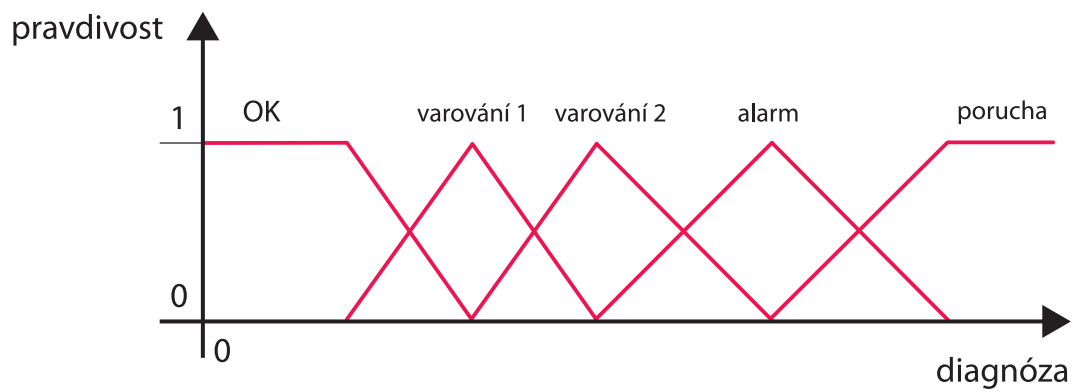


Obr. 6.4: Možné průběhy pravdivostních funkcí tří termů pro teplotu ložiska.

Výstupní fuzzy termy

Výsledkem vyhodnocení obvykle bývá soubor fuzzy proměnných – výstupních termů, např. ve významu OK, varování¹, varování², alarm, porucha. Můžeme ale požadovat výsledek jako hodnotu jediné spojité (číselné) proměnné – výstupní jazykové proměnné ve významu diagnóza vadného ložiska. Její hodnotu určíme z hodnot pravdivosti výstupních termů. Jejich pravdivostní funkce mohou mít tvar lomené funkce (lichoběžníků nebo trojúhelníků, ale i obdélníků případně úzkých impulzů (singletonů)).

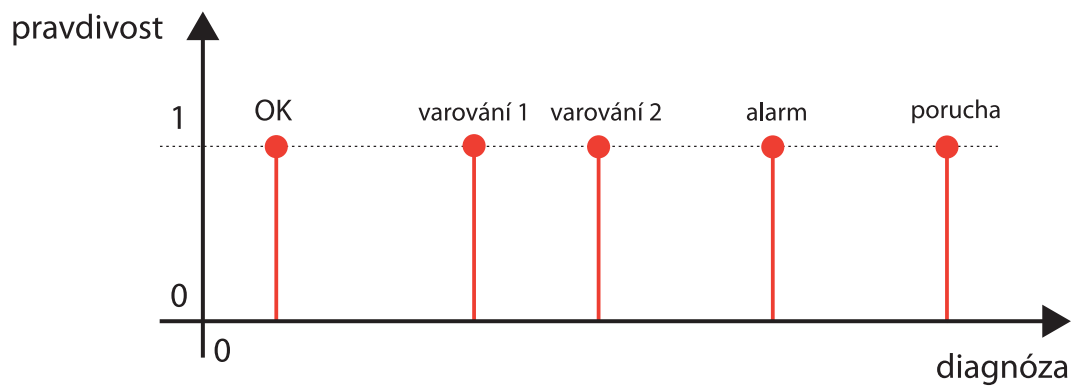
a)



b)



c)



Obr. 6.5: Možné průběhy pravdivostních funkcí pěti termů, jako výsledku vyhodnocení diagnózy ložiska (a) lomená funkce, (b) obdélníky, (c) úzké obdélníky – singletony.

6.3 Fuzzy logika jako zobecnění binární logiky

Úvod

Podstata zjednodušení, kterého se dopouštíme v tomto modulu, spočívá v tom, že fuzzy logiku považujeme za zobecnění binární logiky pro vícehodnotové proměnné. Postup budeme ilustrovat na příkladu symetrických logických funkcí, které byly pro binární logiku popsány dříve.

6.4 Prahové a majoritní funkce v binární logice

V učebnicích navrhování logických systémů bývají využívány majoritní a prahové funkce jako názorné ukázkové příklady pro ilustraci postupu návrhu a minimalizace logických výrazů. Shrňme jen, že jejich pravdivost závisí na počtu jedničkových operandů a pro daný počet je pak shodná pro všechny jejich kombinace – proto se též zařazují mezi symetrické funkce. Prahové funkce („alespoň k z n “ – budeme je zapisovat f_{k_n}) jsou pravdivé, pokud z jejich n operandů je alespoň k (k nebo více) rovno jedné. Číslo k se nazývá prahem. Zvláštním případem prahových funkcí jsou majoritní funkce. Jsou definovány pro lichý počet operandů a jsou jedničkové, pokud nadpoloviční (většinový, majoritní) počet operandů je jedničkový.

6.5 Logické výrazy

Pro funkci „majorita ze tří“ platí $m_3 = f_{2_3}$, pro „majorita z 5“ platí $m_5 = f_{3_5}$. Obecně platí, že pro práh k obsahuje minimalizovaný logický výraz součet součinných členů délky k , ve kterých se postupně vystřídají všechny kombinace z n proměnných v základním tvaru (bez negací). Platí tedy např.

$$f_{3_3}(a, b, c) = abc$$

$$f_{2_3}(a, b, c) = m_3(a, b, c) = ab + ac + bc$$

$$f_{1_3}(a, b, c) = a + b + c$$

$$f_{4_4}(a, b, c, d) = abcd$$

$$f_{3_4}(a, b, c, d) = abc + abd + acd + bcd$$

$$f_{2_4}(a, b, c, d) = ab + ac + ad + bc + bd + cd$$

$$f_{1_4}(a, b, c, d) = a + b + c + d$$

6.6 Souvislost s AND a OR

Je vidět, že funkce $f_{3_3}(a, b, c) = abc$ a $f_{4_4}(a, b, c, d) = abcd$ jsou shodné s logickým součinem AND (platí to obecně pro f_{n_n}) a funkce $f_{1_3}(a, b, c) = a + b + c$ a $f_{1_4}(a, b, c, d) = a + b + c + d$ je logickým součtem OR (platí to obecně pro f_{1_n}).

6.7 Použití v zabezpečovací technice

Prahové a majoritní funkce se často uplatňují při řešení protipožárních zabezpečovacích systémů, kdy jsou používány senzory požáru (požární hlásiče) s binárním výstupem. Jsou používány v nadbytečném počtu a výsledná rozhodnutí o riziku požáru jsou obvykle řešena jako prahové funkce. Senzory tak jsou do určité míry zálohovány a řešení je odolné proti výpadku některého z nich. Současně je omezen výskyt planých poplachů při rušení nebo chybné aktivaci některého ze senzorů.

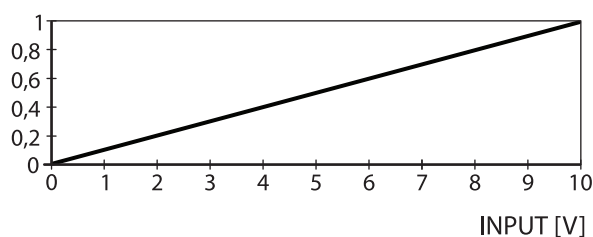
6.8 Důvod pro fuzzy zobecnění

Již dříve byly uvedeny příklady realizace majoritní funkce a prahových funkcí. Nyní předpokládejme, že máme za úkol zabezpečit objekt podobným způsobem, ale s použitím čidel, která poskytují spojitý výstup, např. v rozsahu 0 V až 10 V s tím, že nulové hodnotě odpovídá bezpečný stav (riziko požáru je nulové), hodnotě 10 V odpovídá naprostá jistota požáru (riziko je jedničkové).

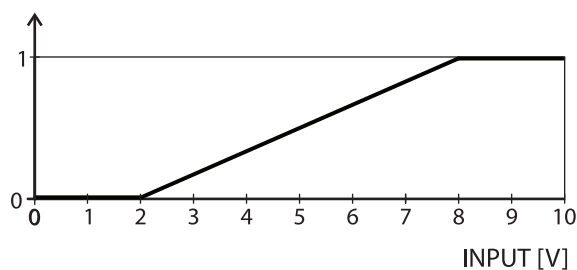
6.9 Postup při fuzzy zobecnění

Nabízí se řešení s využitím fuzzy logiky. Binární logické proměnné nahradíme fuzzy proměnnými, které mohou nabývat libovolných hodnot mezi nulovou a jedničkovou, jejichž pravdivostí vyjadřuje míru rizika požáru. Dále zavedeme takové logické operace, které budou zobecňovat základní logické operátory AND, OR a NOT. Každému čidlu pak odpovídá jedna fuzzy proměnná. Přiřazení pravdivosti k hodnotě napěťového signálu z čidla (nejjednodušší případ fuzzifikace) záleží na našem uvážení – může se jednat jen o lineární normalizaci rozsahu, o lineární závislost v aktivní oblasti s omezením na obou stranách rozsahu nebo obecnou nelineární závislost.

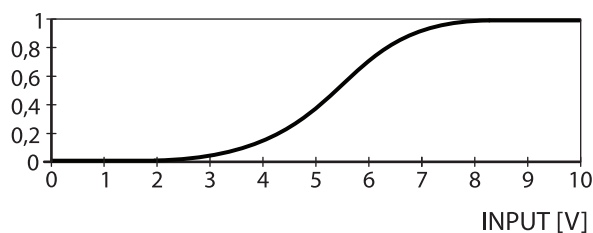
a)



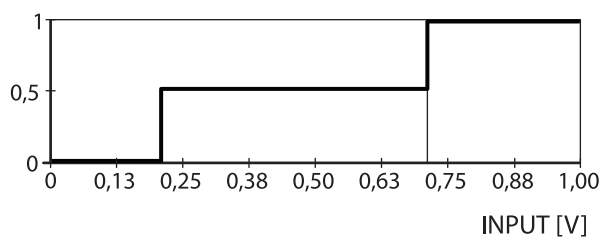
b)



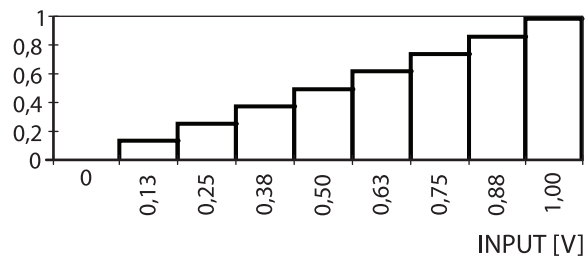
c)



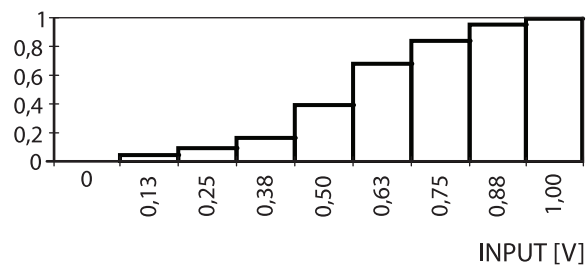
d)



e)



f)



Obr. 6.6: Možné průběhy pravdivostní funkce

6.10 Zobecnění logických výrazů

K vyčíslení stupňů poplachu můžeme použít stejné logické výrazy, jako v binární logice, pouze zobecněné pro fuzzy logiku. Jsou formálně shodné, pouze jsou v nich nahrazeny operátory Booleovy algebry zobecněnými operátory pro fuzzy logiku.

6.11 Fuzzy zobecnění AND, OR, NOT

Existuje nekonečně mnoho způsobů, jak zobecnit booleovské operátory AND, OR a NOT pro vícehodnotovou a fuzzy logiku (fuzzy zobecnění vyhovuje i pro vícehodnotové logiky). Všechny zobecněné operátory se pro kombinace krajních hodnot intervalů (booleovských hodnot 0 a 1) chovají jako booleovské operátory AND, OR a NOT. Pravdivostním hodnotám operandů zevnitř intervalů $[0; 1]$ pak přiřazují „nějaké“ pravdivostní hodnoty opět z intervalu $[0; 1]$. Lze říci, že provádějí interpolaci mezi booleovskými výstupními hodnotami 0 a 1. Je možné diskutovat o tom, které operátory jsou pro daný účel vhodnější a které poskytují lepší (hladší či méně komplikovaný) průběh interpolace. Žádné ze zde uváděných operátorů nejsou nevhodné (takže mohou být vhodné). Někdy se pro rozlišení od booleovských operátorů používají jiné symboly, např. ANF, ORF a NOF, zde bude používáno tradiční označení, které je používáno i v normě IEC 61131-7 a indexem bude upřesněn typ operátoru.

6.12 Fuzzy zobecnění negace – fuzzy NOT

Jako zobecnění fuzzy negace se nejčastěji (v aplikacích téměř výhradně) používá doplněk k jedničkové hodnotě

$$\text{NOT } a = 1 - a$$

V literatuře se dále uvádí např. Sugenova třída komplementů

$$\text{NOT}_\lambda a = (1 - a)/(1 - \lambda a) \text{ pro parametr } \lambda \text{ z intervalu } (-1, \infty)$$

nebo Yagerova třída negací

$$\text{NOT}_w a = (1 - aw)^{1/w}$$

6.13 Fuzzy zobecnění AND a OR

Jako zobecnění logického součinu AND a součtu OR se nejčastěji používají operace minima a maxima (Zadehovy či Gödelovy operace)

$$\text{AND}_m(a, b) = \min(a, b)$$

$$\text{OR}_m(a, b) = \max(a, b),$$

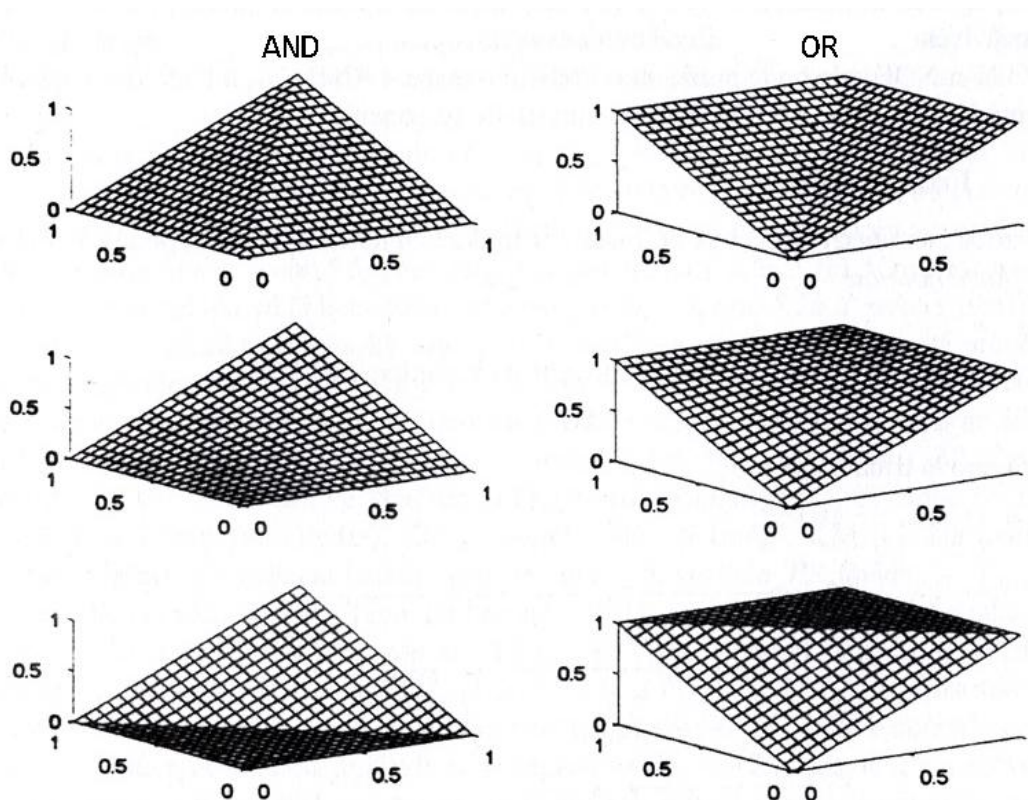
$$\text{AND}_a(a, b) = ab$$

$$\text{OR}_a(a, b) = a + b - ab$$

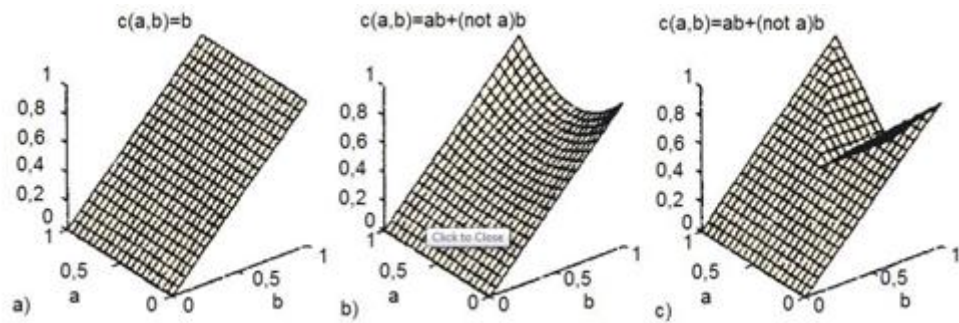
$$\text{AND}_b(a, b) = \max(0, a + b - 1) \dots \text{omezení výrazu } a + b - 1 \text{ zdola na nule}$$

$$\text{OR}_b(a, b) = \min(a + b, 1) \dots \text{omezení výrazu } a + b \text{ shora na jedničku}$$

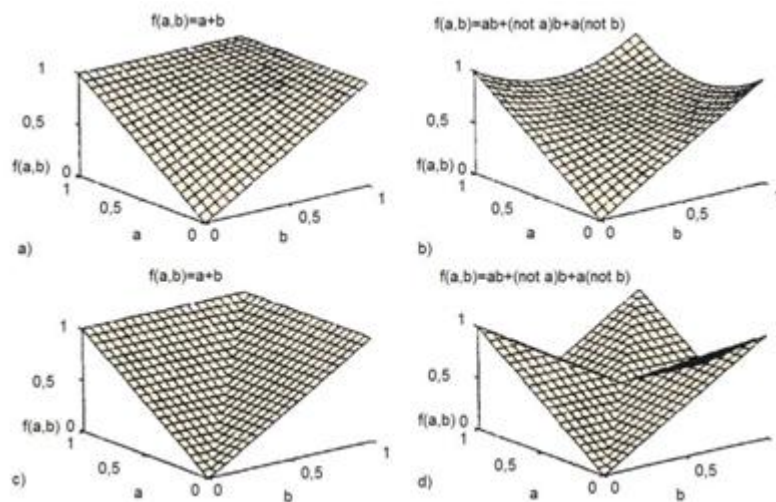
Průběh funkce zobecněných operátorů pro dvě proměnné se obvykle zobrazuje jako prostorový graf. Lze jej chápat jako zobecněné a v prostoru zobrazené pravdivostní mapy (K-mapy) – rohům půdorysného čtverce odpovídají hodnoty přiřazené tradičními booleovskými operátory krajním (booleovským) hodnotám operandů 0 a 1.



Obr.6.7: Grafy pravdivosti dvou operátorů



Obr.6.8: Ukázka odlišnosti funkce minimalizovaného výrazu b(a) a neupraveného výrazu ab



Obr.6.9: Ukázka odlišnosti funkce minimalizovaného výrazu a OR



Příklad 6.1

Uvedme ilustrativní příklad s pravdivostmi operandů $a = 0,3$ a $b = 0,8$. Pro operace maxima a minima platí:

$$a \text{ AND}_m b = 0,3 \text{ (menší z obou), } a \text{ OR}_m b = 0,8 \text{ (větší z obou)}$$

pro pravděpodobnostní operace:

$$a \text{ AND}_a b = 0,3 * 0,8 = 0,24 \quad a \text{ OR}_a b = 0,3 + 0,8 - 0,24 = 0,86$$

a pro Lukasewiczovy operace:

$$a \text{ AND}_b b = \max(0; 0,3 + 0,8 - 1) = \text{větší z } (0 \text{ a } 0,1) = 0,1$$

$$a \text{ OR}_b b = \min(0,3 + 0,8; 1) = \text{menší z } (1,1 \text{ a } 1) = 1$$

Je vidět, že pro výsledky zobecněných logických operátorů platí nerovnosti (nejenom pro uvedené příklady, ale obecně):

$$\text{ANDb} < \text{ANDa} < \text{ANDm}$$

$$\text{ORm} < \text{ORa} < \text{ORb}$$

6.14 Postačuje minimum a maximum

Patrně nejčastěji se používají operace minima a maxima. Výpočetně jsou nenáročné a mají i další výhodné vlastnosti. Platí pro ně nejvíce pravidel Booleovy algebry (všechna s výjimkou pravidla o vyloučení třetí možnosti) a obvykle jsou v souladu s naším intuitivním chápáním logických problémů.

6.15 Příklad fuzzy diagnostického systému

Předpokládejme, že je požadováno řešit program pro diagnózu ložisek vyhodnocením měřených údajů o teplotě a vibracích. Uvažujme stejné zadání a shodná pravidla (logické výrazy), jako v příkladu pro binární logiku, pouze zobecněné pro fuzzy logiku.

6.16 Určení pravdivosti vstupních termů – fuzzifikace

Pravdivostní funkce vstupních termů pro intenzitu vibrací a pro teplotu uvažujme ve tvaru lomené funkce (lichoběžníků a ramp). Stanovení pravdivosti vstupních termů z hodnot intenzity vibrací a teploty se nazývá fuzzifikací.

6.17 Vyčíslení pravdivosti – inference

Pro náš příklad jsme opět zvolili pět diagnostických stavů, z nichž každý je reprezentován samostatnou fuzzy logickou proměnnou – výstupními jazykovými termy: *OK*, *varovani1*, *varovani2*, *alarm*, *porucha*. Jejich pravdivost vyčíslíme souborem logických výrazů (přiřazovacích příkazů) zobecněných pro fuzzy logiku. K použití podmíněných příkazů IF – THEN by bylo nutné se zabývat zobecněním funkce implikace a pravidel odvozování, proto je zde nebudeme používat.

OK := *v_nizke* & *normalni*;

varovani1 := *v_nizke* & *zvysena* OR *v_zvysene* & *normalni*;

varovani2 := *v_nizke* & *prehrati* OR *v_zvysene* & *zvysena* OR *v_vysoke* & *normalni*;

alarm := *v_zvysene* & *prehrati* OR *v_vysoke* & *zvysena*;

porucha := *v_vysoke* & *prehrati*;

Pro lepší názornost můžeme pravidla uspořádat do maticové formy (mapy).

	vibrace		
teplota	nízké	zvýšené	vysoké
normální	OK	varování 1	varování 2
zvýšená	varování 1	varování 2	alarm
přehřátí	varování 2	alarm	porucha

Obr. 6.10: Maticové uspořádání pravidel.

6.18 Vyčíslení jednoznačného výsledku – defuzzifikace

Po vyčíslení výrazů může nastat situace, kdy několik výstupních termů (až čtyři) bude současně nenulových, takže výsledek je poněkud nepřehledný a víceznačný. Proto je účelné převést kombinaci hodnot termů na hodnotu jediné proměnné, která nese souhrnnou informaci o výsledné diagnóze, např. ve významu riziko_poruchy nebo diagnóza. Tato operace je opačným problémem, než fuzzifikace, nazývá se tedy defuzzifikací. Pětici výstupních termů lze při ní opět interpretovat jako soubor pravdivostních funkcí nad výstupní jazykovou proměnnou diagnóza.

6.19 Defuzifikace

Vyčíslením souboru pravidel nebo logických výrazů zpravidla získáme několik výstupních logických proměnných (výstupních termů), jejichž pravdivost je nenulová. Každý z logických závěrů má odlišnou pravdivost – jak je obvyklé ve fuzzy logice, ale i v závěrech několika expertů, kterým jsme svěřili posouzení stejného problému. Se souborem víceznačných (někdy i protikladných) výsledků se nesnadno pracuje. Proto je potřebné získat jednoznačný výsledek – jednu konkrétní hodnotu pro každou výstupní jazykovou proměnnou, např. „diagnózu“ o stavu ložiska („riziko zadření ložisky je 38“) nebo hodnotu akčního zásahu fuzzy regulátoru („klapku otevřít na 27 %“, „napětí pro pohon = 5,6 V“, „ventil pootevřít impulzem v trvání 3,8 s“). Postup, jak ze souboru víceznačných fuzzy logických závěrů vytvořit jednoznačný (ostrý) výsledek, nazýváme defuzifikace.

6.20 Výstupní termy

Defuzzifikaci můžeme považovat za opak k fuzzifikaci. Nad výstupní jazykovou proměnnou (např. ve významu rizika poruchy ložiska, napětí akčního zásahu, natočení regulační klapky nebo ventilu, doby trvání akčního zásahu) opět definujeme průběhy pravdivostních funkcí pro jednotlivé výstupní termy. Ty mohou mít podobný tvar a rozmístění, jako při definici vstupních termů – obvykle trojúhelníku, lichoběžníků nebo křivek s hladkým průběhem.

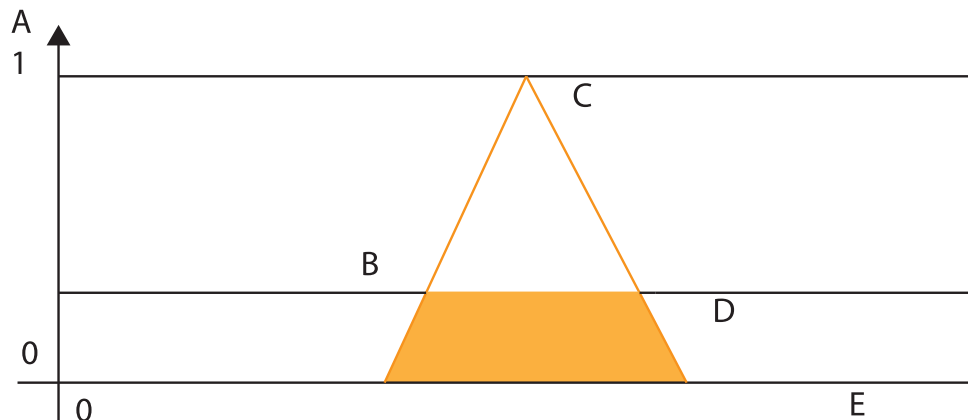
6.21 Postup defuzzifikace bez implikace

V literatuře se postup defuzzifikace obvykle spojuje s použitím funkce implikace (některé z jejich mnoha možných fuzzy zobecnění). Výklad je komplikovaný a v praxi se stejně realizují jeho hrubě zjednodušené varianty. Zde se omezíme jen na popis používaného postupu bez teoretického zdůvodňování.

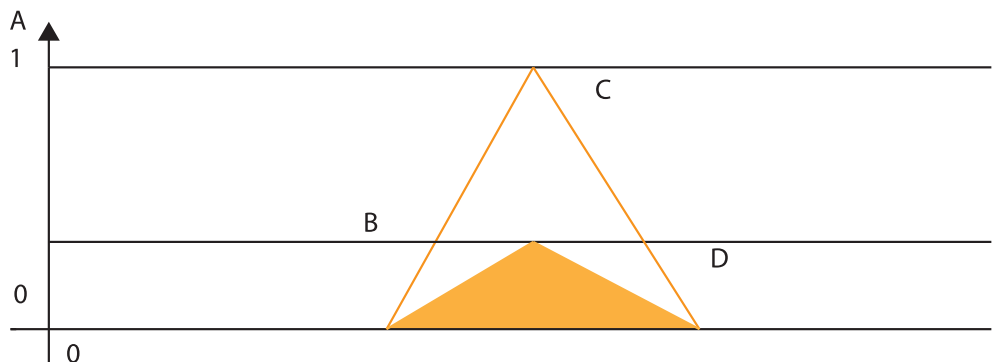
6.22 OR mezivýsledků – sjednocená plocha

Popsanou operaci provedeme pro každý term (stačí je provést pro termy s nenulovými aktuálními pravdivostmi) a dílčí výsledky pro každý term logicky sečíst. Logický součet OR je zde interpretován jako funkce maxima. Graficky lze tento postup interpretovat jako sjednocení obrazců pod „deformovanými“ pravdivostními funkcemi termů („oříznutými“ nebo „stlačenými“).

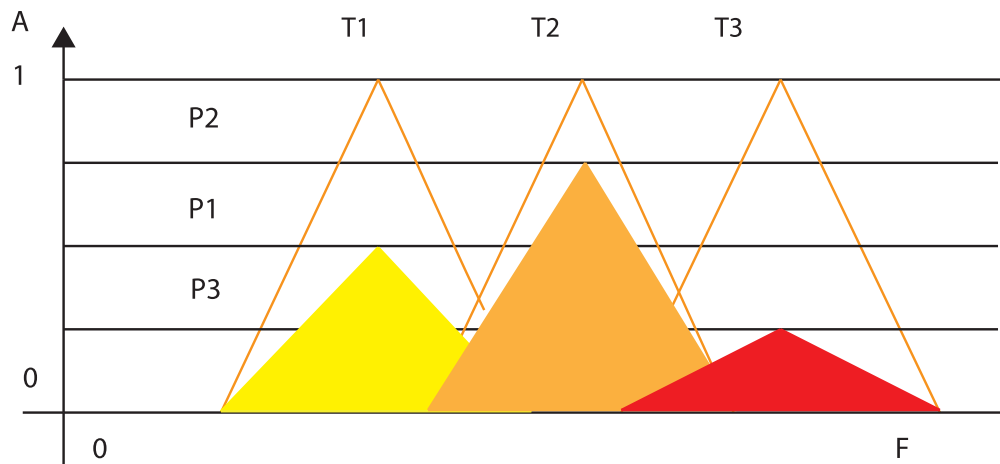
a)



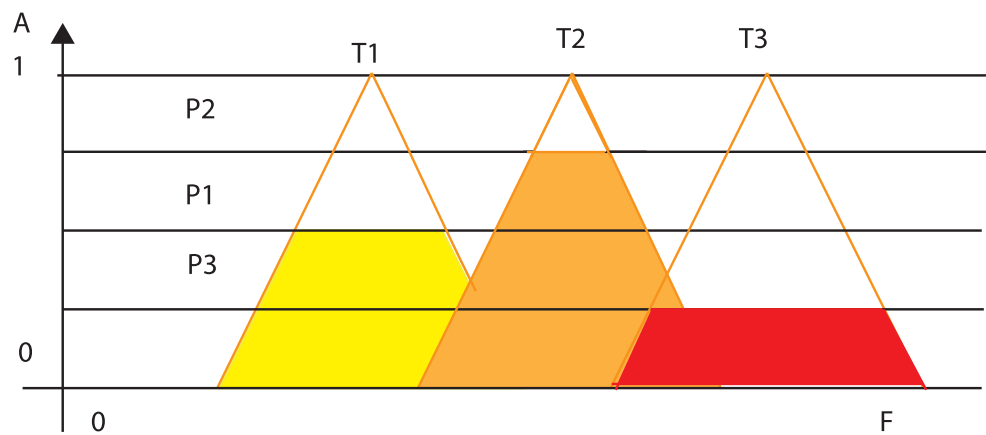
b)



c)



d)



Obr. 6.11: Logický součin pravdivosti AND průběhu termu. B – pravdivost podmínky; C – výstupní term; T1 – term 1; T2 – term 2; T3 – term 3; D – fuzzy množina závěru; E – výstupní jazyková proměnná; F – výsledná množina; P1 – podmínka 1; P2 – podmínka 2; P3 – podmínka 3

6.23 Metoda těžiště – CoG

Pro závěrečné vyhodnocení lze použít několik metod. Při metodě těžiště CoG (Centre of Gravity) vypočteme těžiště sjednocené plochy. Výsledkem je pak jeho souřadnice ve vodorovném směru.

6.24 Metoda bisekce – CoA

Při použití metody bisekce CoA (Centre of Area) je výsledkem souřadnice svislého řezu, který dělí výslednou plochu na dvě stejně velké části.

6.25 Metoda maxima – LM, RM

Při metodě levého maxima LM (Left Most Maximum) je výsledkem poloha největšího z maxim zleva, při metodě pravého maxima RM (Right Most Maximum) je výsledkem poloha největší z maxim zprava. Pokud maximum není „ostrý vrchol“, ale „plato“ (vodorovná), lze použít metodu středu maxim, kde výsledkem je střed této úsečky („plata“). Poněkud nebezpečné by bylo určit výsledek jako průměrnou hodnotu z poloh dvou nebo více shodných vrcholů. Používají se i další metody.

6.26 Metody těžiště singletonů – CoGS

Často je pro svou malou výpočetní náročnost používána metoda těžiště singletonů CoGS (Centre of Gravity for Singletons), kde výsledkem je vodorovná souřadnice těžiště singletonů. Singletony se omezí na hodnotách pravdivostí odpovídajících výstupních termů (zkrátí se jednotlivé „hmotné tyčky“) a spočte se vodorovná složka souřadnice těžiště. Platí pro ni jednoduchý vztah, který má svou analogii v mechanice, při výpočtu rovnováhy na dvouramenné páce:

$$x_{tez} = \frac{\sum x_i y_i}{\sum y_i}$$

kde x_{tez} je výsledná hodnota, tedy souřadnice těžiště singletonů ve směru vodorovné osy (ve směru ramena), x_i jsou polohy jednotlivých singletonů a y_i jsou hodnoty odpovídajících pravdivostí výstupních termů („výšky tyček“).

6.27 Obdoba váženého průměru

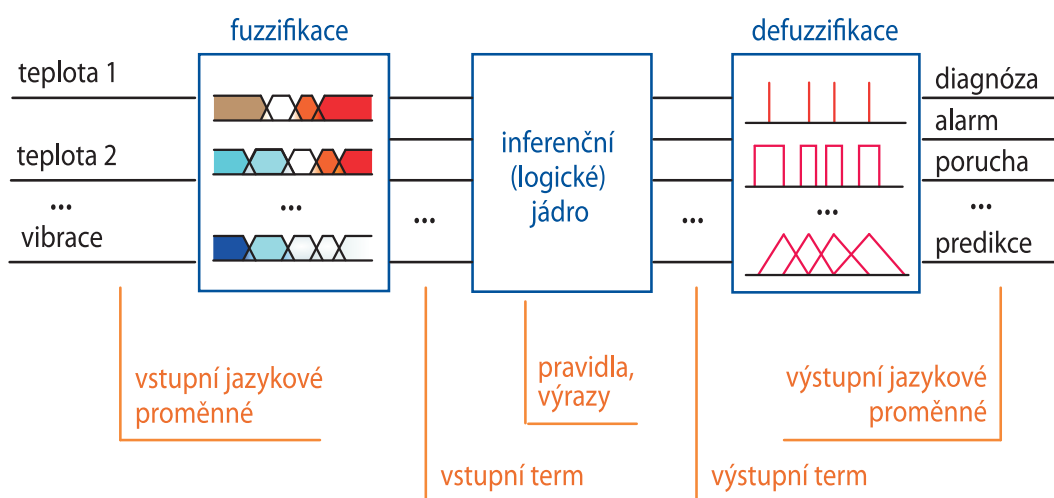
Z jiného pohledu můžeme výpočet těžiště singletonů chápat jako normovaný vážený průměr, při němž se sčítají hodnoty poloh singletonů (x_i), násobené odpovídajícími pravdivostmi (y_i), jako váhovými koeficienty, a výsledek je dělen (normován) součtem váhových koeficientů $\sum y_i$, tedy součtem pravdivostí všech výstupních termů (celkovou hmotností všech „tyček“). Samozřejmým předpokladem je požadavek, aby součet pravdivostí termů byl vždy nenulový. Metodu těžiště a bisekce sjednocené plochy můžeme považovat za zobecnění váženého průměru.

6.28 Mamdaniho fuzzy systém

Oba uvedené příklady si nejsou příliš podobné, přesto mají společné znaky a dokumentují společný postup při programové realizaci rozdílných typů fuzzy systémů. Lze v nich rozlišit fáze

- **fuzzifikace** – v ní je převedena číselná hodnota vstupní jazykové proměnné na pravdivosti jedné nebo několika vstupních fuzzy proměnných – vstupních fuzzy termů
- **vyčíslení pravdivostí, inferenční (logické) jádro** – soubor pravidel nebo logických výrazů, které popisují logické vztahy mezi vstupními a výstupními termy
- **defuzzifikace** – je proces zhruba opačný, než fuzzifikace – k hodnotám pravdivostí souboru výstupních termů, definovaných nad výstupní jazykovou proměnnou, přiřadí jedinou (ostrou) hodnotu výstupní jazykové proměnné.

Podobný postup se opakuje, nezávisle na tom, zda fuzzy systém realizuje řídicí, rozhodovací nebo optimalizační algoritmus, regulátor, seřizovač regulátoru, diagnostický či kontrolní systém, model, expertní systém nebo jinou funkci. Popsaný systém se někdy označuje jako Mamdaniho systém nebo Mamdaniho automat.



Obr. 6.12: Schéma typického postupu při realizaci Mamdaniho systému.

6.29 Ladění fuzzy systému

Vzhledem ke složitosti fuzzy systému je téměř vyloučeno, aby okamžitě po naprogramování vykonával fuzzy systém své funkce požadovaným způsobem. Je nutná etapa jeho ladění. Není účelné při ní měnit všechny parametry, které mohou ovlivnit chování systému a tedy tvar jeho převodní charakteristiky. Obvykle se ladí „jen“ tvary a polohy pravdivostních funkcí vstupních a výstupních termů, ostatní parametry jsou fixované (pokud nejsou prokazatelně chybně zvolené).

Problém je to náročný a zdouhavý. Aby to nebylo jen nahodilé „bloudění ve tmě“, je užitečné si uvědomit, jak dílčími zásahy ovlivňujeme tvar převodní charakteristiky.

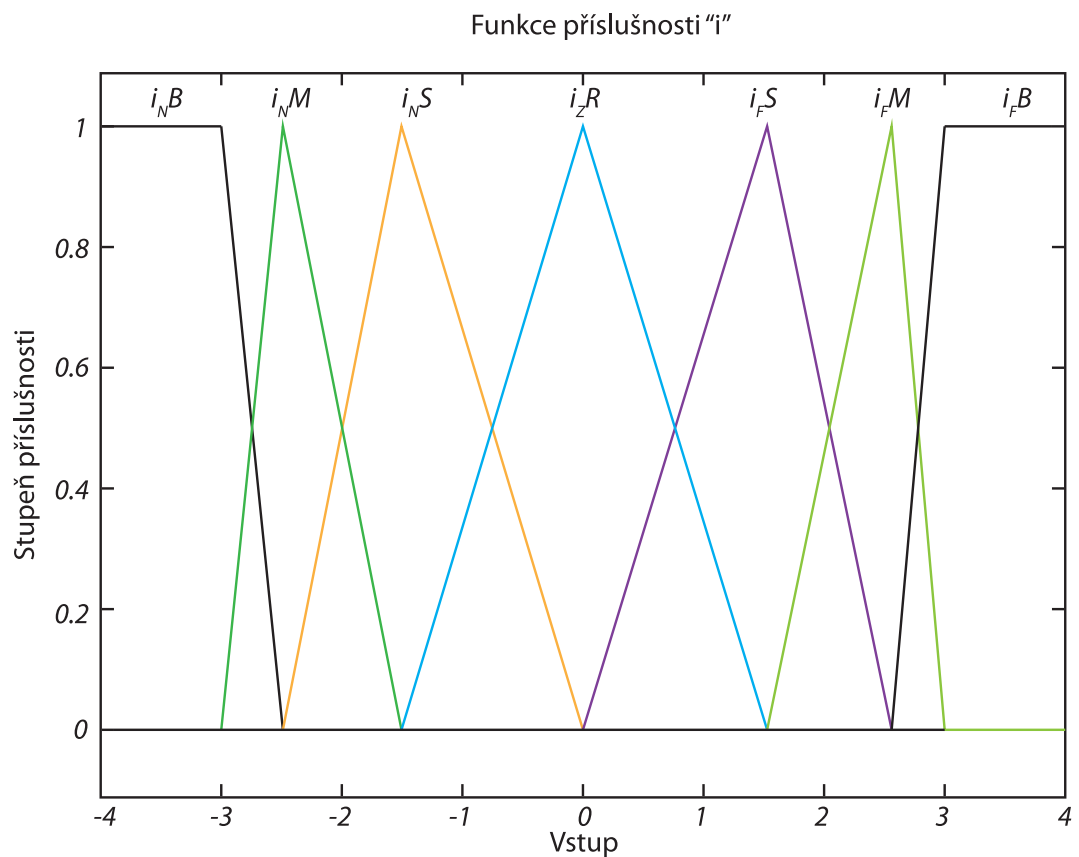
6.30 Popis systému

Postup budeme ilustrovat na jednoduchých příkladech fuzzy systémů Mandaniho typu s jednou a dvěma vstupními jazykovými proměnnými a s jednou výstupní jazykovou proměnnou. Nad každou jazykovou proměnnou je definováno 7 termů. Pět vstupních termů má tvar trojúhelníků, dva krajní mají tvar sestupné a náběžné rampy. Výstupní termy mají tvar úzkých obdélníků, které napodobují singletony. Logické jádro systému je tvořeno jednoduchým souborem pravidel, které v podstatě převádějí pravdivost vstupních termů na výstupní. Při vyčíslení výrazů je pro logický součin AND použita funkce minima, pro logický součet OR je použita funkce maxima. Defuzzifikace je provedena metodou těžiště singletonů. K realizaci je použit výpočetní systém Matlab.

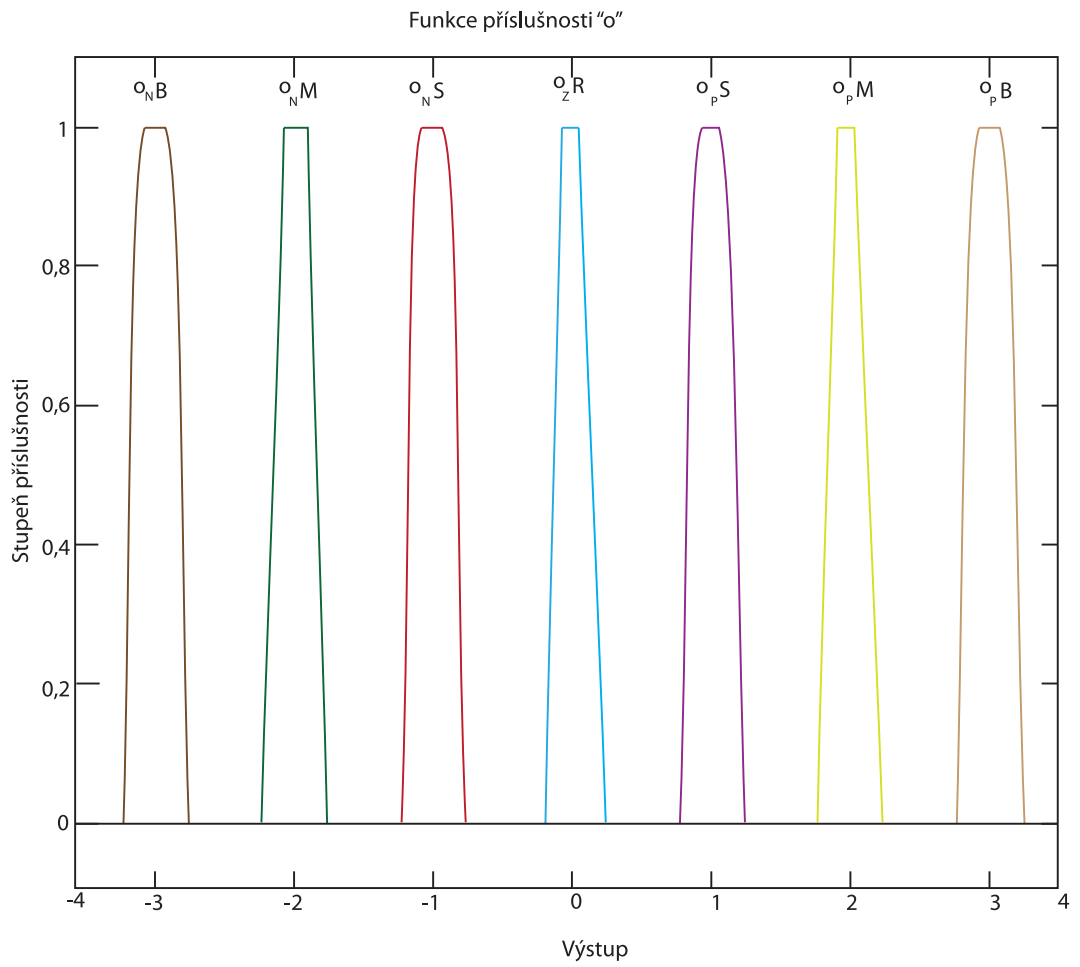
6.31 Rovnoměrné rozmístění všech termů

Nejprve uveďme příklad, kdy vstupní i výstupní termy jsou rovnoměrně rozmístěny. Pro jednorozměrný systém je patrné, že převodní charakteristika je uprostřed lineární, s téměř přímkovým průběhem, který se vlivem okrajového efektu na obou koncích zaobljuje a přechází do vodorovných úseků nasycení (saturace). Fuzzy systém lze považovat za lineární s nelinearitou nasycení (saturace) – to je obvyklé pro většinu reálných systémů.

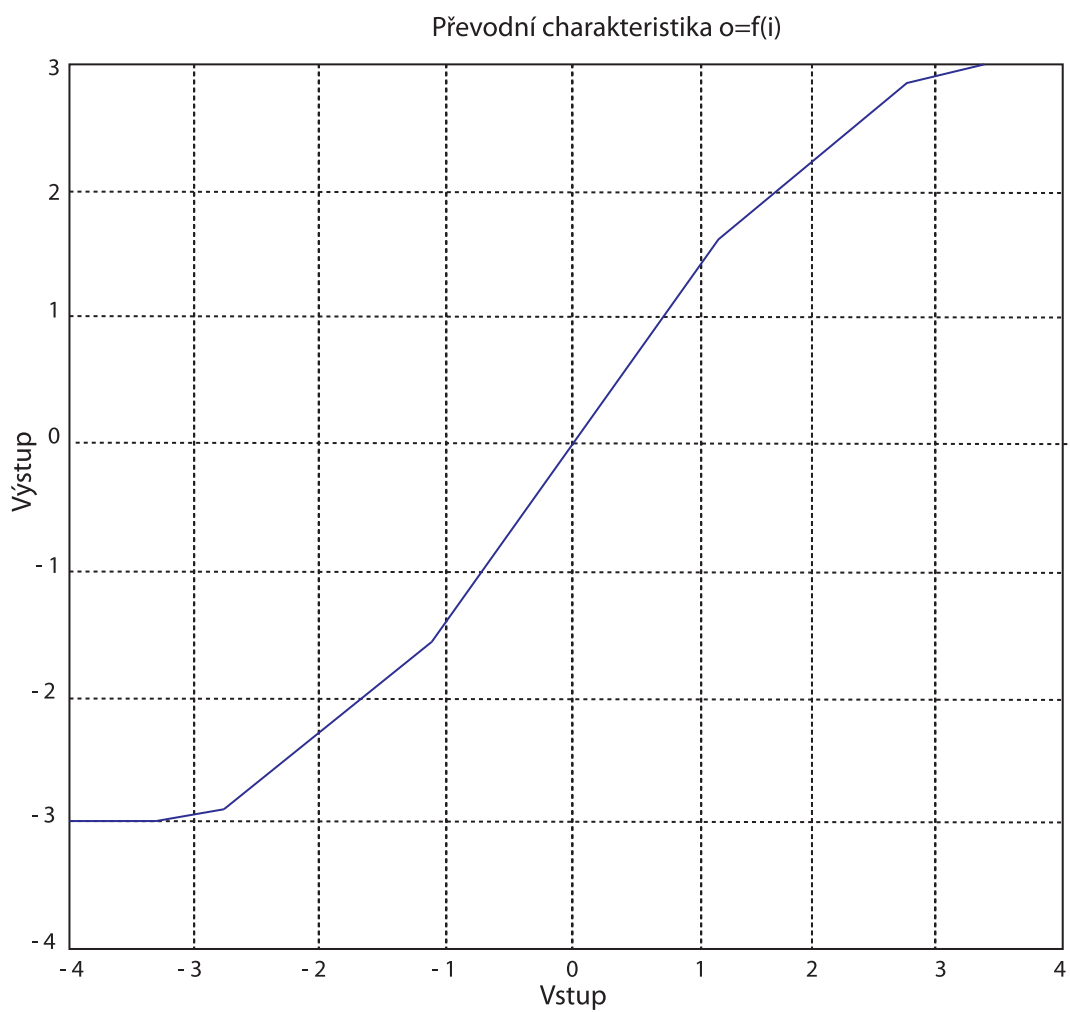
Plocha převodní charakteristiky pro dvojrozměrný systém se ve střední části blíží nakloněné rovině, pouze na okrajích jsou patrné nelinearity typu nasycení.



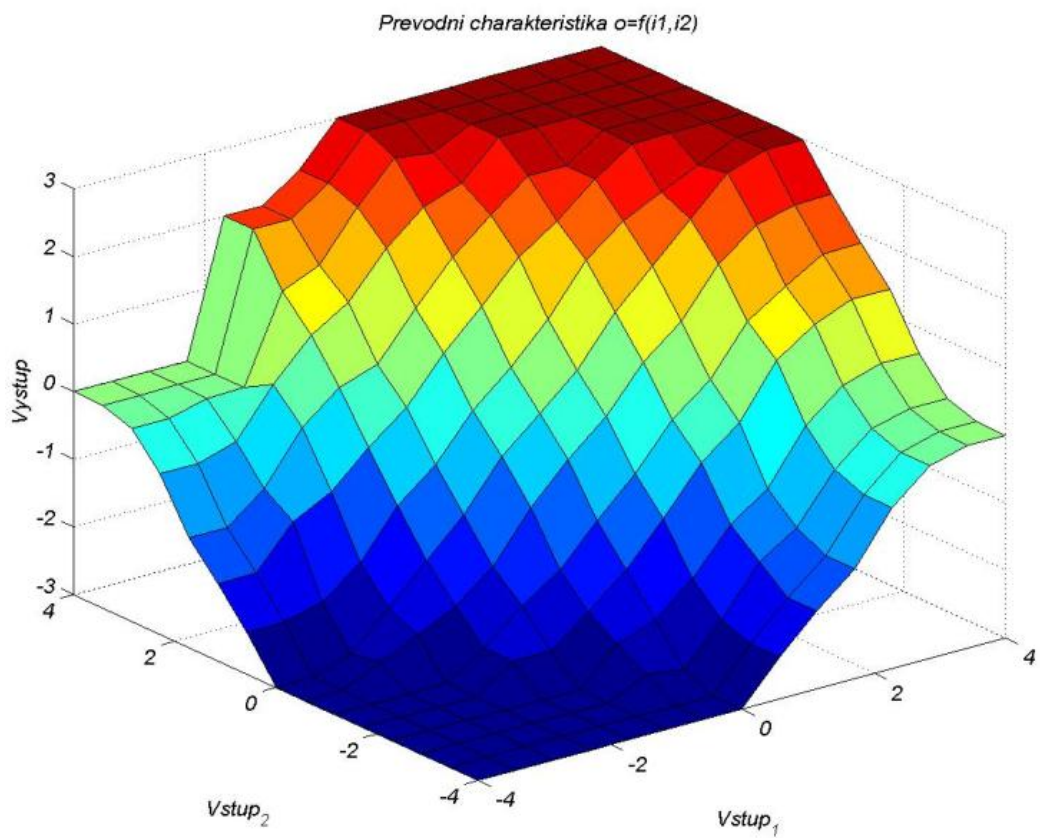
Obr. 6.13: Rovnoměrně rozmístěné vstupní termy



Obr. 6.14: Rovnoměrně rozmístěné výstupní termy



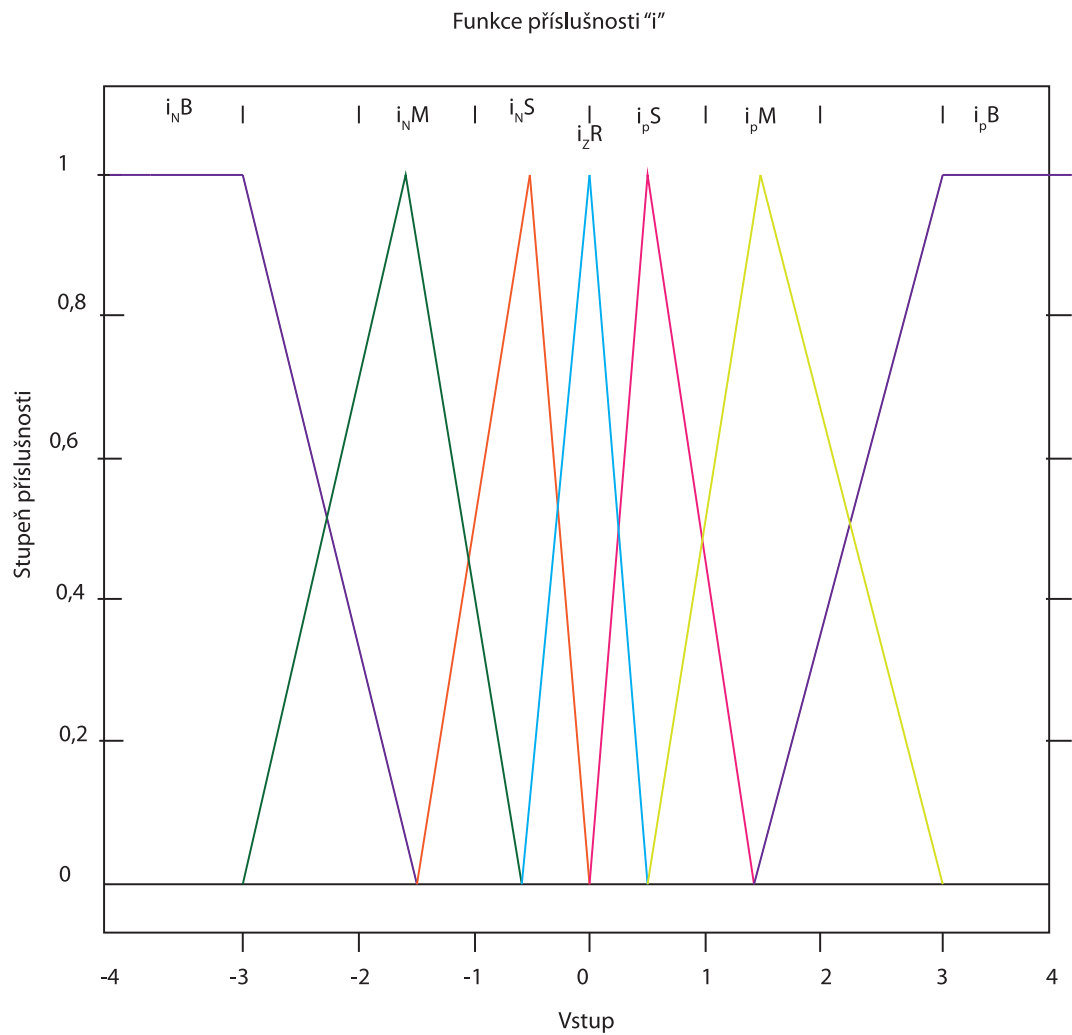
Obr. 6.15: Převodní charakteristika jednorozměrného systému



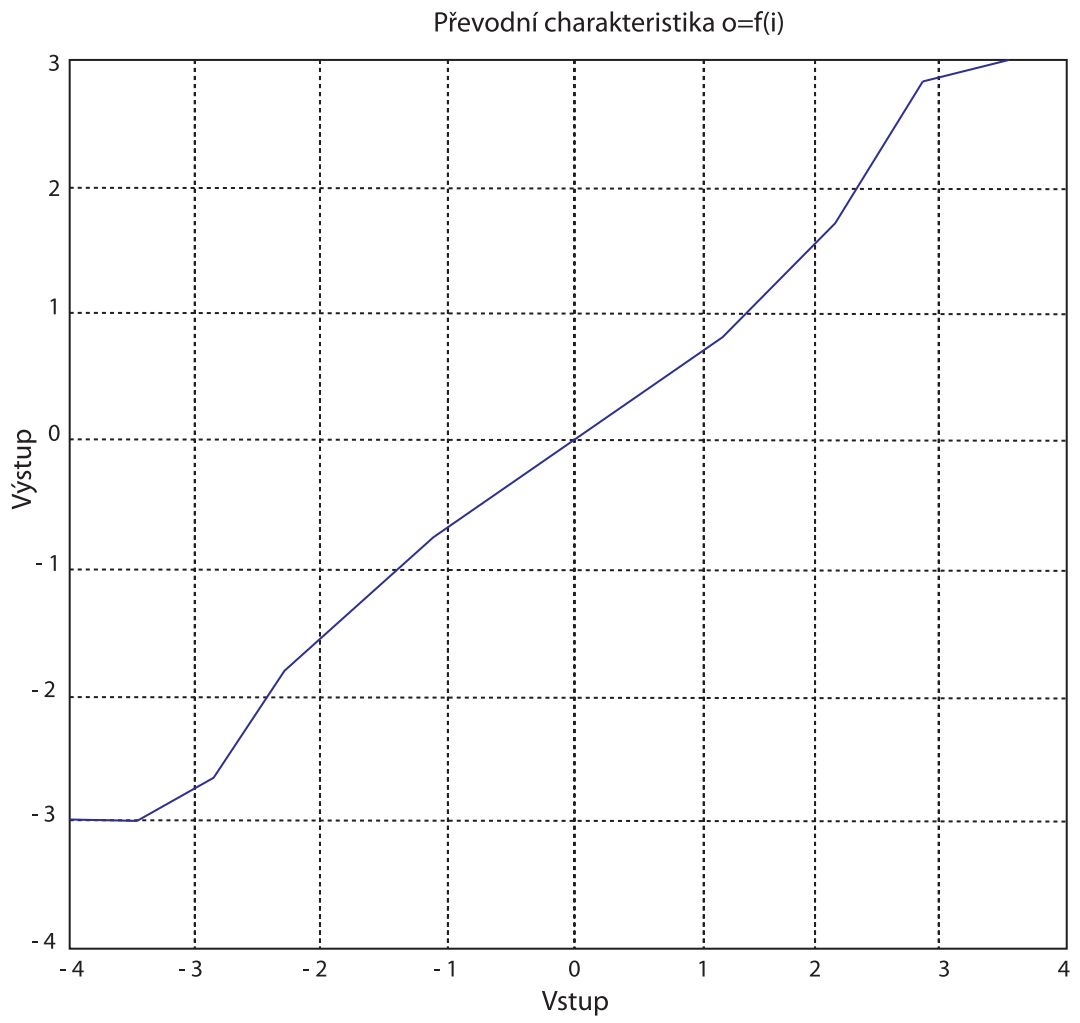
Obr. 6.16: Převodní charakteristika dvojrozměrného systému

6.32 Zhuštěné vstupní termy

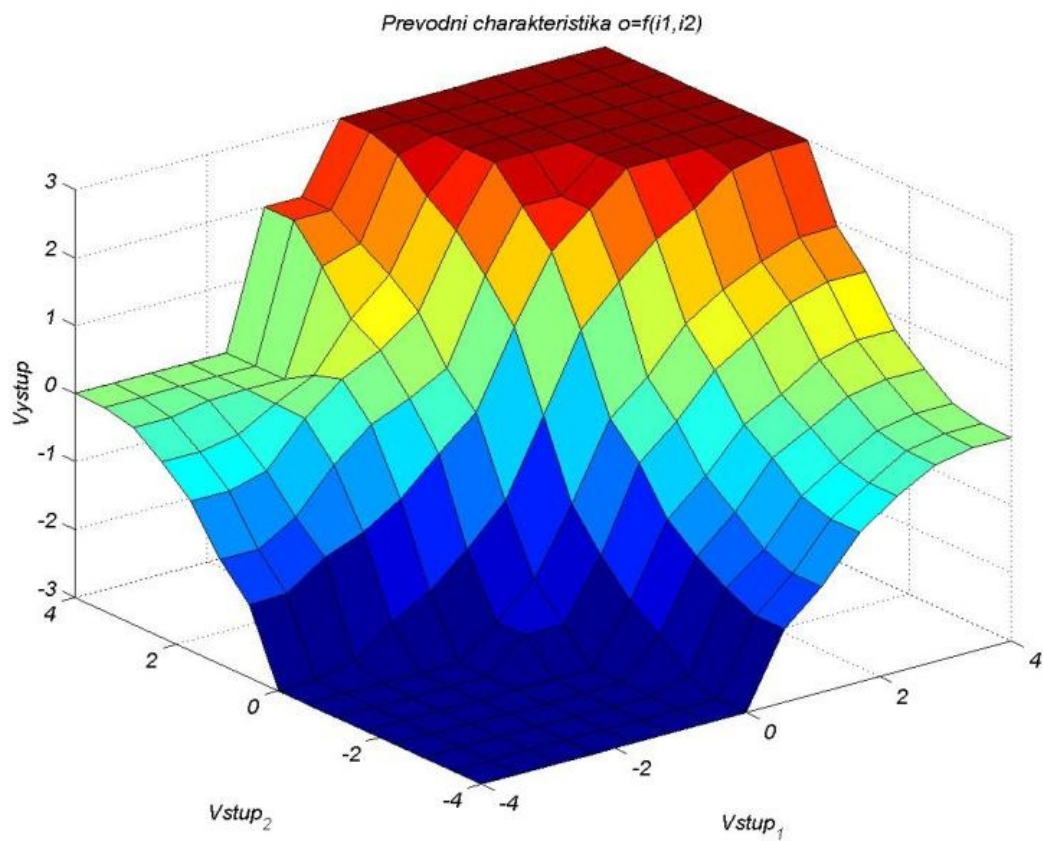
Jako další příklad uvádíme fuzzy systém, jehož vstupní termy u středu hustěji rozmístěné, než na okrajích. Výstupní termy zůstávají rovnoměrně rozmístěné. Převodní charakteristika má tvar písmene „S“ a uprostřed vykazuje výrazně větší strmost (zesílení), než na okrajích. Obdobně i pro dvojrozměrný systém je plocha převodní charakteristiky uprostřed výrazně strmější, než na okrajích.



Obr. 6.17: Uprostřed zahuštěné vstupní termy



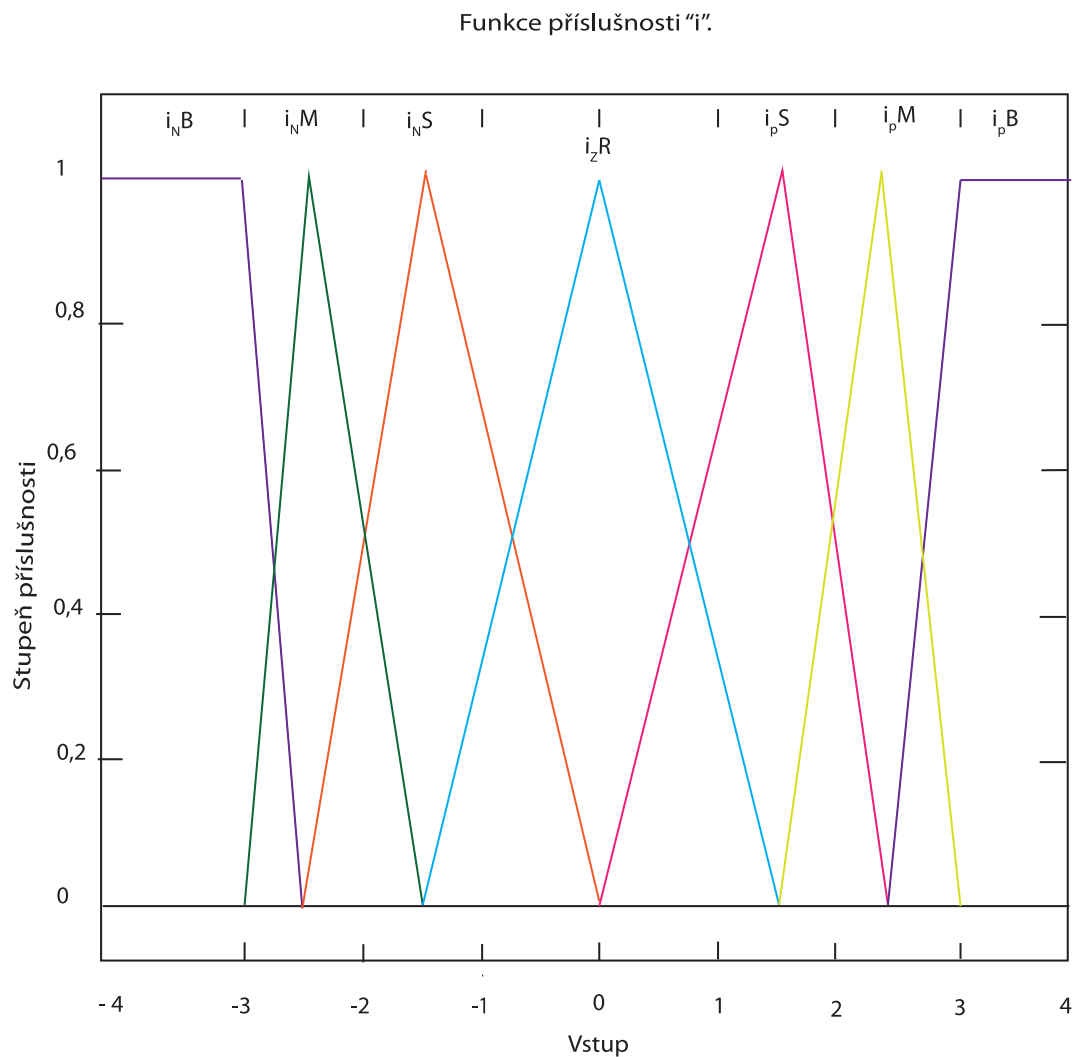
Obr. 6.18: Převodní charakteristika jednorozměrného systému2



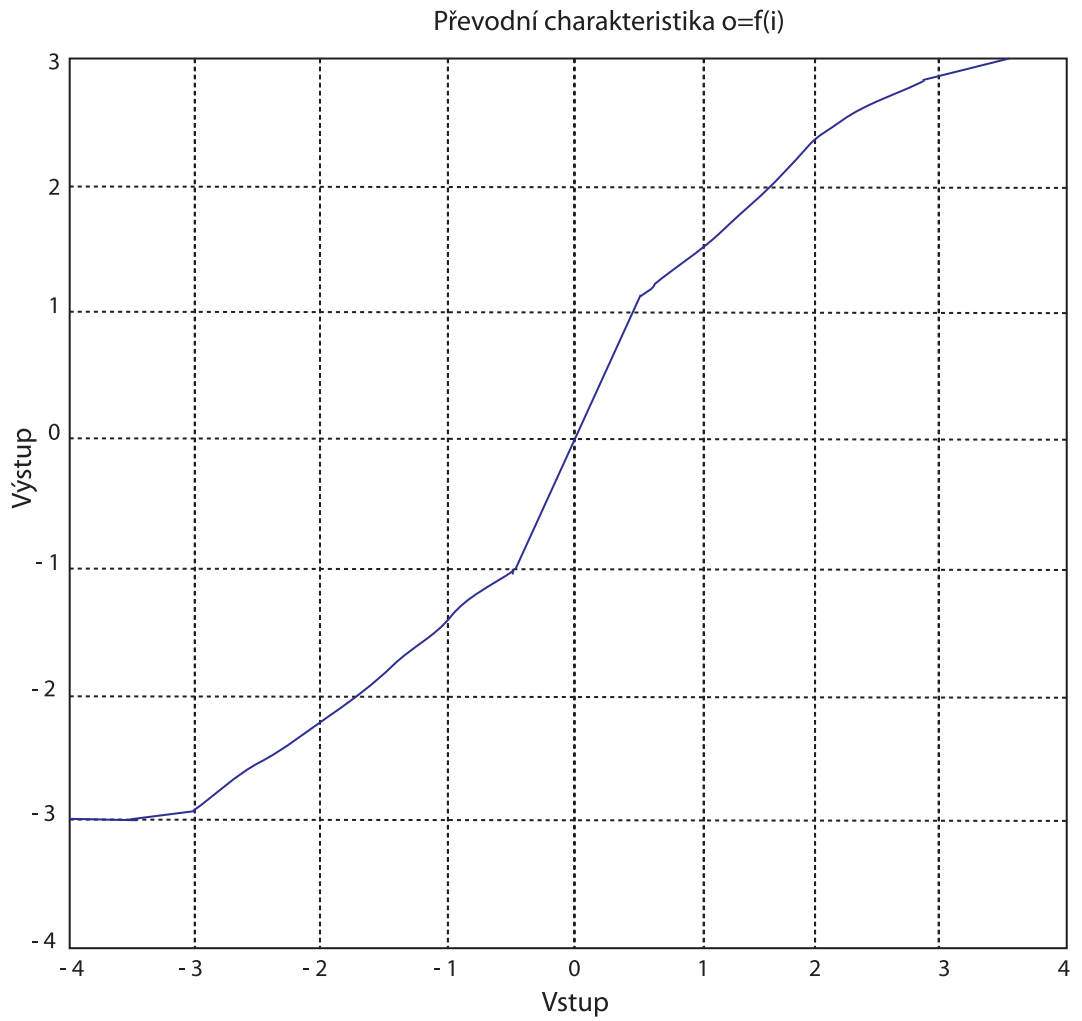
Obr. 6.19: Převodní charakteristika dvojrozměrného systému2

6.33 Zředěné vstupní termy

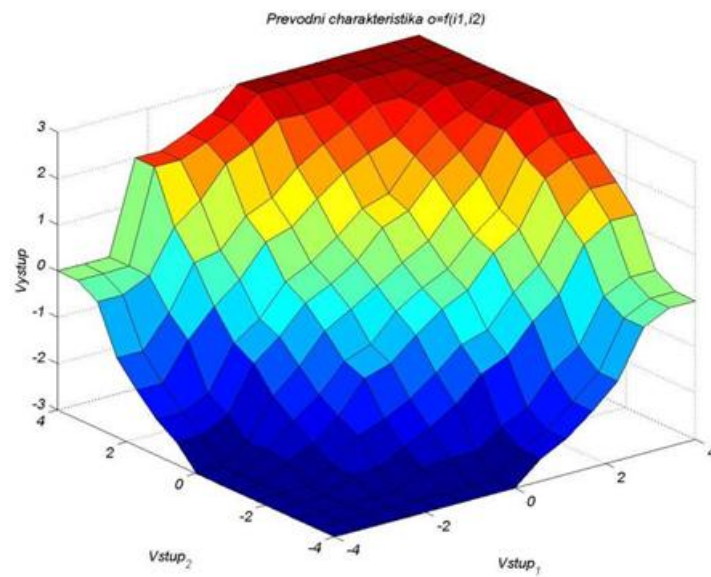
Jako další příklad uvádíme fuzzy systém, jehož vstupní termy u středu řidčeji rozmístěné, než na okrajích (zhušťují se směrem k okrajům). Výstupní termy zůstávají rovnoměrně rozmístěné. Převodní charakteristika uprostřed vykazuje výrazně menší strmost (zesílení), než v částech vzdálenějších od středu. V blízkosti okrajů je dochází k dalšími zakřivení v důsledku okrajového efektu. Obdobně i pro dvojrozměrný systém je plocha převodní charakteristiky uprostřed méně strmá, než na okrajích.



Obr. 6.20: Uprostřed zředěné vstupní termy



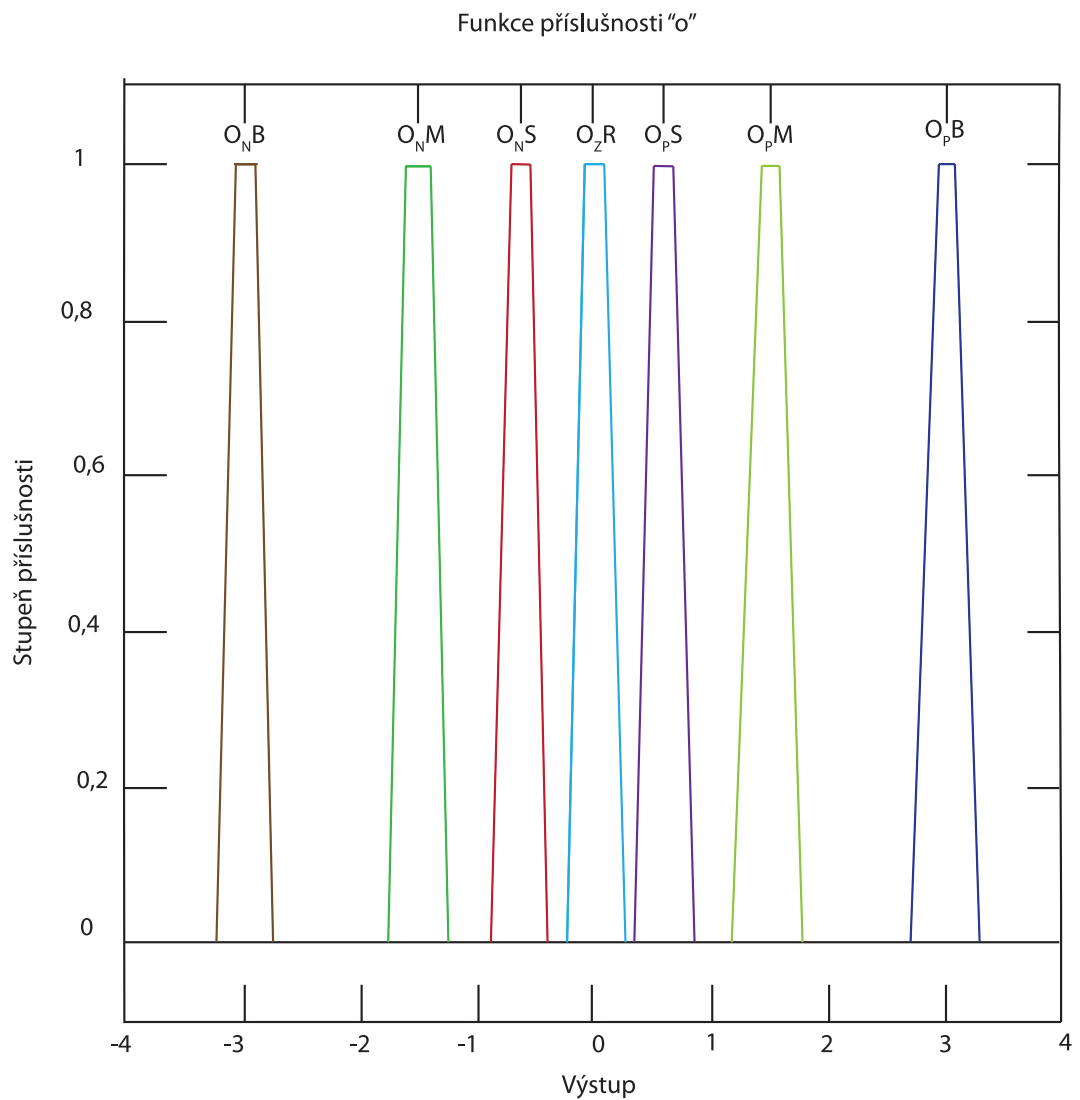
Obr. 6.21: Převodní charakteristika jednorozměrného systému³



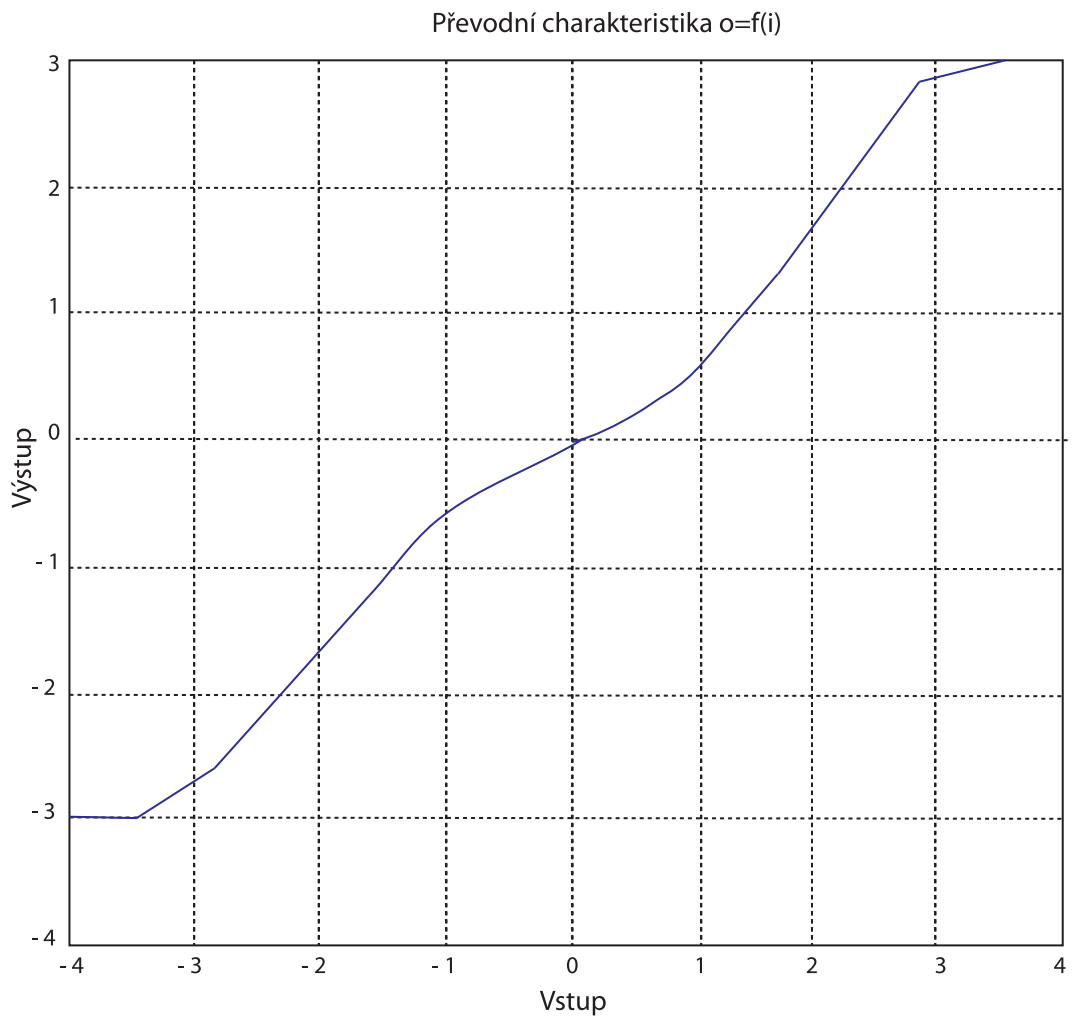
Obr. 6.22: Převodní charakteristika dvojrozměrného systému³

6.34 Zhuštění výstupní termy

Manipulace s výstupními termy (singletony) má opačný vliv na tvar převodní charakteristiky, než manipulace se vstupními termy. Zhušťování výstupních termů směrem ke středu má za následek zploštění střední části převodní charakteristiky, zatímco zředováním výstupních termů uprostřed rozsahu se zvyšuje strmost převodní charakteristiky ve střední části. Tuto skutečnost budeme ilustrovat jen na příkladech jednorozměrných systémů.



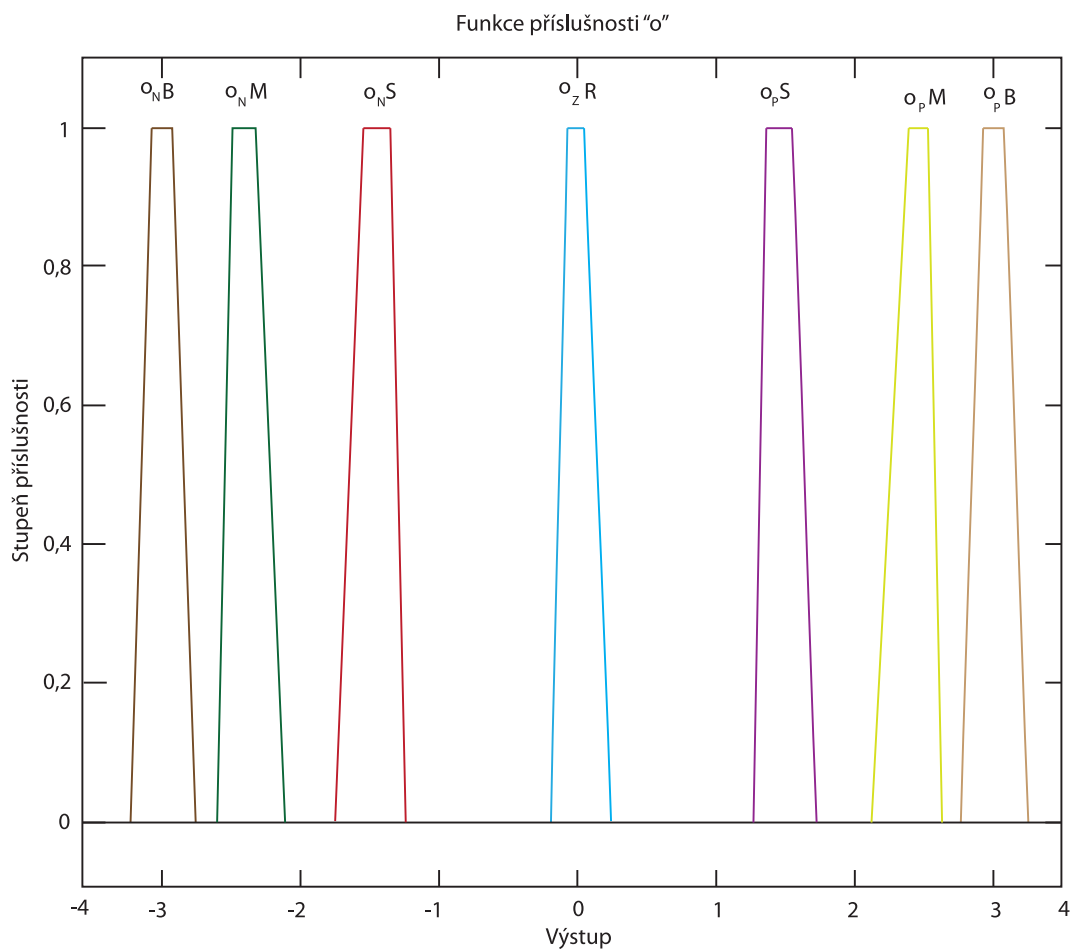
Obr. 6.23: U středu zhuštěné výstupní termy



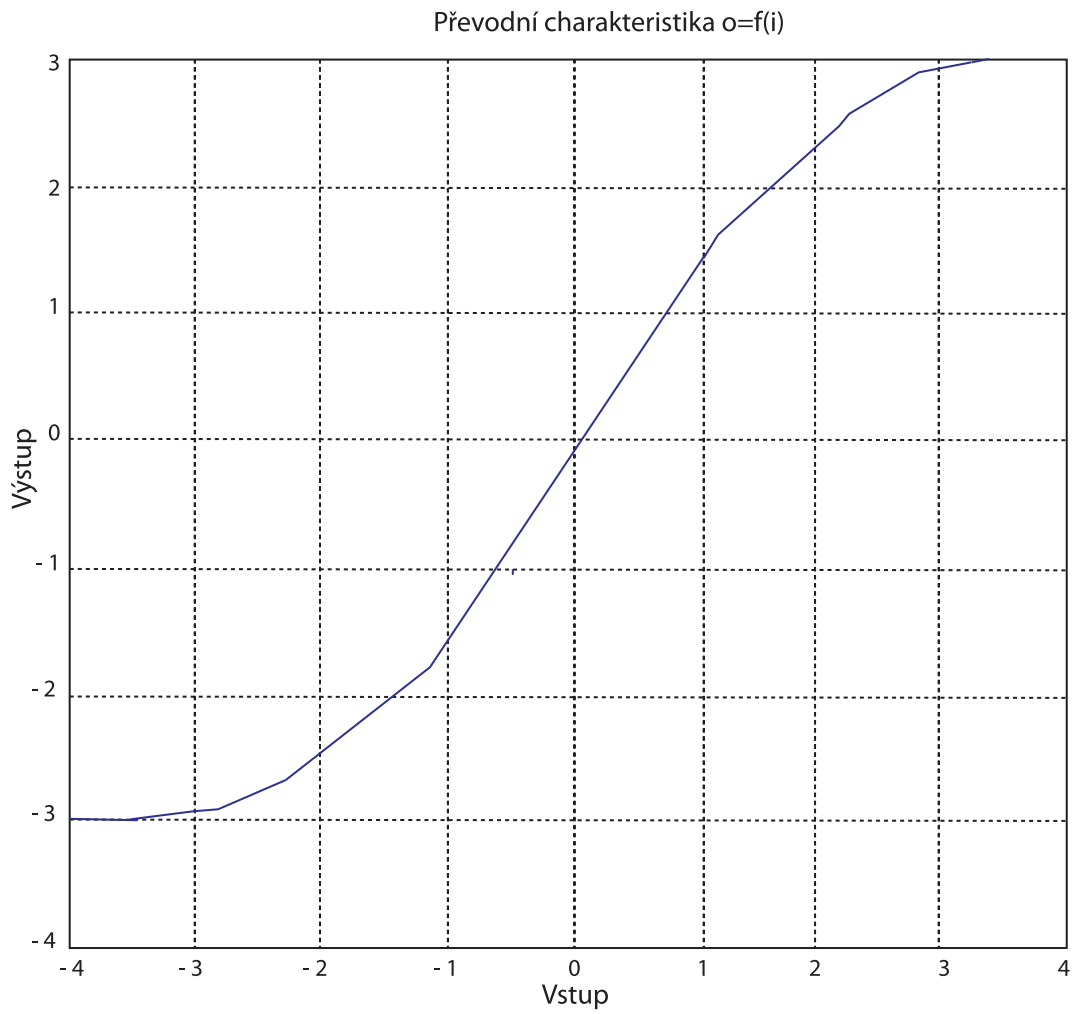
Obr. 6.24: Převodní charakteristika jednorozměrného systému4

6.35 Zředěné výstupní termy

Tvar převodní charakteristiky (především strmost ve střední části) můžeme ovlivňovat změnou rozmístění vstupních nebo výstupních termů. V účelných případech lze manipulovat současně se vstupními termy. Smysl ovšem má jen zahušťování vstupních termů současně se zředováním výstupních termů, kterým se zvyšuje strmost převodní charakteristiky u středu nebo naopak zředování vstupních termů současně se zahušťováním výstupních termů u středu rozsahu, kterým se snižuje strmost převodní charakteristiky ve střední části. Současné zhušťování nebo současné zředování termů ve střední části rozsahu nemá smysl, protože se účinky manipulací navzájem ruší.



Obr. 6.25: U středu ředěné výstupní termy



Obr. 6.26: Převodní charakteristika jednorozměrného systému⁵

6.36 Shrnutí kapitol



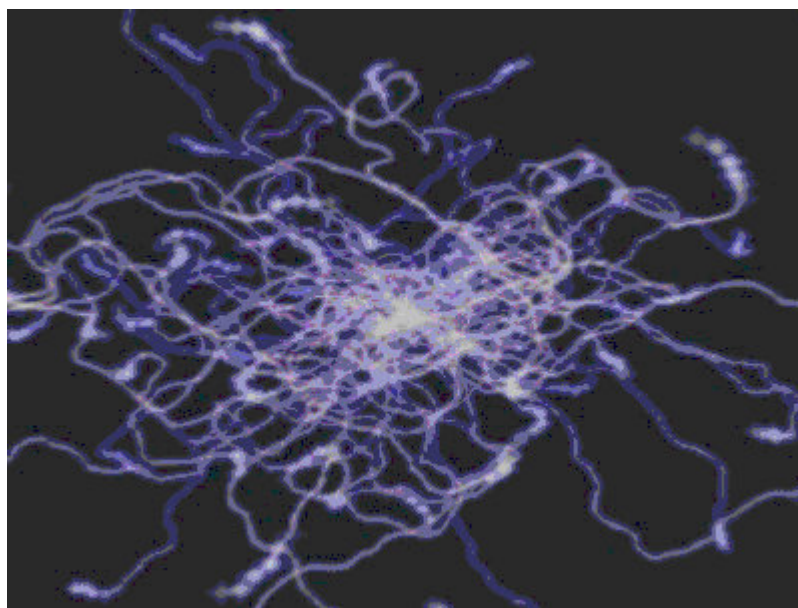
Tyto kapitoly jsou poměrně rozsáhlé obsahem. Na jejich začátku je uvedeno zobecnění AND, OR, NOT. Následně je zaveden fuzzy diagnostický systém, a to od fuzzifikace, přes zavedení inference, až po vlastní defuzzifikaci. Jsou ukázány jednotlivé defuzzifikační metody a vyjmenovány jejich výhody-nevýhody. Defuzzifikační metody jsou také ukázány na konkrétních příkladech v MATLABU. V další části je stručně popsán MATLABovský fuzzy toolbox. Je také popsán Mamdaniho fuzzy systém, Sugeno-Takagi systém. Jako velmi důležitá se jeví část věnovaná ladění fuzzy systému, protože to je jedna z nejnáročnějších operací v praxi. V závěru jsou pak definovány vstupní a výstupní termy a to ve všech možných podobách. Kapitoly uzavírá výčet použitelnosti fuzzy algoritmů v praxi.

7 Neuronové sítě

7.1 Úvod

Neurony jsou základními stavebními prvky nervové soustavy převážně mozku. Jsou to živé buňky, které se zaměřují na sbírání, uchovávání, zpracování a přenos informací. Existuje celá řada různých druhů neuronů. Ve všech případech se neuron skládá z těla (soma), do kterého přicházejí informace po vstupních větvích (dendritech), kterých je kolem deseti tisíc, a z kterého informace vycházejí po jediném výstupu (axonu), který je však na svém konci bohatě rozvětven. Výstupní signál na axonu odpovídá vstupům, které jsou zpracovány uvnitř neuronu. Výstup neuronu tedy závisí na vstupech, které do něho přicházejí.

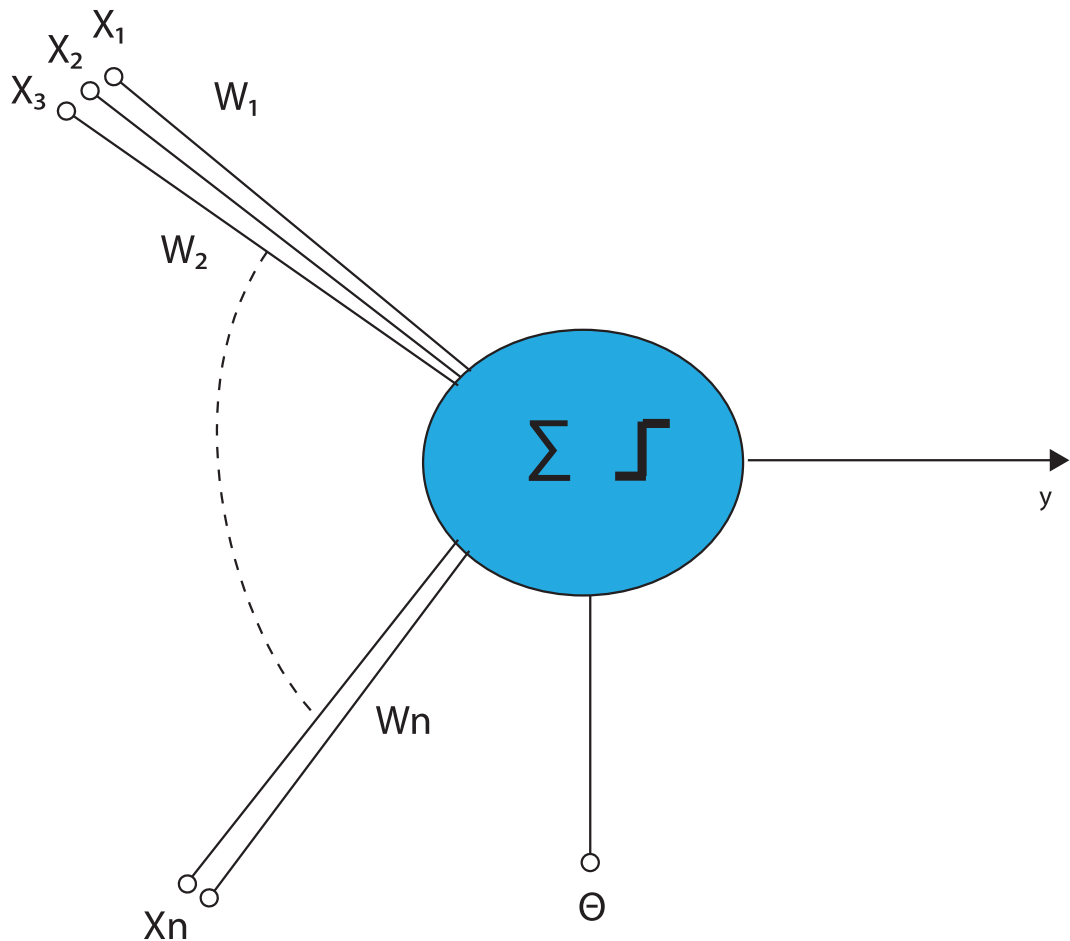
Aby mozek správně plnil svoji funkci, musí být neurony vhodně navzájem propojeny do tzv. neuronových sítí. Toto propojení je uskutečňováno právě pomocí dendritů, které se pomocí speciálních výběžků (synapsí) připojují na dendrity jiných neuronů nebo přímo na těla těchto neuronů nebo dokonce ve výjimečných případech přímo na axony. Na jeden neuron připadá v průměru asi 10 až 100 tisíc spojů s jinými neurony. Inteligentní a výkonné chování mozku (obecně neuronových sítí) je tedy z velké části dáno právě dokonalostí vzájemného propojení. Neurony v neuronových sítích mozku jsou uspořádány tak, že výpadek jednoho neuronu nemůže ohrozit funkci celku.



Obr. 7.1: Živý neuron

7.2 Principy

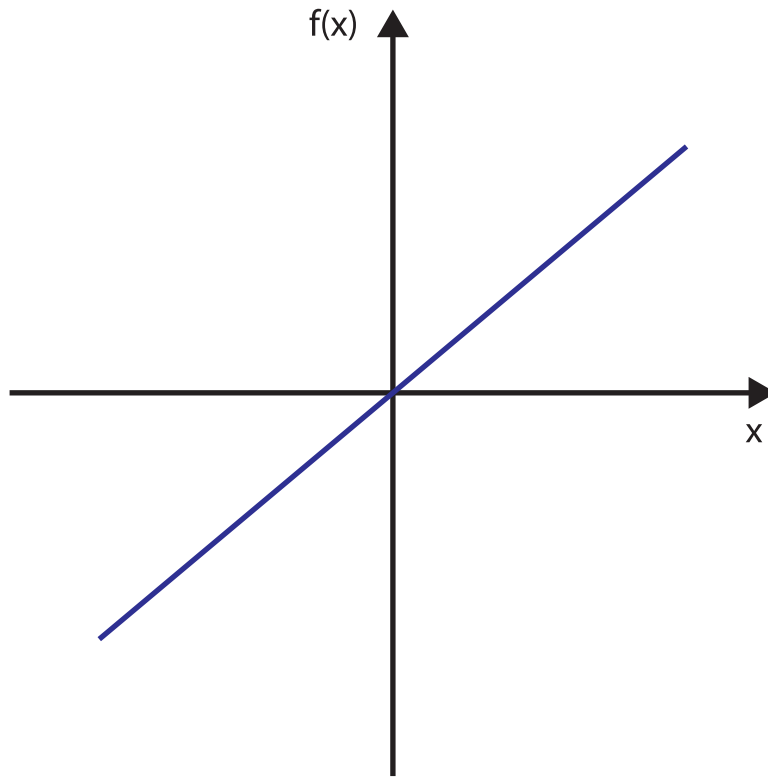
Základním prvkem každé neuronové sítě je neuron, který zvoleným způsobem zpracovává vstupní údaje.



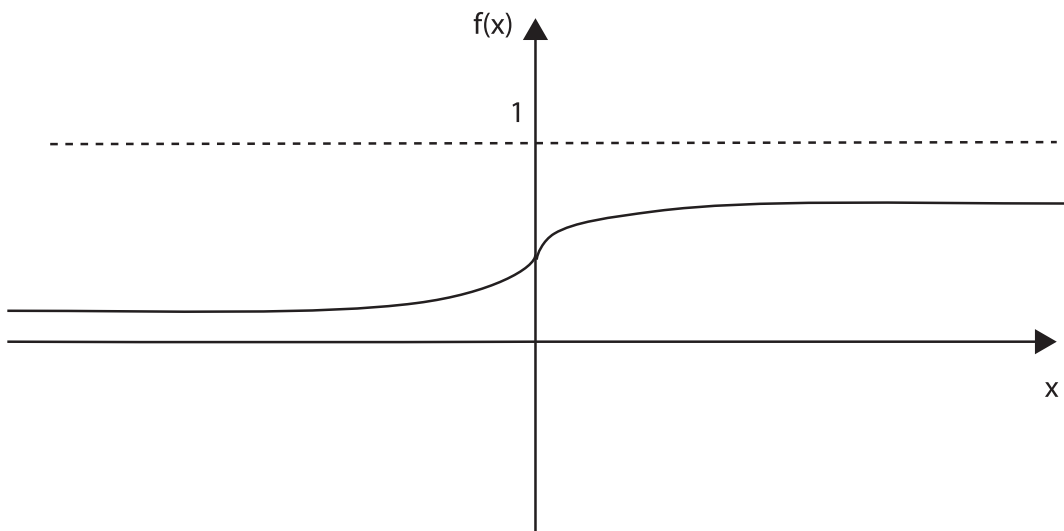
Obr. 7.2: Neuron

Podle druhu vstupních dat jsou pak obvykle rozlišovány na binární a spojitě (diskretizované v realizaci). Výraz spojitý naznačuje filozofii zpracování signálů.

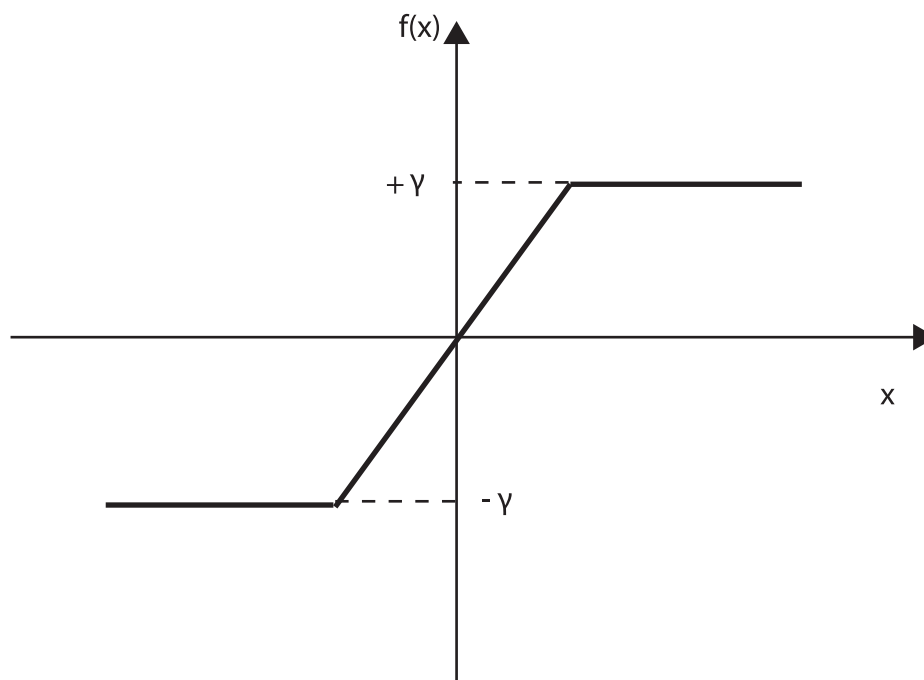
Důležitým pojmem v oblasti Neuronových sítí je tzv. Přenosová funkce, která převádí vnitřní potenciál neuronu do oboru výstupních hodnot. Nejčastější jsou následující:



Obr. 7.3: Lineární přenosová funkce



Obr. 7.4: Sigmoida – přenosová funkce



Obr. 7.5: Omezená funkce

Neuronové sítě pracují v zásadě ve dvou fázích a to učící (adaptivní) a aktivní (vybavující).

Při učení dochází v NS ke změnám, které adaptují síť na řešení daného problému. Učení se realizuje nastavováním vah mezi uzly, což je realizováno přiřazením počátečních hodnot a to buď náhodných, nebo podle nějakého obdobného řešeného případu. Následně se do sítě přivádí trénovací vstup.

Učení se dále dělí na: s učitelem a bez učitele.

Při učení s učitelem se NS učí srovnáváním aktuálního vstupu s výstupem požadovaným a to tak, že jsou „adaptačně“ nastavovány váhy směrem k největší shodě. Snižování rozdílu se řídí učícím algoritmem.

Učení bez učitele naproti tomu nemá konkrétní kritérium správnosti. Učení probíhá tak, že algoritmus hledá ve vstupních datech vzorky se společnými vlastnostmi. Tomuto učení se říká také samoorganizace.

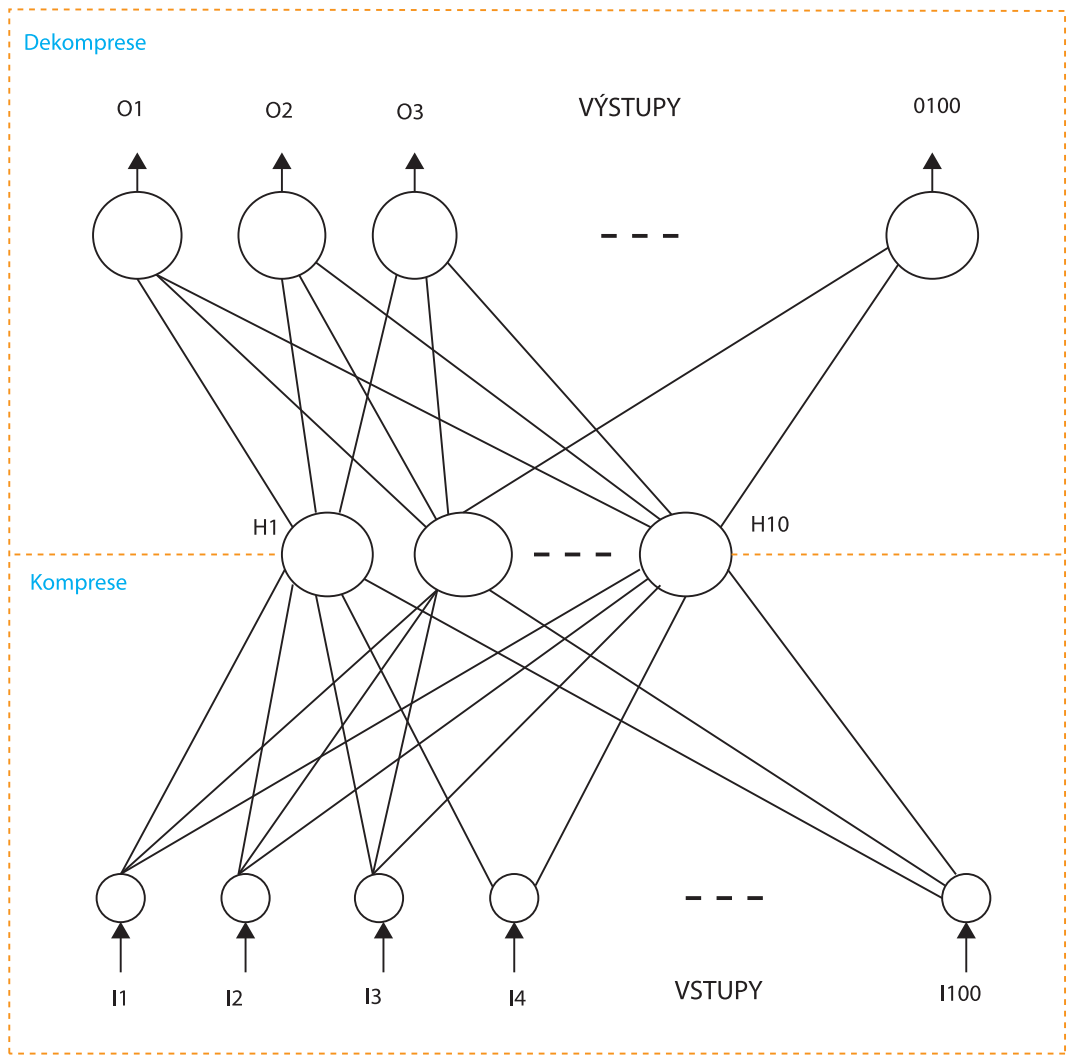
Při aktivní fázi (vybavování) vznikne na základě vstupu dat ve výstupní vrstvě nerovnovážený stav. V neuronech zapamatované hodnoty se začnou působením ostatních neuronů měnit, dokud nenastane stabilní rovnovážný stav.

7.3 Umělé neuronové sítě

I jediný neuron realizuje poměrně složité funkce. Obvykle se nazývá perceptron a je například schopen vyhodnotit systémové vstupy a rozpoznat příznaky poruchy nebo jednotlivé znaky v textu nebo jednoduché prvky obrazu apod. viz předchozí. Složitější funkce lze ale realizovat neuronovými sítěmi. Obvykle jsou zapojeny do vrstev a rozlišuje se vstupní a výstupní vrstva a jedna nebo více skrytých vrstev. U dopředných sítí tok signálů důsledně postupuje od vstupní vrstvy k výstupní. Existují i sítě (rekurentní, Hopfieldovy sítě), kde se signál šíří i opačným směrem, podobně, jako u sekvenčních logických funkcí.

Neuronové sítě se často používají ke klasifikaci jevů a jejich třídění do skupin, zpracovávání a rozpoznávání obrazů a jiných jevů (např. při řešení diagnostiky), při vytváření modelů a při předvídání či odhadování vývoje. Obecně platí, že neuronové sítě jsou vhodné k řešení problémů, jejich podstatu neznáme, dostatečně nechápeme a nejsme schopni je vyhovujícím způsobem popsat. Proces učení neuronové sítě je komplikovaný. Používají se i jiné, než jmenované způsoby učení. Poměrně účinné je využití genetických algoritmů.

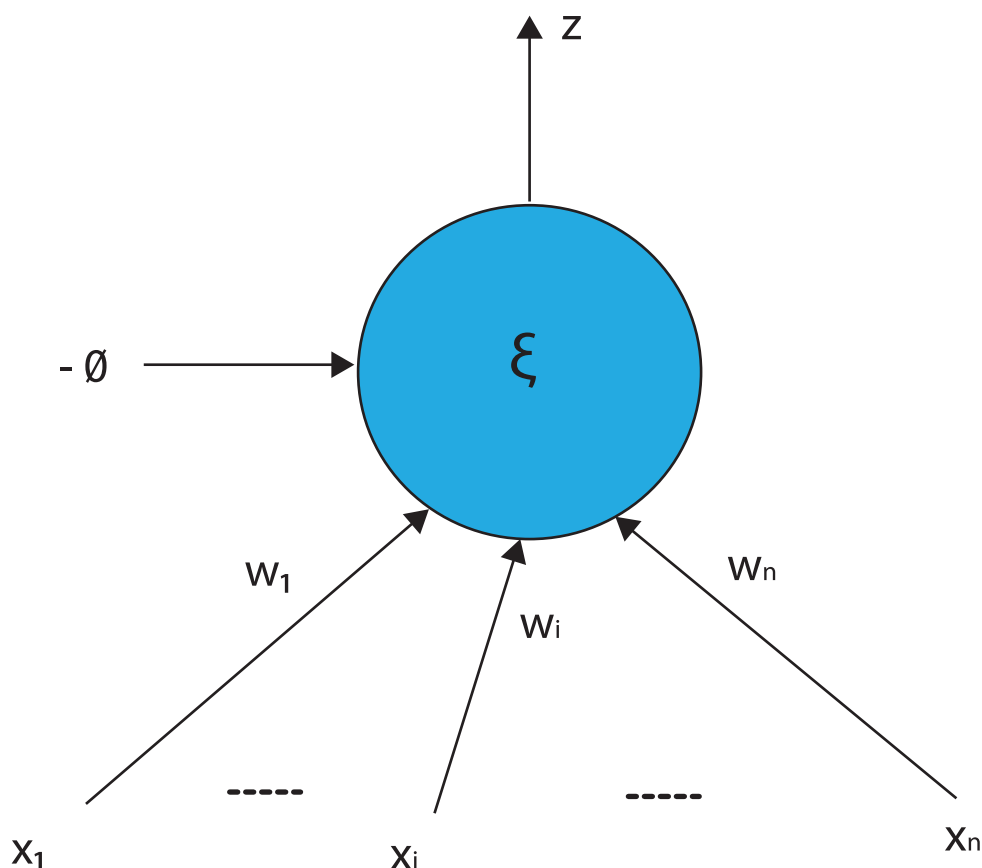
Samotná realizace programu pro neuronovou síť není příliš náročným problémem – v podstatě se jedná o součet součinů a nepříliš komplikovanou nelineární funkci. Lze ji realizovat i programem PLC. Náročnějším problémem je učení sítě – nejenom z pohledu numerické náročnosti algoritmu učení, ale i z pohledu nároků na kvalifikaci a zkušenosti řešitele. Proto se často používají již hotové a ověřené programy, např. specializované nástroje univerzálních výpočetních systémů (Matlab, Mathematica) nebo specializované prostředky pro realizaci a učení neuronových sítí.



Obr. 7.6: Neuronová síť pro kompresi dat

7.4 Perceptron

Nejdříve uvedeme nejjednodušší model sestávající z jediného neuronu – obvykle mluvíme o perceptronu. Do neuronu se sbíhá n spojů, které reprezentují buď výstupy jiných neuronů, nebo podněty z vnějšího okolí. Po každém z těchto vstupů – stimulů, řekněme i -tém, přichází v daném časovém okamžiku informace x_i , ve formě reálného čísla. Jde o číselně vyjádřené hodnoty nějakých příznaků, máme-li na mysli vstupní informaci z okolního světa – vstupního prostoru – bude celý vektor $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]$ charakterizovat jistý zkoumaný objekt. Za příznaky mohou sloužit údaje o teplotě, tlaku, barvě, booleovské hodnoty aj.



Obr. 7.7: Schéma neuronu s váhami jednotlivých spojů

Každý spoj vedoucí do neuronu je charakterizován dalším reálným číslem w_i , které udává tzv. synaptickou váhu spoje (důležitost), a každý neuron prahem θ . Vážený součet $\xi = \sum w_i x_i - \theta$ ($i = 1, \dots, n$) udává celkový podnět, tzv. potenciál neuronu. Na tento shromážděný potenciál reaguje neuron výstupní odezvou $z = S(\xi)$, kde S je předepsaná nelineární přenosová funkce, obvykle tvaru sigmoidy (monotónně rostoucí mezi dvěma asymptotickými hodnotami, např. 0 a 1, s největší derivací v bodě 0).

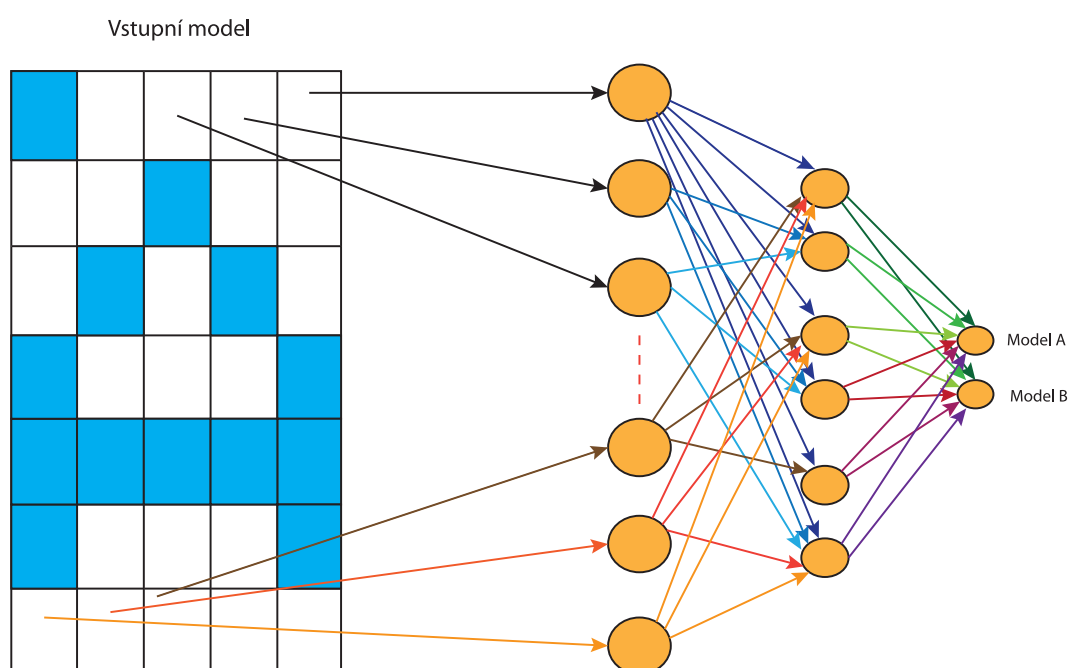
Sítě s mnoha neurony lze dělit podle různých hledisek, zde přijmeme dvě. Jedno je dáno topologií sítě, druhé způsobem práce. Podle prvního hlediska rozeznáváme sítě rekurentní (jejich graf je cyklický, tj. výstupy některých neuronů se vrací jako stimuly zpět do sítě) a ostatní, z nichž nejdůležitější jsou vrstvené

sítě s neurony rozdělenými do vrstev, přičemž výstupy neuronů jedné vrstvy slouží jako vstupy všech neuronů nejbližší „vyšší“ vrstvy a jiné propojení mezi neurony sítě není.



Perceptronové paradigma

Koncept perceptronu je dílem F. Rosenblatta z roku 1958. Ten se inspiroval lidským okem a chtěl vytvořit model jeho fungování. Vyšel ze zjištění fyziologů, že sítnice obsahuje světlocitlivá čidla uspořádaná do matice. Jejich výstupy vedou do specializovaných buněk, tzv. démonů, geneticky předurčených ke schopnosti rozpoznávat jisté typy vzorů. Výstupy démonů se dále zpracovávají v buňkách s prahovým chováním, takže jejich výstup je aktivní až od určité úrovně vstupního vzruchu.



Obr. 7.8: Rozpoznávání s pomocí perceptronu

Perceptronová síť je podle fyziologického vzoru také třívrstvá. Vstupní vrstva funguje jako vrstva vyrovnávací, nebo chcete-li, rozvětvovací. Jejím úkolem je mapování dvourozměrného pole čidel na jednorozměrný vektor procesorových elementů. Tuto druhou vrstvu tvoří detektory příznaků. Každý z nich je náhodně spojen s prvky vrstvy vstupní. Váhy ke vstupům přiřazené jsou konstantní. Úkolem démonů je detekce specifických příznaků. Poslední, třetí vrstva obsahuje rozpoznávače vzorů (pattern recognizers, nebo-li perceptrons). Zatímco jsou váhy ve vstupní a druhé vrstvě pevné, lze váhy na vstupech vrstvy výstupní při trénování nastavovat. K učení sítě perceptronů navrhl Rosenblatt tzv. perceptronový učicí algoritmus.

Vlastní elementy se liší podle vrstev. Principiální schéma ukazuje obrázek. Ty v perceptronové vrstvě mají jeden vstup (práh) připojený pevně ke konstantě 1. Ostatní vstupy jsou náhodně připojeny k výstupům démonů střední vrstvy a jejich váhy jsou nastavitelné. Přenosová charakteristika procesorového elementu

perceptronově vrstvy je následující: výstup je nulový, je-li vážený součet všech jeho vstupů nulový nebo záporný. V opačném případě je výstup roven jedné. Někdy se používá jiná nelineární přenosová funkce. V tom případě je při záporné nebo nulové hodnotě váženého součtu vstupů výstup roven -1, při kladné hodnotě je výstup + 1.

Učící algoritmus perceptronu: Váhy se nastaví náhodně, Je-li výstup správný, váhy se nemění, Má-li být výstup roven 1, ale je 0, inkrementuj váhy na aktivních vstupech, Má-li být výstup roven 0, ale je 1, dekrementuj váhy na aktivních vstupech.

Vstupy jsou přitom aktivní tehdy, když je jejich hodnota > 0 . Velikost změny vah závisí na konkrétně zvolené ze tří možných variant:

- Při inkrementaci i dekrementaci se aplikují pevné přírůstky.
- Přírůstky se mění v závislosti na velikosti chyby. Je výhodné, jsou-li při větší chybě větší a naopak. Takto dosažené zrychlení konvergence však může mít za následek nestabilitu učení.
- Proměnné a pevné přírůstky se kombinují v závislosti na velikosti chyby.

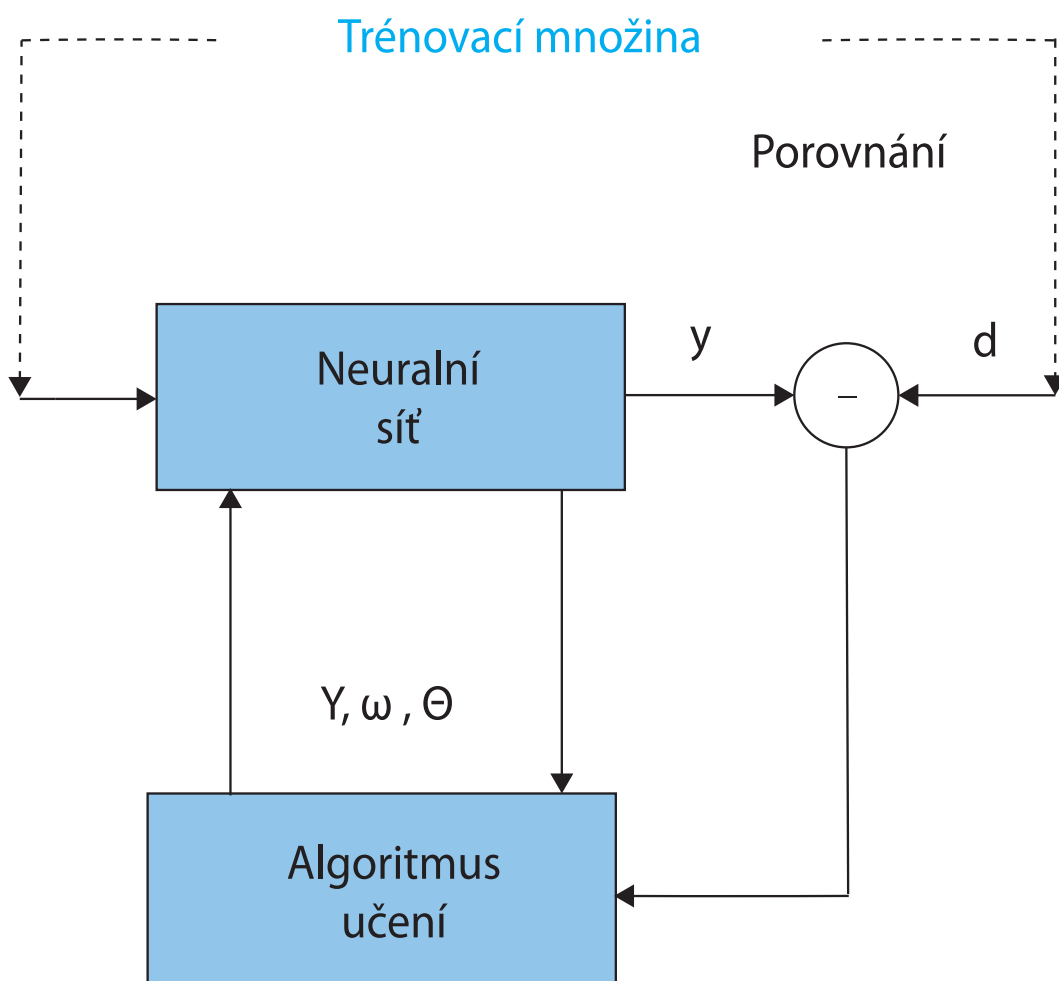
Kromě klasického perceptronu, který jsme právě popsali, se při studiu literatury můžete setkat ještě s perceptronem podle Minskyho a Paperta (s tzv. MP-perceptronem) a s prvkem Adaline [Madaline] podle Widrowa.

7.5 Algoritmus zpětného šíření (Back-propagation)

Jedním z nejužívanějších algoritmů pro učení neuronových sítí je algoritmus zpětného šíření (Back propagation). Tento algoritmus odstartoval, po téměř dvacetileté odmlce, novou vlnu rozvoje tohoto vědního oboru.

Tento algoritmus je vhodný pro učení vrstevnatých sítí se vstřícným šířením. Učení probíhá metodou učení s učitelem. Podle způsobu, jakým se vypočítávají, je algoritmus iterační. Energetickou funkci minimalizuje na základě gradientu. Proto se také zařazuje mezi gradientní metody učení.

Princip algoritmu zpětného šíření je podobný běžným učebním metodám používaným ve škole. Když se zjistí nedostatky v látce, musí se doučit. Podobně to funguje i v tomto algoritmu. Neuronovou síť je možno považovat za žáka, zkoušení je možno považovat za mechanismus, ve kterém testujeme, zdali neuronová síť, odpovídá na vstupní vektory přesně podle trénovací množiny. Trénovací množinu považujeme za látku, kterou se má žák naučit. Když zjistíme, že síť nereaguje, jak je potřeba, musíme jí měnit váhové koeficienty tak dlouho, dokud nezačne reagovat správně.



Obr. 7.9: Grafické znázornění učení neuronové sítě

Back-propagation je iterační proces, ve kterém se postupně dostáváme z počátečního stavu do stavu úplného naučení.

Výběr vah z trénovací množiny nemusí být jen sekvenční, často se používá např. náhodný výběr. Volba strategie není pevně dána a spíše patří do kategorie „umění učit“ neuronové sítě. V průběhu učení můžeme určité vzory předkládat častěji k učení, jiné zase méně často atp. Vhodnou strategií můžeme značně ovlivnit rychlost a úspěšnost učení. Globální chybou je v algoritmu míněna např. střední kvadratická odchylka, počítaná přes všechny vzory trénovací množiny. Tato chyba vypovídá o míře naučenosti sítě. Kritérium je mez, při které je proces učení zastaven. Algoritmus zpětného šíření je založen na minimalizaci energie neuronové sítě. Energie je mírou naučenosti, tedy odchylky mezi skutečnými a požadovanými hodnotami výstupů neuronové sítě pro danou trénovací množinu. Je to v podstatě totéž, co globální chyba, ale pro výpočet globální chyby se spíše používají statistická kritéria.

Pro neuronovou síť typu Back-propagation je energetická funkce definována následovně:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - d_i)^2$$

kde n počet výstupů sítě, y_i je i -tý výstup a d_i je i -ty požadovaný výstup. Tato funkce není nic jiného než součet druhých mocnin odchylek. Na učící algoritmus zpětného šíření je nutné se dívat jako na optimalizační metodu, která je schopna pro danou neuronovou síť a trénovací množinu nalézt váhové koeficienty a prahy.

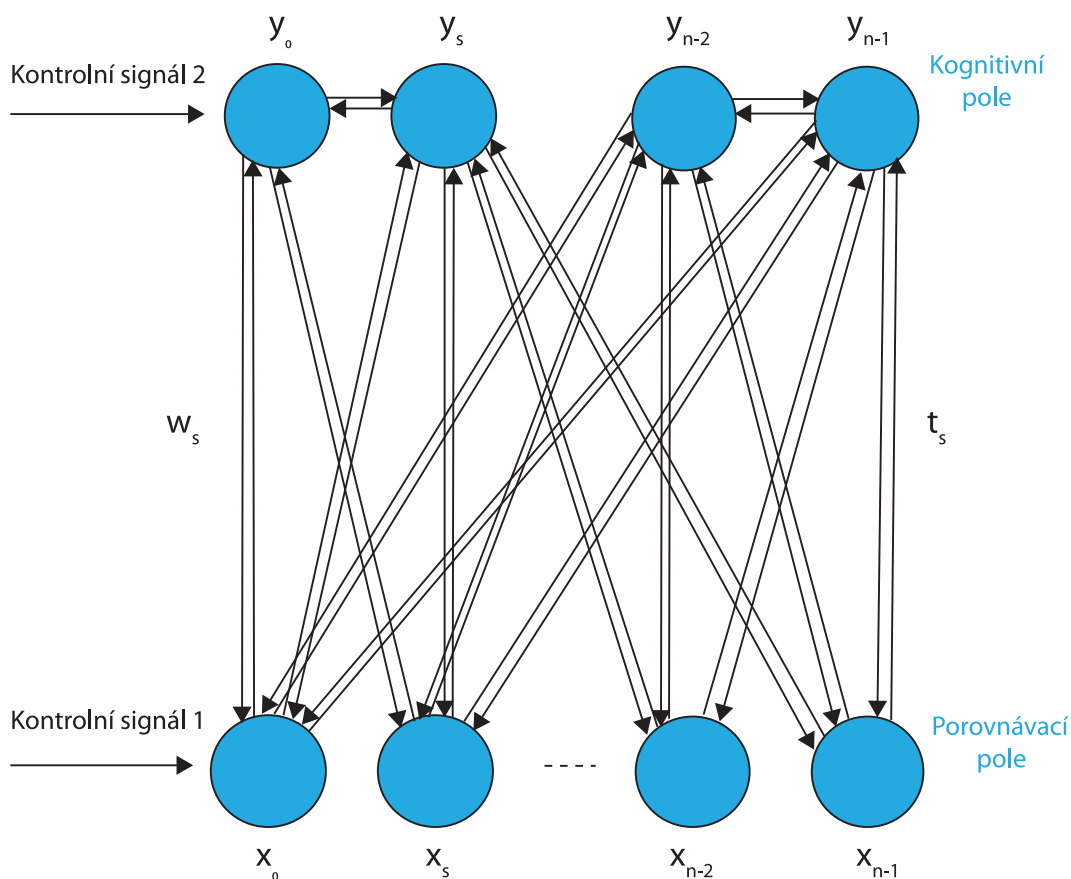
Kohonenova síť je tzv. Samoorganizující tzn. nepotřebuje k trénování učitele. Základním principem jejich funkce je shluková analýza, tj. schopnost algoritmu, sítě, nalézt určité vlastnosti a závislosti přímo v předkládaných trénovacích datech bez přítomnosti nějaké vnější informace, jako je tomu např. u perceptronovské sítě.

7.6 Hopfieldova síť

Hopfieldova síť se skládá z tolika neuronů, kolik má vstupů. Každý neuron je napojen na vstup sítě pouze jediným svým vstupem. Výstup každého neuronu je veden zpět na vstupy ostatních neuronů přes váhy. Hopfieldova síť může být použita buď jako asociativní paměť, klasifikátor nebo k řešení optimalizačních problémů. Učení pobíhá ve dvou krocích: Krok 1. Nastavení vah podle vstupních vzorů, Krok 2. Opakování učícího procesu. Poté, co jsou všechny obrazce naučeny, tj. zakódovány ve váhové matici, lze přejít k fázi vybavování.

7.7 ART síť

Řeší tzv. „problém proměnné stability“ – síť není schopna naučit se novou informaci bez poškození již dříve uložené informace. Tuto síť rozpracoval matematik a neurobiolog Dr. S. Grossberg. Adaptivní rezonanční teorie (ART) byla vyvinuta pro modelování mohutné paralelní architektury pro samoučící se síť k rozpoznávání obrazců. Vlastností ART sítě je schopnost přepínat mezi tvárným a stabilním módem, aniž by došlo k poškození naučené informace. Tvárným módem rozumíme učící stav, kdy počáteční parametry mohou být modifikovány. Stabilní mód je stav, kdy je síť již pevně nastavena a chová se jako hotový klasifikátor.



Obr. 7.10: Architektura ART sítě

7.8 Aplikace

Neuronové sítě se uplatňují především tam, kde klasické počítače selhávají. Jde o úlohy, kde není znám algoritmus nebo je analytický popis pro počítačové zpracování příliš komplikovaný. Zejména se uplatní tam, kde jsou k dispozici rozsáhlé soubory příkladových dat, pokrývajících dostatečně celou oblast problému. V literatuře jsou popsány tyto základní aplikace neuronových sítí: Ekonomické informační systémy, Technologie a výroba, Zdravotnictví, Meteorologie.

Umělé neuronové sítě mají některé výhodné vlastnosti. Jsou schopné realizovat nad vstupními daty libovolnou transformaci, jsou tedy univerzální. Neuropočítač postavený na bázi neuronové sítě tedy není zapotřebí programovat, protože se správnému chování naučí pomocí předkládaných příkladů. Neuronové sítě jsou díky velkému množství neuronů a spojů (synapsí) a díky tomu, že informace je v celé síti rozprostřena, robustní. Mají schopnost zobecnění (generalizace), schopnost abstrakce, tj. schopnost stejně reagovat na jistou množinu vstupních dat, nikoli jen na prvky z této množiny.

7.9 Kontrolní test

1. Zkuste definovat oblasti použití fuzzy logiky v aplikační praxi.
2. Popište typický pracovní postup fuzzy systému.
3. Vymyslete příklad z praxe, kde by se dal kombinovat fuzzy systém, s klasickým řízením s PLC (smíšený systém).
4. Popište návrh fuzzy systému od definice až po zajištění funkčnosti.

8 Číslicové systémy

8.1 Úvod

Používání číslicových systémů zpracování dat je umožněno nebývalým rozvojem prostředků výpočetní techniky, především mikroprocesorů, mikrořadičů a s jejich využitím i osobních počítačů a dalších programovatelných systémů, především programovatelných automatů PLC. Číslicové systémy již téměř zcela z praxe vytlačily donedávna používané analogové systémy, ať již byly realizovány jako obvody s pasivními prvky nebo jako aktivní obvody s operačními zesilovači.

Číslicovou technikou lze rovnocenně realizovat všechny funkce analogových systémů (např. regulátorů, filtrů, modelů), ale i funkce, které byly pro analogové systémy nedostupné. Například systémy FIR (budou popsány dále), které nemají svou analogii v analogových systémech. Pro analogové systémy jsou nedostupné (ať již z principu nebo pro neúměrnou komplikovanost realizace) mnohé další funkce (např. nelineární filtry, statistické operace, identifikace a optimalizace).

Číslicové systémy se uplatňují v různých oborech a realizují různé funkce. Jejich struktura a způsob realizace jsou prakticky stejné. Odlišná je jen metodika návrhu a požadavky na strukturu a parametry systému. Například od regulátoru je požadována stabilita a předepsaná kvalita regulačního procesu. Od číslicového (diskrétního) modelu vyžadujeme maximální shodu v chování modelu a jeho vzoru.

8.2 Číslicové filtry

U číslicových filtrů obvykle požadujeme, aby předepsaným způsobem ovlivňovaly frekvenční složení přiváděného signálu, např. se chovaly jako dolní propust, propouštěly nízké frekvence z předepsaného pásma a potlačovaly vyšší frekvence. Prakticky stejnou strukturou, jen s jinými parametry (koeficienty ve vazbách systémů FIR nebo IIR) lze realizovat funkci horní propusti nebo pásmové propusti. V některých aplikacích číslicových filtrů není kladen důraz na filtrování frekvencí, ale na ovlivnění tvaru časového průběhu upravované veličiny, např. aby potlačovaly šum nebo krátkodobé rušivé impulsy. Při číslicovém zpracování obrazů se používají dvojrozměrné filtry. Jejich účelem, bývá nejenom potlačení šumu, ale i zvětšení či potlačení kontrastu, zvýraznění obrysů apod. Návrh číslicových filtrů tvoří s DFT a spektrální analýzou základ číslicového zpracování signálů. Popisují se přenosem, frekvenční charakteristikou, impulsní odezvou a diferenční rovnicí. Jsou to algoritmy nebo obvody, měnící spektrum vstupního diskrétního signálu. V reálném čase musí filtr mezi dvěma vzorky provést výpočet konvoluce (filtr FIR). Číslicové filtry navazují na pasivní a aktivní analogové filtry a lze je navrhovat buď přímo (FIR), nebo převedením analogového prototypu (IIR).

Filtry se dělí podle impulsní odezvy na:

- filtry s konečnou impulsní odezvou – FIR
- filtry s nekonečnou impulsní odezvou – IIR

A podle struktury blokového schématu na:

- nerekurzivní filtry NRDF (nemají zpětnou vazbu)
- rekurzivní filtry (zpětná vazba) většinou IIR filtry

LTI

Lineární časově invariantní systémy (linear time invariant systems).

Je-li $x(t)$ vstupní signál a $y(t)$ výstupní signál, je výstupní signál určitou transformací vstupního signálu, takže $y(t) = T\{x(t)\}$.

Časová invariantnost znamená, že systém odpovídá na určitý vstupní signál $x(t)$ stále stejným výstupním signálem $y(t)$. Pokud budíme vstup systému signálem $x(t)$ posunutým v čase, $x(t-t_0)$, potom systém odpoví odezvou $y(t)$ stejně posunutou v čase, $y(t-t_0)$.

Lineární systém je takový, který na k -násobek vstupního signálu $kx(t)$, odpovídá k -násobkem výstupního signálu $ky(t)$ a na sumu vstupních signálů $\sum_i k_i \cdot x_i(t)$

odpovídá sumou odezev $\sum_i k_i \cdot y_i(t)$.

Tyto vlastnosti jsou velmi důležité, protože umožňují zjednodušit, některé matematické operace, ale také vlastní pochopení systému. „Digitální variantou“ LTI jsou tzv. DLT (discrete LTI). V číslicových systémech na místo s analogovými signály pracujeme s číselnými posloupnostmi. Vstupní signál je představován číselnou posloupností $\{x(nT), n \text{ náleží } Z - \text{diskrétní stavový prostor}\}$, výstupní signál (odezva) číselnou posloupností $\{y(nT), n \text{ náleží } Z\}$. Zápis $x(nT)$ připomíná, že toto číslo může představovat velikost signálu v čase nT , kde T je perioda vzorků signálu. Pokud budeme uvažovat (vstupní) signál jen jako číselnou posloupnost bez bližšího vztahu k času, můžeme vzorky signálu zapisovat jen s indexem $n, x(n)$. Pro mnohé případy použití číslicového zpracování je časová složka významná (např. pro filtraci signálu), proto se budeme držet zápisu $x(nT)$.

Diskrétní lineární časově invariantní systém převádí vstupní signál (posloupnost) $\{x(nT)\}$ na výstupní posloupnost (signál) $\{y(nT)\}$, takže $\{y(nT)\} = T\{x(nT)\}$. Impulzní odezva číslicového systému je jeho odezva na jediný vstupní vzorek aplikovaný v čase $t=0$. Vstupní signál (posloupnost) je $\{x(nT) = 1 \text{ pro } n=0, x(nT) = 0 \text{ pro } n \neq 0\}$. Při určování impulzní odezvy číslicového systému předpokládáme, že před aplikací jednotkového impulzu je systém ustálen.

Pro lineární diskrétní časově invariantní systémy platí zákon superpozice – vstupní signál rozložíme na vhodné části, najdeme odezvy na jednotlivé části a odezvy složíme. Dostaneme tak odezvu na vstupní signál. Vstupní signál $\{x(nT)\}$ můžeme rozložit na soustavu jednotlivých vzorků, ty považujeme za impulzy velikosti $x(iT)$ umístěné v okamžicích $i \cdot T$. Odezva na takové impulzy je $x(iT)\{h(nT - iT)\}$. Celá výstupní posloupnost jako odezva na vstupní signál $\{x(nT)\}$ je pak sumou všech odezev, odezev pro všechna i .

8.3 FIR

Filtry s konečnou odezvou. Neobsahují zpětnou vazbu, jedná se o nerekurzivní (konvoluční) filtry. Přenos kauzálního (pouze kladné hodnoty n) filtruje dán vztahem

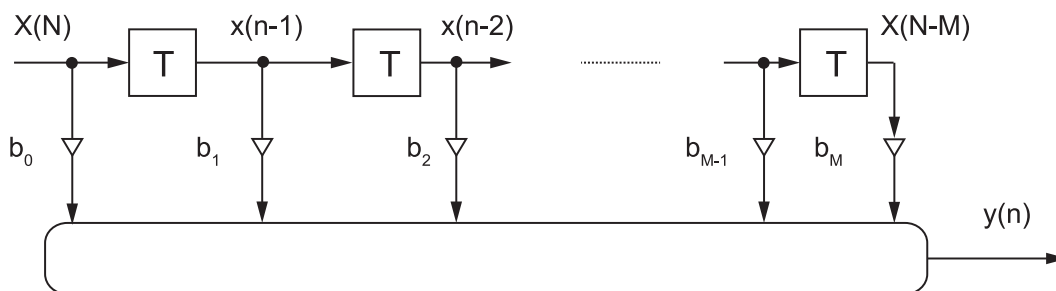
$$H(z) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M} = \sum_{n=0}^M b_n z^{-n}$$

a příslušná diferenciální rovnice

$$y(n) = b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + \dots + b_M x(n-M)$$

Filtry FIR jsou vždy stabilní.

Nejrozšířenější strukturou je transversální filtr. Je to zpoždovací linka s odbočkami pro násobičky. Filtr počítá vážený klouzavý průměr z $M+1$ posledních hodnot. Koeficienty násobiček jsou hodnotami impulzní odezvy – $b_n = h(n)$.

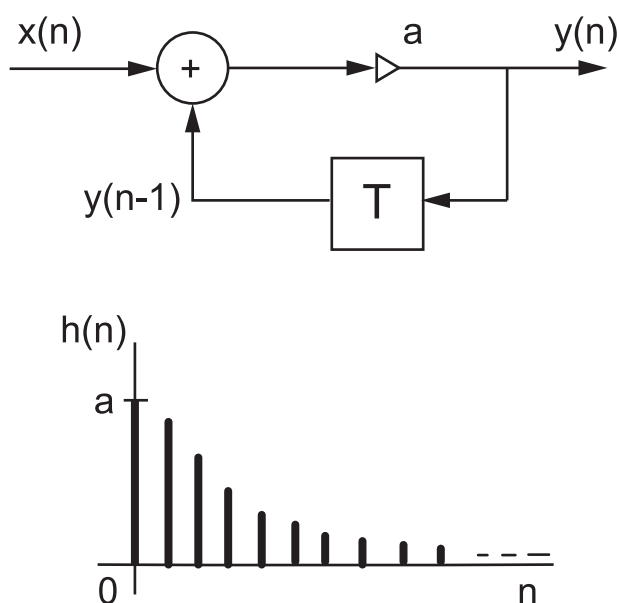


Obr. 8.1: Blokové schéma transversálního FIR filtru

Filtr zpožďuje signál o $\frac{M+1}{2}$ taktů a ustálí se po $M+1$ takttech.

8.4 IIR

Vyžadují alespoň jednu zpětnovazební smyčku, jsou to rekurzivní filtry. Přenos je tvořen podílem polynomů. Nuly přenosu realizují nerekurzivní část, póly rekurzivní část. Řád filtru je určen vyšším ze stupňů polynomu. Mají podstatně nižší řád než filtry FIR, takže reagují rychleji. Příklad jednoduchého filtru IIR je na dalším obrázku.



Obr. 8.2: Jednoduchý filtr IIR

Filtry lze dále dělit podle účelu:

1. Frekvenčně selektivní číslicové filtry

Jsou to dolní propust (DP) viz a), horní propust (HP) viz b) pásmová propust (PP) viz c) a pásmová zadrž (PZ) viz d).

Realizují se jako FIR nebo IIR filtry, mají-li mít lineární fázi, pak FIR filtry.

2. Diskrétní integrátor

Integrál se ve skutečnosti počítá algoritmy z diskretní matematiky např.
 $y(n) = y(n-1) + x(n)$

$$y(n) = y(n-1) + \frac{1}{2}[x(n) + x(n-1)]$$

3. Diskrétní derivátor

derivuje vstupní signál, důležitý pro určení zrychlení, nebo detekci hran v obrazech.

4. Klouzavý průměr (moving average MA)

počítá průměr z daného vzorku a M předchozích. Může být vážený se shodnými koeficienty $b_i = \frac{1}{M+1}$, (nevážený), nebo s exponenciálním zapomináním jako rekurzivní filtr s váhami koeficientů a-ci, kde c je přirozené číslo.

8.5 Aplikační oblasti

Každý z aplikačních oborů číslicových systémů „žije svým životem“, má svou tradici, terminologii a symboliku, rozvinutou teorii a metodiku návrhu i své specialisty ve výzkumu i v aplikacích. K vzájemnému setkávání různých oborů dochází jen příležitostně, např. při realizaci regulátoru s vnitřním modelem nebo při regulaci spolu s filtrováním a predikcí průběhu měřených hodnot regulované veličiny. Není možné, ani účelné, abychom zde seznamovali s detaily všech oborů číslicové techniky, s jejich teorií a aplikační praxí. Zaměříme se především na problematiku regulace a o ostatních oborech se zmíníme jen okrajově.

Nebudeme se detailně zabývat ani teorií regulace (teorií automatického řízení – TAŘ). Ta je obsažena ve specializovaných monografiích (mnohdy velmi obsáhlých). Zde se pokusíme o výklad, který se opírá o pochopení fyzikální podstaty, o technický cit a intuici řešitele. Tento přístup je oprávněný i s ohledem na skutečnost, že mnohé z teoreticky zdůvodněných metod jsou v praxi použitelné jen ve velmi omezené míře.

8.6 Numerická regulace

Regulace je zvláštním případem zpětnovazebního řízení. Řídicí systém R, který regulaci provádí (regulátor) vyhodnocuje skutečnou hodnotu řízené (regulované) veličiny (y), měřené na řízené soustavě S a porovnává ji s její žádanou hodnotou (w). Případný nesoulad je vyhodnocen jako regulační odchylka e (rovná rozdílu $e = w - y$), která je v regulátoru převedena na akční zásah – hodnotu akční veličiny u . Ten působí na řízenou soustavu s cílem nesoulad (odchylku) vykompenzovat nebo alespoň zmenšit. Řízenou (regulovanou) veličinou je nejčastěji teplota (ve vytápěné místnosti nebo v technologickém procesu), poloha či rychlost (pohybujících se částí mechanismu), výška hladiny, tlak, průtok, vlhkost. Cílem regulace je zajistit co možná nejpřesněji dodržení žádané hodnoty řízené veličiny nebo její předepsaný průběh v čase, a to s minimálními náklady, ztrátami a riziky. Regulaci lze považovat za trvalý proces kompenzace odchylek skutečné hodnoty od žádané. Jejich příčinou může být změna žádané hodnoty (např. změna požadavku na teplotu v místnosti podle přání obyvatele, podle časového programu nebo při rozpoznání příchodu či odchodu obyvatele místnosti).

8.7 Poruchy a kvalita regulace

Častěji je ale příčinou nesouladu působení různých poruch (poruchových veličin) na soustavu. Ty se obvykle jeví jako nahodilé, např. náhlá změna počasí, změna oslunění místnosti, otevření okna, průvan, zapnutí nebo vypnutí elektrických spotřebičů, příchod nebo odchod většího počtu osob, šum v signálu z teploměru nebo náhodné turbulence v jeho okolí. Jako nahodilé se jeví i vlivy, které sice mají svou zákonitost, ale pro regulátor nepostižitelnou (např. kolísání teploty nebo průtoku otopného či chladicího media).

Pro posouzení kvality regulace je důležitá nejenom ustálená hodnota řízené veličiny, ale i její průběh v čase, během regulačního procesu. Každá změna regulační odchylky způsobí přechodný děj, který se (teoreticky) ustaluje nekonečně dlouhou dobu. O kvalitě regulace rozhoduje i jeho průběh. Někdy je požadováno ustálení v co možná nejkratší době, i za cenu překmitu. Jindy je naopak požadován přechodný děj bez překmitů (aperiodický) i za cenu pozdějšího ustálení.

8.8 Stabilita a přechodové děje

Samozřejmým požadavkem je stabilita regulačního procesu. To znamená, že regulační proces skončí ustálením na požadované cílové hodnotě nebo v její dostatečné blízkosti (v tolerančním pásmu), případně kmitáním či náhodnými fluktuacemi v rámci tolerančního pásma. Nestabilní systém se projevuje nekontrolovaným nárůstem regulační odchylky (vzdalováním se od cíle) nebo kmity s narůstající amplitudou.

Příčinou přechodných dějů v regulačním procesu je dynamika soustavy, která „žije vlastním životem“. Nejčastěji se projevuje se jako setrvačnost, zpoždění, někdy jako kmitavost. Je způsobena schopností soustavy akumulovat energii nebo medium (např. teplo, vodu, elektrický náboj) nebo provádět přeměnu energie z jedné formy na jinou (např. statické na kinetickou u kyvadla, elektrického a magnetického pole u obvodů s induktory a kapacitory – cívkami a kondenzátory).

Příčinou dynamických jevů při regulaci může být i dopravní zpoždění – např., při transportu hmoty (uhlí na dopravním páse, vody nebo vzduchu v potrubí) nebo zpoždění při přenosu a zpracování informace (např. při šíření zvuku, pomalé komunikaci, dlouhém výpočtu nebo dlouhém intervalu vzorkování).

8.9 Statické systémy

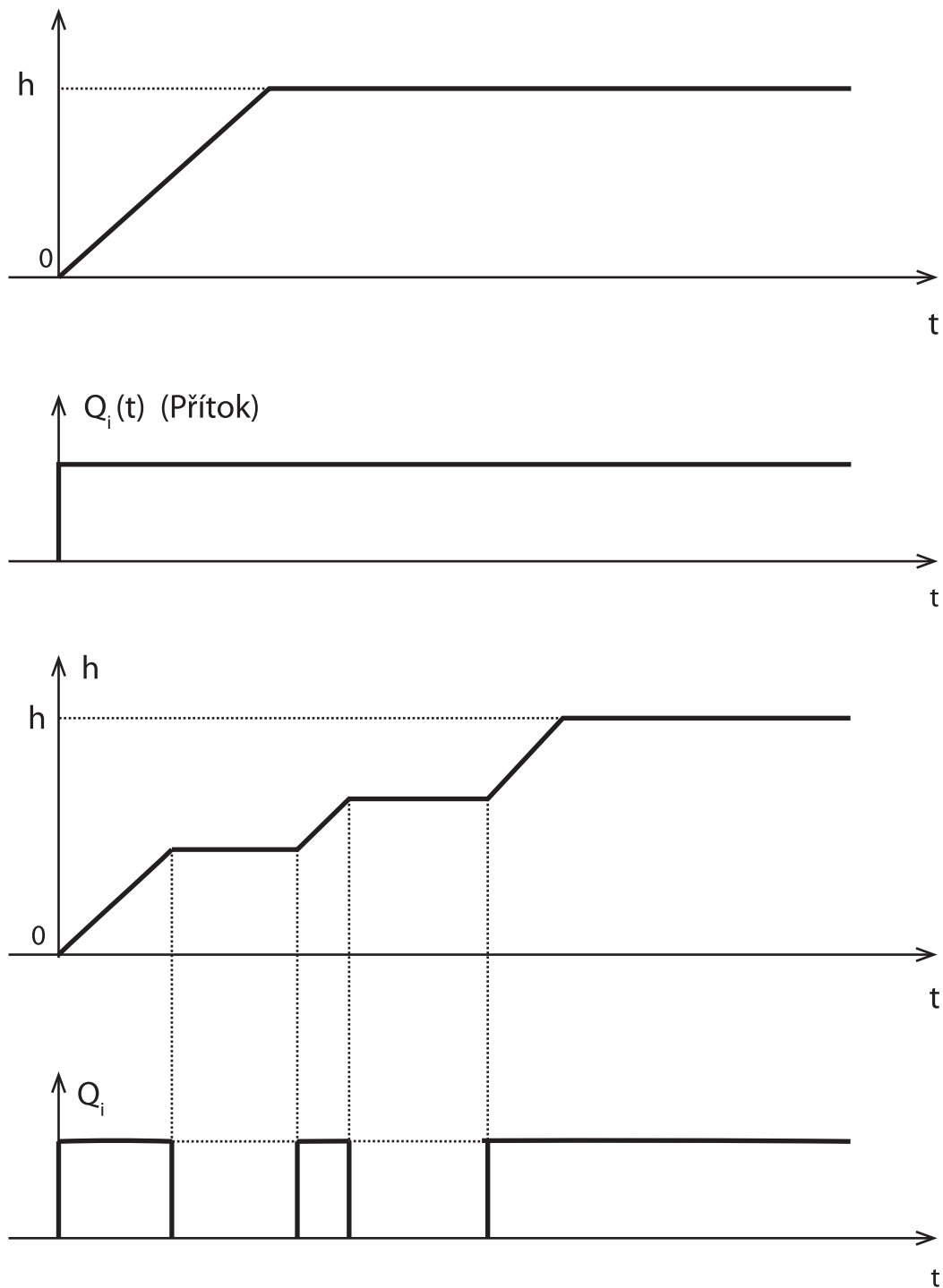
Některé soustavy zdánlivě nevykazují žádnou vlastní dynamiku. Nazývají se statické nebo soustavy bez dynamiky. Příkladem může být zesilovač nebo převodník. Při detailním posouzení ale zjistíme, že i tyto soustavy jsou dynamické a změny jsou i u nich provázány přechodovým dějem, který pro nás může být nepostřehnutelný (např. rozsvícení nebo zhasnutí žárovky, sepnutí vypínače nebo termostatu, vychýlení ručky přístroje, rozběh a zastavení elektromotorku nebo pneumatického pohonu).

Někdy je přechodový děj sice viditelný, ale pro daný účel není jeho dynamika důležitá a můžeme ji zanedbat. Například otevření a zavření ventilu na otopném tělese nebo ustálení údaje teploměru není významné při regulaci teploty, která je dostatečně pomalým dějem. Při logickém řízení manipulátoru nás obvykle zajímá posloupnost, rychlost a koncové polohy pohybů, ale dynamika rozběhu a zastavení pneumatického pohonu je bezvýznamná. Podobně při programování dílce na moderním obráběcím stroji nás jako uživatele stroje zajímá průběh a rychlost dráhy a věříme, že servopohony suportů jsou dostatečně kvalitní, že se nemusíme jejich dynamikou zabývat.

8.10 Popis soustavy

Uvažujme soustavu, tvořenou nádrží válcového tvaru, bez odtoku, pouze s přepadem u mezní výšky. Z přívodního potrubí ji plníme vodou ze zdroje (např. vodovodu), který má konstantní průtok, nezávislý na čase a výšce hladiny. Přívod nelze regulovat, jen skokem otevřít nebo zavřít.

Při spuštění přítoku (skokové změně vstupní veličiny na konstantní hodnotu) začne hladina v nádrži plynule stoupat, nezávisle na čase a na výšce hladiny. Výšku hladiny určuje jen objemový přítok vody a plocha dna nádrže. Rychlost vzestupu je tedy úměrná průtoku ze zdroje a je konstantní. Tento děj pokračuje až do naplnění nádrže, tedy k dosažení hrdla odtokového potrubí, kterým všechna přitékající voda začne vytékat a hladina se ustálí na konstantní výšce (za předpokladu, že odtokové potrubí je dostatečně dimenzováno a stačí odvést všechnu přitékající vodu). V chování soustavy, se tak uplatní nelinearita, spočívající v omezení (saturaci).



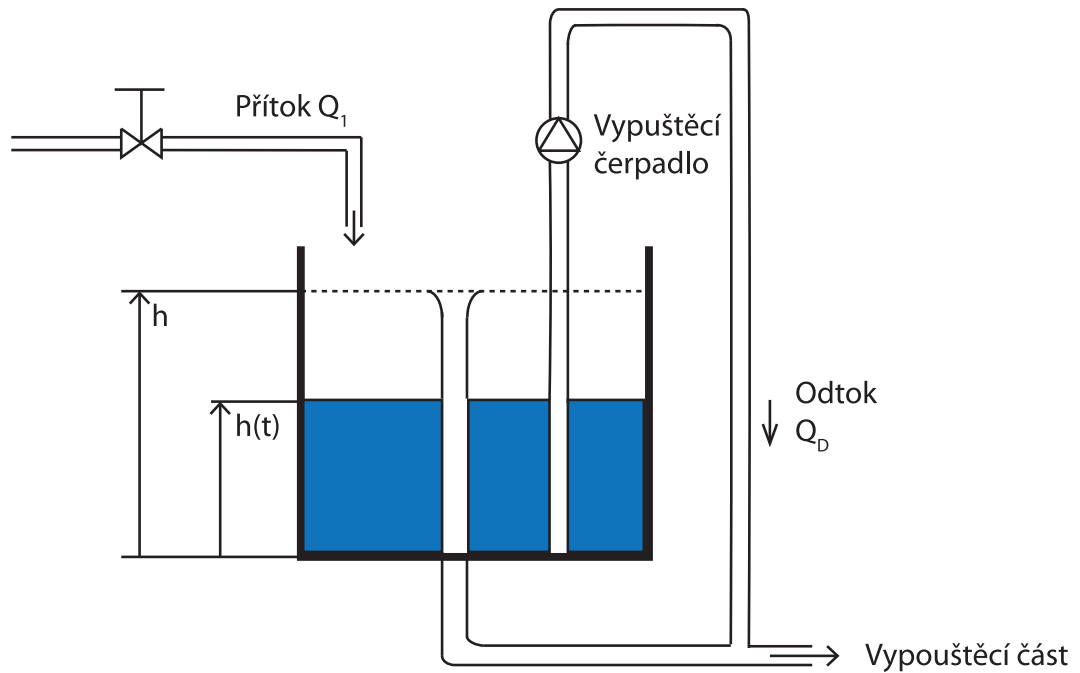
Obr. 8.3: Hydraulická soustava integračního charakteru (astatická) v procesu napouštění (s kladným znaménkem akční veličiny – schéma uspořádání)

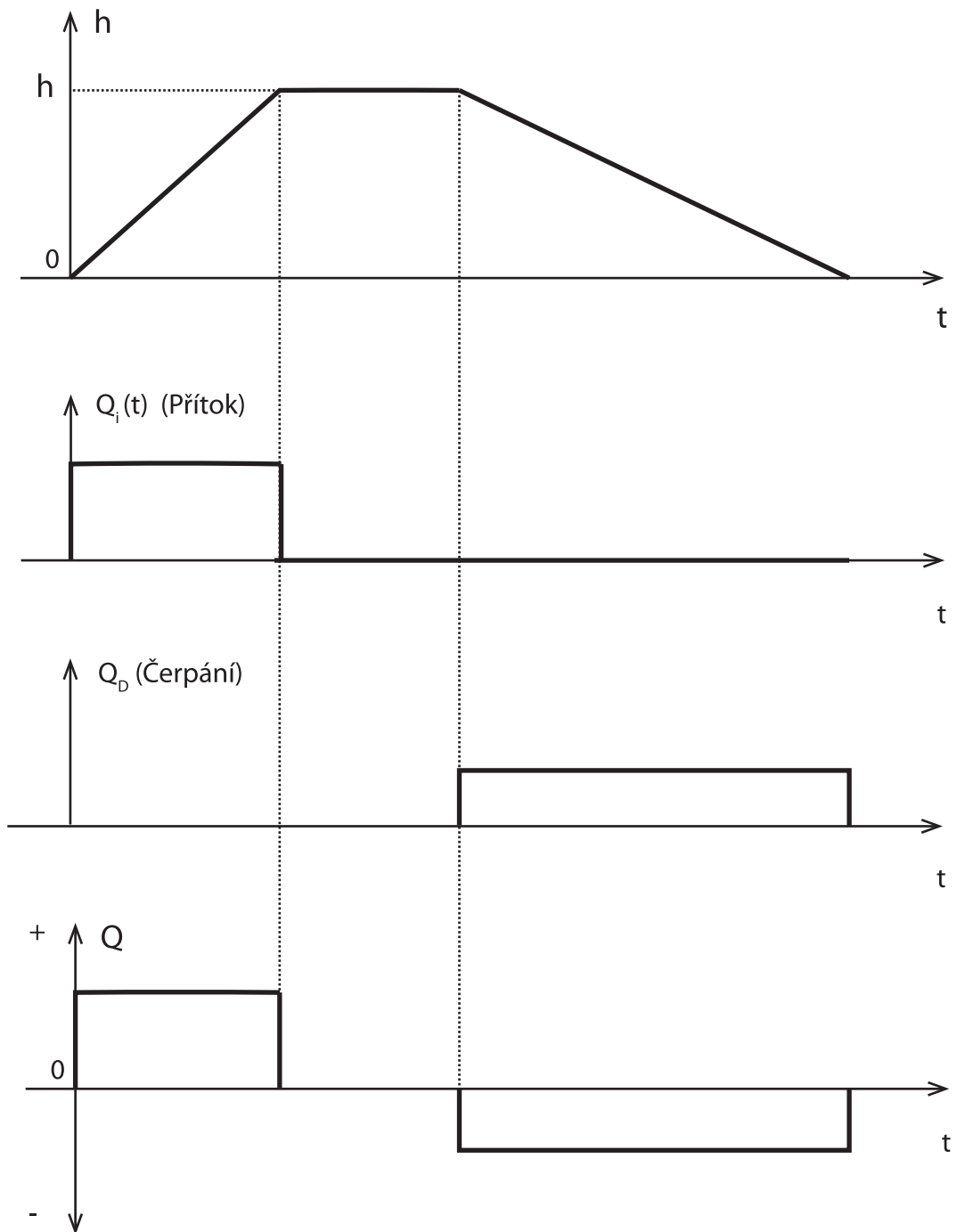


Termín „statická soustava“ je v regulační technice poněkud matoucí, protože se používá ve dvou významech. Prvnímu odpovídá soustava bez vlastní dynamiky, jejíž výstup okamžitě (bez zpoždění) reaguje na změny vstupní veličiny. Ve druhém významu odpovídá dynamickým soustavám, pro které se při skokové změně vstupní veličiny výstup rovněž ustálí na konstantní hodnotě, ovšem až po odeznění přechodového děje – takto pojmenovaná soustava je protikladem k termínu astatická soustava.

8.12 Modifikace soustavy

Nepříjemnou vlastností popsané soustavy je skutečnost, že hladinu již dosaženou nelze snížit (pokud pomineme odpařování, případně prosakování vody) – není dostupná akční veličina se záporným znaménkem. To znemožňuje regulaci výšky hladiny směrem dolů.





Obr. 8.4: Hydraulická soustava integračního charakteru (astatická) s možností napouštění a vypouštění, tedy s kladným a záporným znaménkem akční veličiny – schéma uspořádání

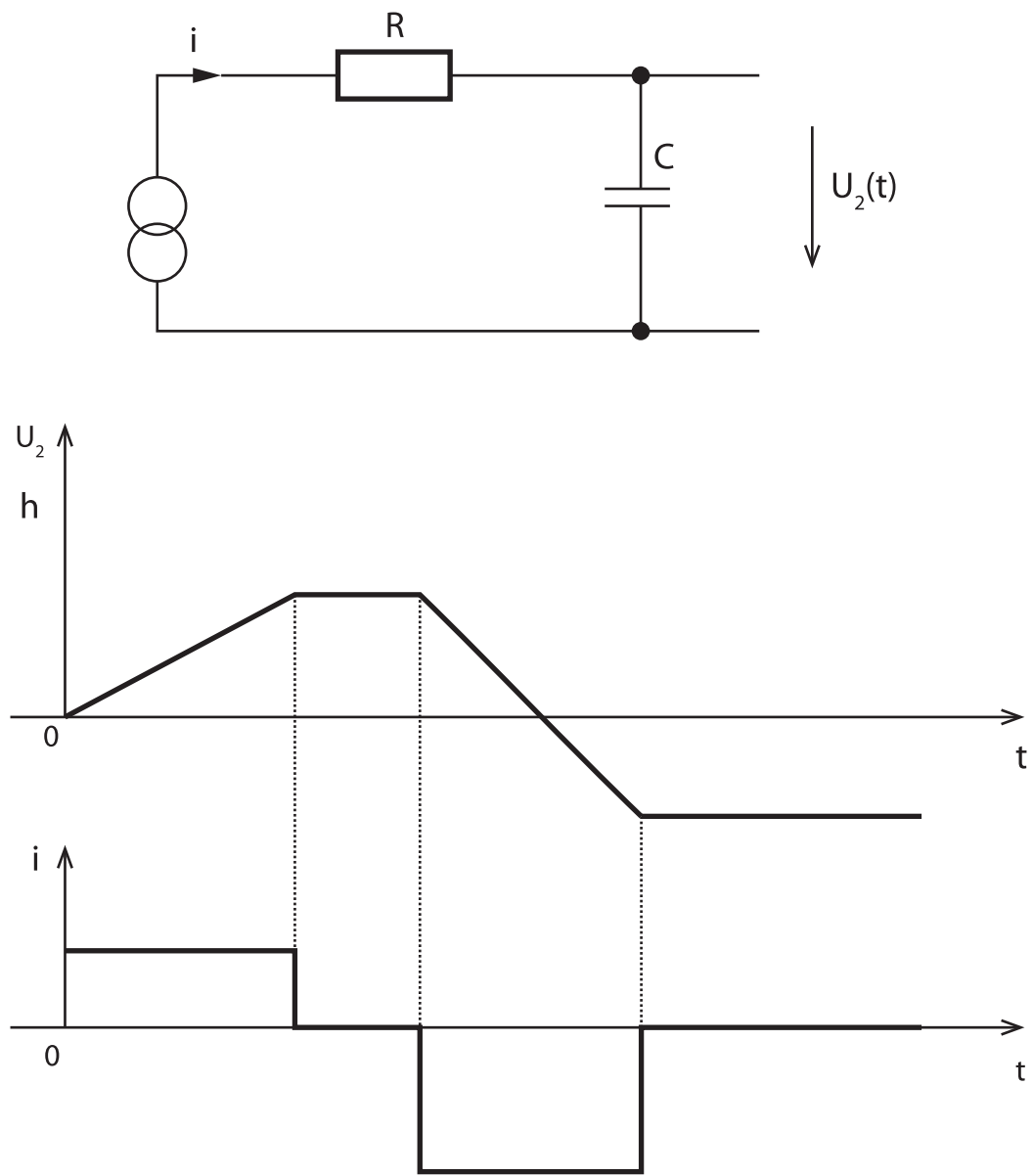
Uvažujme nyní soustavu z předchozího příkladu, doplněnou o čerpadlo, kterým lze vodu z nádrže odčerpávat. Jeho sací trubka je vyústěna u dna nádrže. Předpokládejme, že na přítoku i při odčerpávání je konstantní průtok, nezávislý na čase a výšce hladiny. Průtok při obou aktivitách může být odlišný. Přívod ani čerpání nelze spojitě regulovat, jen lze skokem otevřít nebo zavřít ventil na vstupu či spustit nebo zastavit čerpadlo (přechodný děj čerpadla neuvažujeme).

Při čerpání probíhá podobný proces, pouze s tím rozdílem, že hladina spojitě klesá, až do úrovně ústí sacího potrubí, kde se pokles zastaví – jedná se opět

o integrační (astatický) děj, pouze se záporným znaménkem vstupní veličiny (průtokem při čerpání). Pokud by průtok při napouštění a při čerpání byl shodný, byla by soustava v pracovní oblasti lineární s omezením (saturací) na obou stranách rozsahu (při vyprázdnění a naplnění nádrže). Pokud nelze zaručit shodný průtok při obou aktivitách, stává se soustava nelineární – jedná se o nesymetrickou soustavu s nespojitě proměnnou strukturou – s jinou integrační konstantou pro napouštění (kladnou vstupní veličinu) a pro vypouštění (zápornou vstupní veličinu).

8.13 Elektrické systémy

S astatickými (integračními) soustavami se setkáváme v mnoha oborech, např. v elektrotechnice a elektronice. Na obrázku je ukázán jednoduchý příklad elektrického obvodu, kde k integraci dochází nabíjením a vybíjením kapacitoru (kondenzátoru) ze zdroje konstantního proudu. Při nabíjení je kapacitoru plynuje dodáván elektrický náboj. Rychlost nabíjení je úměrná intenzitě proudu a nezávisí na čase ani na napětí na kapacitoru. Úměrně s růstem náboje narůstá i výstupní napětí u_2 . Při vybíjení se jedná o opačný proces ubývání náboje v kapacitoru. Pokud by hodnota proudu při nabíjení a vybíjení byla shodná, jednalo by se o lineární soustavu, pokud jsou obě hodnoty různé, je soustava opět nesymetrická, tedy nelineární. Teoreticky by napětí na kondenzátoru mohlo vystoupat až k nekonečné hodnotě. V praxi se ale opět uplatní nelinearita typu omezení (saturace), která není ze schématu patrná, ale vyplývá již ze samotného způsobu realizace napěťového zdroje. K omezení často dojde ještě dříve z bezpečnostních důvodů – přepětové ochrany.



Obr. 8.5: Příklad astatické soustavy v elektrotechnickém obvodu, při nabíjení kapacitou ze zdroje proudu

8.14 Tepelné a mechanické systémy

V tepelné technice se můžeme rovněž setkat s astatickými soustavami, které ovšem nejsou zcela ideální. Lze se jim přiblížit co možná nejlépe izolovaným prostorem s minimálními tepelnými ztrátami (polystyrenová krabice, termoska, experimentální místnost s dokonalou izolací) a s tepelným zdrojem o konstantním příkonu, nezávislém na rozdílu teplot (např. žárovka, topné těleso, ponorný vaříč, přímotopný spotřebič bez regulace a tepelných ochran, ale částečně i dutina mikrovlnné trouby).

V mechanice lze najít mnoho soustav, které mají astatický (integrační) charakter. Patří mezi ně všechny soustavy, kde vstupní veličinou je rychlost nebo úhlová rychlost a výstupem je poloha nebo úhlové natočení, např. vozidla, vlaky, suporty a otočné stoly obráběcích strojů, pohyblivé části pomocných a manipulačních mechanismů, výtahy, lanovky a jeřáby (natočení ramena, pohyb „kočky“ nebo délka odvinutého lana).

Astatické jsou i soustavy, jejichž vstupní veličinou je zrychlení a výstupem je rychlost pohybu. Pokud bychom ale u nich považovali za výstupní veličinu až polohu, jednalo by se o astatickou soustavu druhého řádu (s dvojitou integrací). Volný pád není u mechanických soustav obvyklým jevem, ale poměrně často se setkáváme s mechanismy, které se vyznačují rozjezdem a zastavením s konstantním zrychlením. Bývá realizován např. u výtahů, protože tento způsob rozjezdu cestující lépe snášejí. Rozjezd a zastavení s konstantním zrychlením vykazují i některé elektrické pohony, při určitém zjednodušení za něj můžeme považovat i rozjíždění automobilů a vlaků nebo startujících letadel a raket.



Připomeňme, že skokové změny na vstupu soustav (otevření a zavření ventilu, spuštění a zastavení čerpadla, dvě hodnoty proudu nebo napětí ze zdroje, skokový rozjezd nebo zastavení mechanismu předpokládáme pouze z důvodu výkladu a názorné ilustrace průběhu dějů, které v soustavě probíhají. Skokové změny (např. skok žádané polohy, impulz) používáme i v praxi (pokud jsou realizovatelné), když je třeba analyzovat chování soustavy, vytvořit její model a identifikovat parametry. Charakter soustavy (zde integrační) ale nezáleží na časovém průběhu vstupní veličiny. Kdybychom měli možnost (a motiv) měřit a zaznamenávat spojitě změny vstupních a výstupních veličin s dostatečnou přesností a číselně je vyhodnocovat, zjistili bychom stejné vlastnosti soustavy, jako při skokových změnách – jen časové grafy by byly složitější a méně názorné. Komplikovanější by byla i identifikace soustav. Například hladina v nádrži bude stále integrálem průtoku, i kdybychom uvažovali přechodový děj při otvírání a zavírání ventilu nebo rozběhu a zastavení čerpadla, i kdybychom spojitě měnili otevření ventilu s jakýmkoliv časovým průběhem.

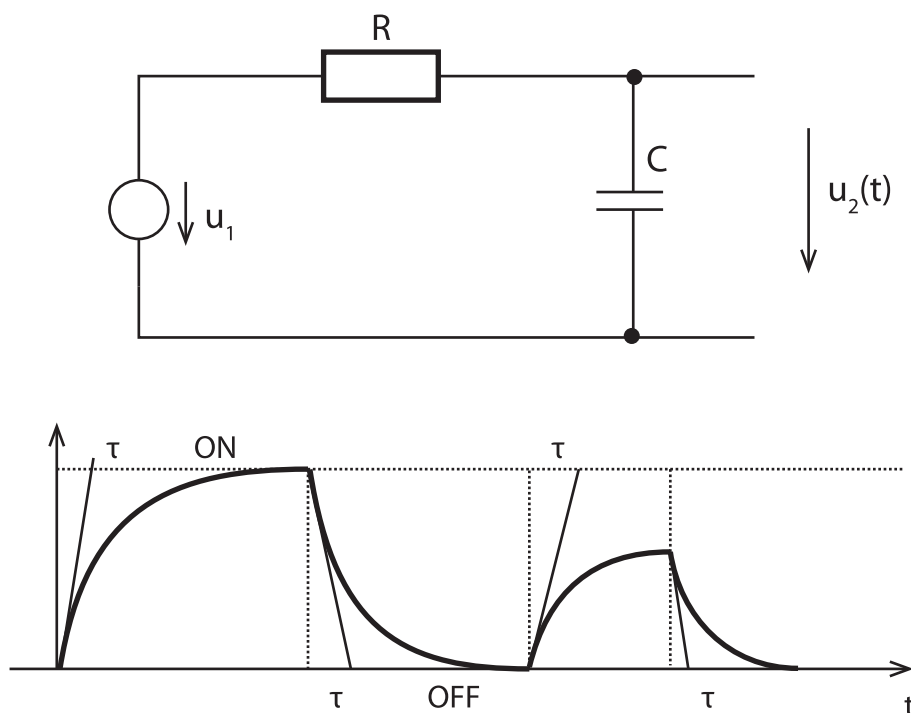
8.15 Nabíjení kapacitoru

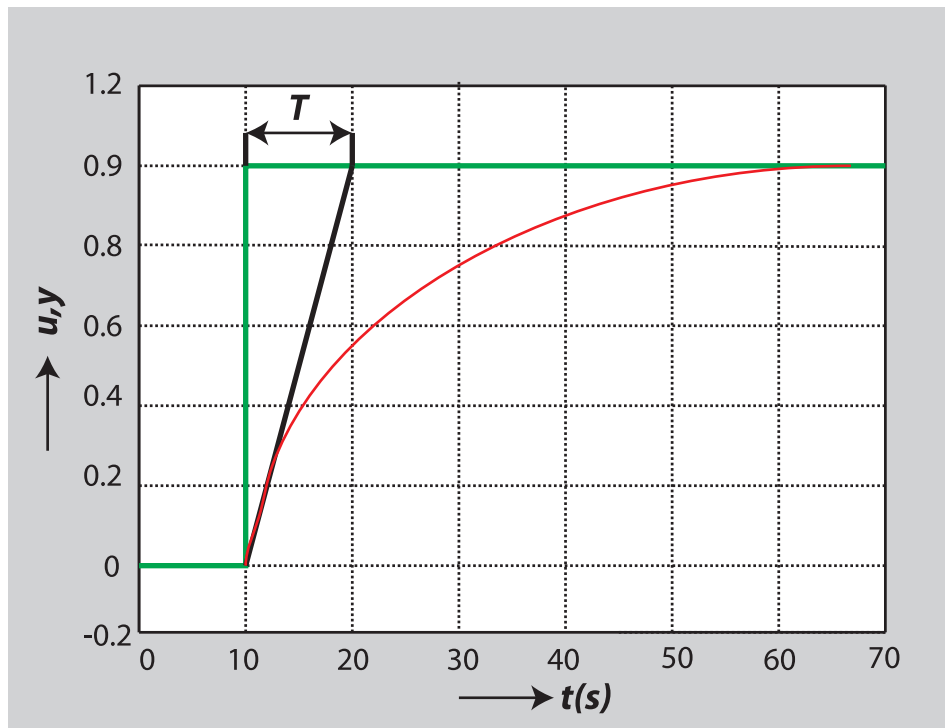
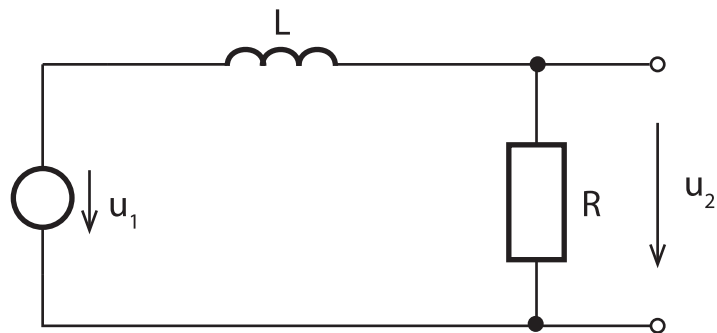
Uvažujme modifikovaný elektrický obvod podle následujícího obrázku. Sériová kombinace rezistoru a kapacitoru je nyní napájena ze zdroje konstantního napětí. Znázorněna je odezva na dva vstupní impulzy výšky u_{1m} a dvou délek (delší a krátký impulz). Výstupní veličinou je průběh napětí na kondenzátoru u_c .

Při skokové změně vstupního napětí na hodnotu u_{1m} je kapacitor postupně nabíjen (hromadí v sobě elektrický náboj) a napětí na něm má průběh exponenciální funkce

$$u_c = u_{1m}(1 - e^{-t/\tau})$$

Na počátku nabíjení je napětí na kapacitoru nulové a protékající proud je maximální (omezený jen hodnotou rezistoru R). S postupujícím nabíjením kapacitoru stoupá napětí na něm a zmenšuje se rozdíl mezi ním a napětím na vstupu ($u_{1m} - u_c$), proud klesá a nabíjení se zpomaluje – zpomaluje se i nárůst výstupního napětí. V ustáleném stavu se napětí na kapacitoru rovná napětí na vstupu (u_{1m}) a obvodem neprotéká žádný proud.





Obr. 8.6: Jednoduchý elektrický obvod, napájený dvěma impulzy ze zdroje napětí (a) obvod RC, (b) průběh napětí na vstupu a výstupu obvodu RC

8.16 Vybíjení kapacitoru

Podobný proces, ale s opačnými znaménky probíhá při vybíjení kapacitoru (po přivedení nulového napětí na vstup obvodu), opět podle exponenciální závislosti, tentokrát

$$u_c = u_{1m}(e^{-t/\tau})$$

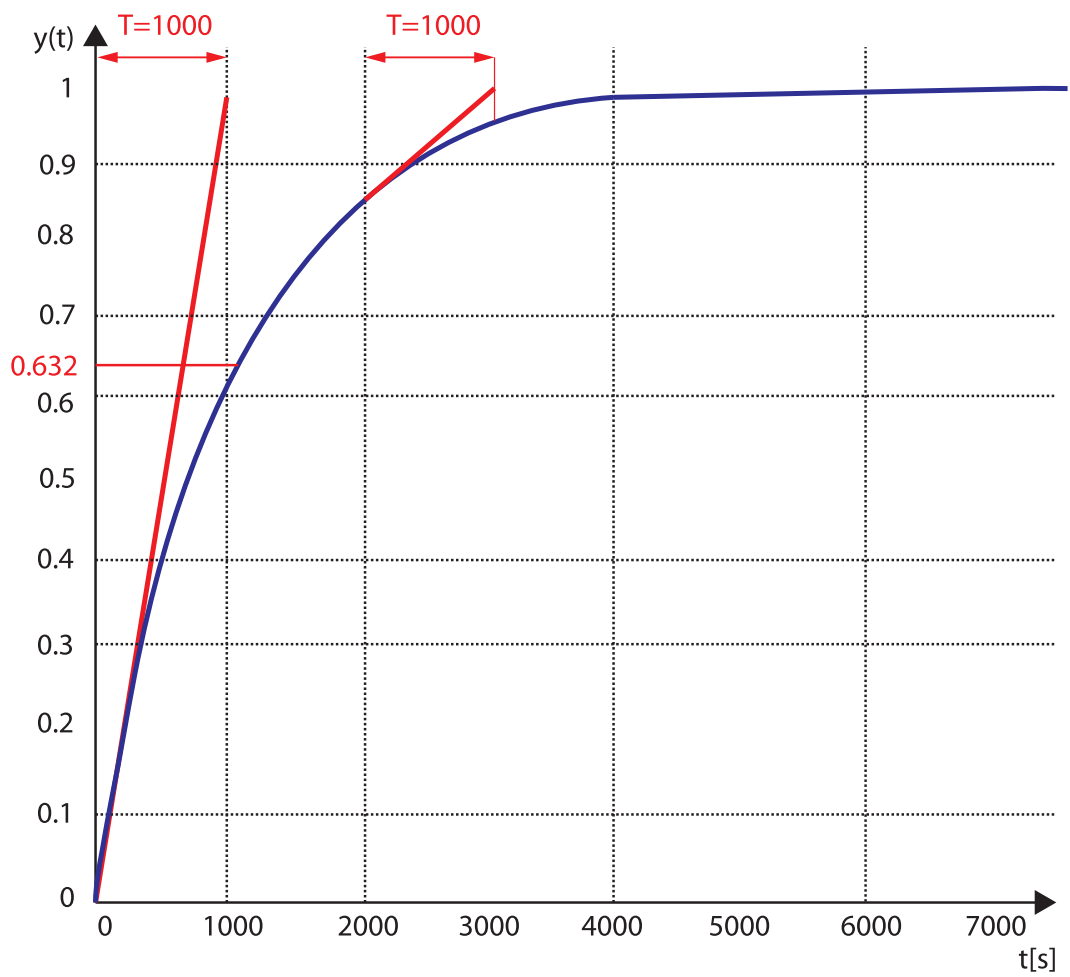
Při přivedení krátkého vstupního impulzu nestačí doznít přechodový děj a kapacitor se nabije jen zčásti. Vybíjet se pak začne z naposledy dosažené hodnoty.

Exponenciální průběh je charakterizován hodnotou časové konstanty τ . Geometricky ji lze interpretovat jako délku subtangenty, tj. úseku, který protíná tečna vedená z libovolného bodu exponenciály na vodorovné přímce cílové hodnoty (v našem případě u_{1m} nebo 0). Pro uvedený obvod RC je hodnota časové konstanty součinem hodnot kapacity a odporu $\tau = RC$.

Popsaná soustava je nazývána jako statická soustava prvního řádu, někdy též jako jednodokapacitní soustava. Obdobně se chová i elektrický obvod s induktorem a rezistorem (RL), kde se podle exponenciální závislosti mění proud protékající („protlačovaný“) induktorem a úměrně s ním i výstupní napětí na rezistoru.



Zde jsme předpokládali, že na vstup přivádíme napěťové impulzy, tedy střídavě úrovně u_{1m} nebo 0. K vybíjení kapacitoru dochází při nulové úrovni vstupního napětí a vybíjecí proud teče směrem do zdroje. Mnoha soustavám ale odpovídá situace (např. právě popsanému napouštění nádrže), kdy je při konci nabíjení odpojen napájecí zdroj od soustavy. Pak by ovšem nemohl protékat vybíjecí proud a kapacitor by zůstal trvale nabitý (pokud pomíjíme parazitní svodové odpory).



Obr. 8.7: Odezva statické soustavy 1. řádu na skokovou změnu vstupu a význam časové konstanty

8.17 Souvislost tepelných a elektrických soustav

Zdánlivě má popsany příklad současného nabíjení a vybíjení kondenzátoru analogii v tepelné technice, kdy vytápíme reálnou místnost s tepelnými ztrátami nebo ohříváme vodu v rychlovarné konvici. Problém je ale v tom, že v uvedené elektrotechnické analogii odpovídá konci nabíjení přivedení nulového napětí na vstup a kapacitor se vybíjí částečně přes ztrátový resistor R_2 a částečně přes resistor R_1 do zdroje – výsledně přes paralelní kombinaci obou rezistorů

$R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ proti nulové úrovni napětí. Soustava je symetrická, tedy

lineární.

Tepelné soustavy jsou ale výrazně nesymetrické, tedy nelineární. Konci vytápění zde odpovídá odpojení soustavy od zdroje tepla nebo jiné přerušení tepelného toku z tepelného zdroje do vytápěné soustavy – ta se dále ochlazuje jen v důsledku tepelných ztrát („teplo z ní vytéká“). Realitě proto více odpovídá příklad současného napouštění a vypouštění nádrže nebo elektrický obvod s přerušením přívodu ze zdroje podle následujícího obrázku. Při konci vytápění je přerušen přívod proudu do obvodu a kapacitor se vybíjí jen přes resistor R_2 .

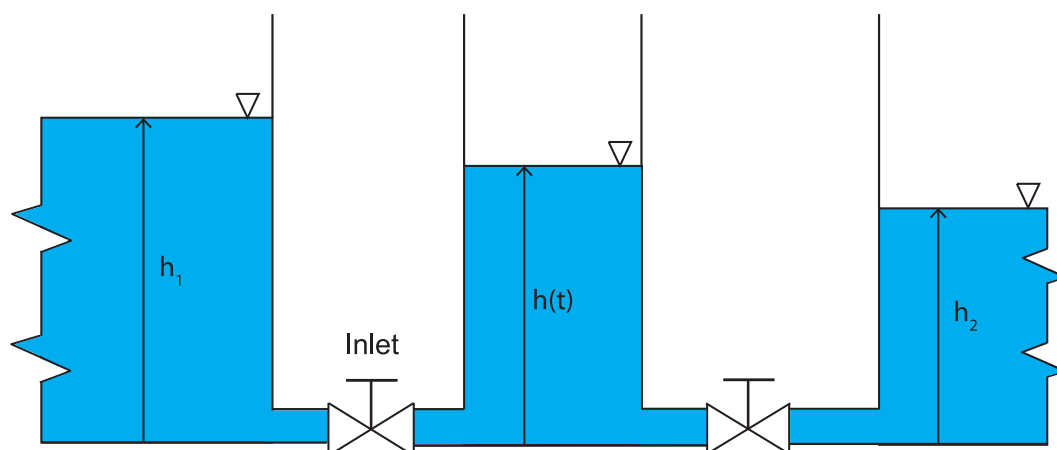
Tento příklad již lépe modeluje situaci při vytápění, ovšem za předpokladu, že venkovní teplota je právě $0\text{ }^\circ\text{C}$. Reálnější je model podle následujícího obrázku, který respektuje libovolnou hodnotu venkovní teploty, která je zde interpretována jako zdroj napětí u_2 .

Pokud je jeho napětí na druhém zdroji u_2 nižší, než napětí na kapacitoru, teče proud do něj (tomu odpovídají tepelné ztráty, kterými teplo ze soustavy „vytéká“). V letních měsících ale může být venkovní teplota vyšší než uvnitř klimatizované místnosti a teplo do ní zvenku „prosakuje“ – tomu odpovídá nabíjení kapacitoru ze zdroje u_2 .

8.18 Souvislost tepelných, hydraulických a elektrických soustav

Je třeba uvést, že se jedná o velmi hrubý model tepelné soustavy (např. vytápěné místnosti). Reálné modely mívají složitější strukturu a bývají vyšších řádů. Připomeňme, že v našem modelu vystihuje rezistor R_1 vytápění (např. prostup a předávání tepla v otopných tělesech) a rezistor R_2 odpovídá tepelným ztrátám – čím je nižší, tím větší jsou tepelné ztráty. Kvalitně izolovaným budovám odpovídají velké hodnoty. Kapacita kapacitoru C postihuje množství akumulovaného tepla, především o objemu vzduchu vytápěné místnosti, částečně i ve zdivu a otopných tělesech.

Elektrickému obvodu se dvěma napěťovými zdroji odpovídá hydraulická soustava se dvěma velkými nádržemi („bazény“) s rozdílnými hladinami a je názornou analogií tepelné soustavy (opět s vědomím odmocninové závislosti mezi výškami hladin a hodnotami průtoků. I zde může být hladina v pravé nádrži h_2 vyšší, než hladina v levé nádrži h_1 .

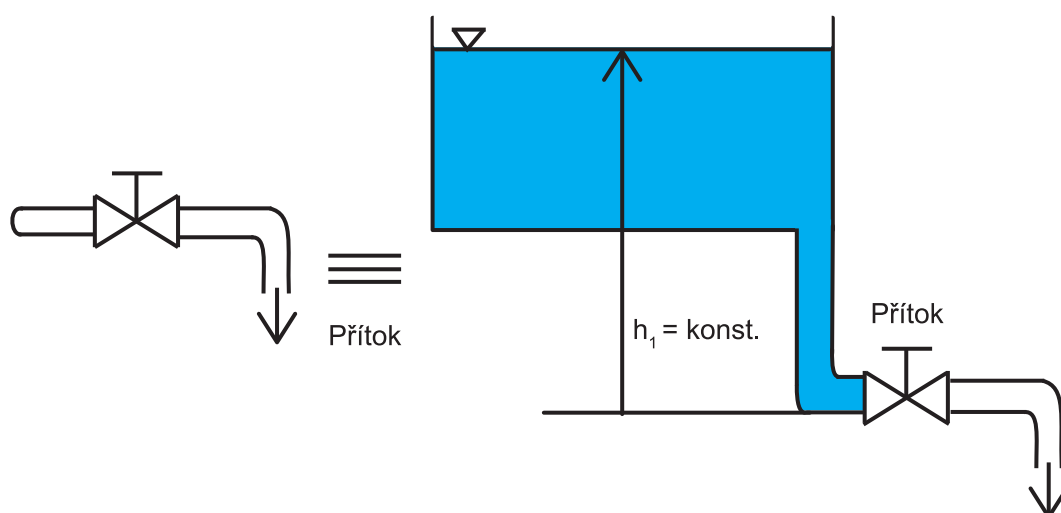


Obr. 8.8: Hydraulická soustava se dvěma velkými nádržemi („bazény“), jako model tepelné soustavy (místnosti) s teplovodním vytápěním a s tepelnými ztrátami – bez respektování soustavy

8.19 Zdroje napětí a proudu pro různé fyzikální děje

V teorii elektrických obvodů je obvyklé pracovat s ideálními zdroji napětí a proudu, méně obvyklé to je již u tepelných a hydraulických soustav, takže si mnohdy neuvědomíme rozdíl a můžeme chybně odhadnout strukturu modelu.

Pro ideální zdroj napětí (konstantního stejnosměrného) platí, že poskytuje stále stejnou úroveň napětí, nezávisle na tom, jak je zatěžován (jaký proud jím protéká) – teoreticky má nulový vnitřní odpor. Většina napájecích zdrojů, se kterými se setkáváme v praxi, mají charakter zdrojů napětí (stejnosměrného či střídavého). Některé se ideálnímu zdroji blíží více (např. elektrorozvodná síť, olovené akumulátory), některé se mu dost vzdalují (suché články, malé akumulátory a transformátory).

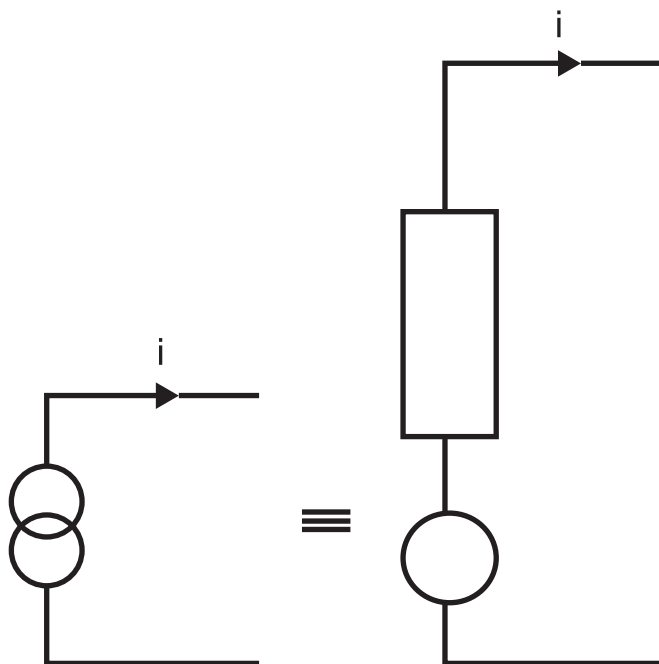


Obr. 8.9: Hydraulická analogie zdroje napětí

V hydraulických soustavách odpovídá napětí tlak nebo rozdíl tlaků. Zdroji napětí tedy odpovídá zdroj konstantního tlaku, který není (viditelně) ovlivňován spotřebou. Obvykle je realizovaný jako velká nádrž s kapalinou (bazén, vodojem, případně jezero nebo oceán), ale taky vodárenský rozvod, případně s redukčním ventilem.

V tepelné technice odpovídá napětí teplota nebo teplotní spád. Napěťovému zdroji odpovídá velkokapacitní zdroj tepla nebo chladu, např. velká vodní nádrž s akumulovaným teplem či chladem, bojler, blok zdíva, zeminy, potok nebo řeka, jezero, ale i vstup do otopného systému s kvalitní regulací a dostatečným dimenzováním zdrojů (kotel, předávací stanice).

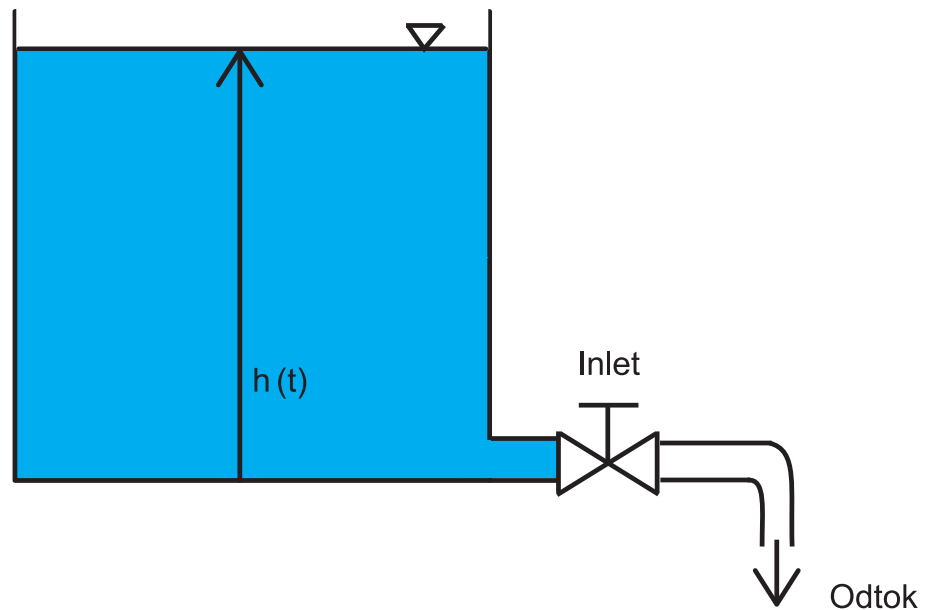
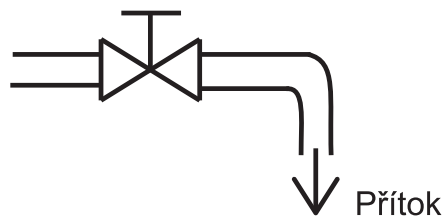
Ideální zdroj proudu (konstantního, stejnosměrného) je schopen do elektrického obvodu „protlačit“ proud zadané hodnoty nezávisle na zatížení, úbytcích napětí a teplotě spotřebičů. Jednou z možností, jak jej realizovat, je zapojit zdroj dostatečně vysokého napětí do série s dostatečně velkým rezistorem.



Obr. 8.10: Jedna z možností, jak realizovat zdroj proudu „přijatelné kvality“

V hydraulických soustavách odpovídá zdroji elektrického proudu průtok kapaliny, jehož hodnota není ovlivňována spotřebou, například při napouštění nádrže z vodovodního potrubí o dostatečném tlaku nebo bez interakce se vstupující kapalinou (např. napouštění trubkou shora).

V tepelné technice je analogií k elektrickému proudu tepelný tok, nezávislý na teplotě vyhřívaného objektu. Proudovému zdroji odpovídá například topné těleso, ponorný vaříč nebo přímotopný spotřebič bez regulace a tepelných ochran. Takový zdroj, není-li ochlazován, může dosáhnout velmi vysoké teploty (např. žárovka nebo světlý tepelný zářič, hořák sporáku nebo kotle). Elektrický vaříč, trouba, varná konvice nebo přímotopný spotřebič, pokud je u nich vyřazena z činnosti regulace teploty a tepelné ochrany se mohou rozpálit nečekaným způsobem a mnohdy s „katastrofickými a sebezničujícími následky“ – hasiči o tom mohou vyprávět. Podobný charakter má i dutina mikrovlnné trouby.



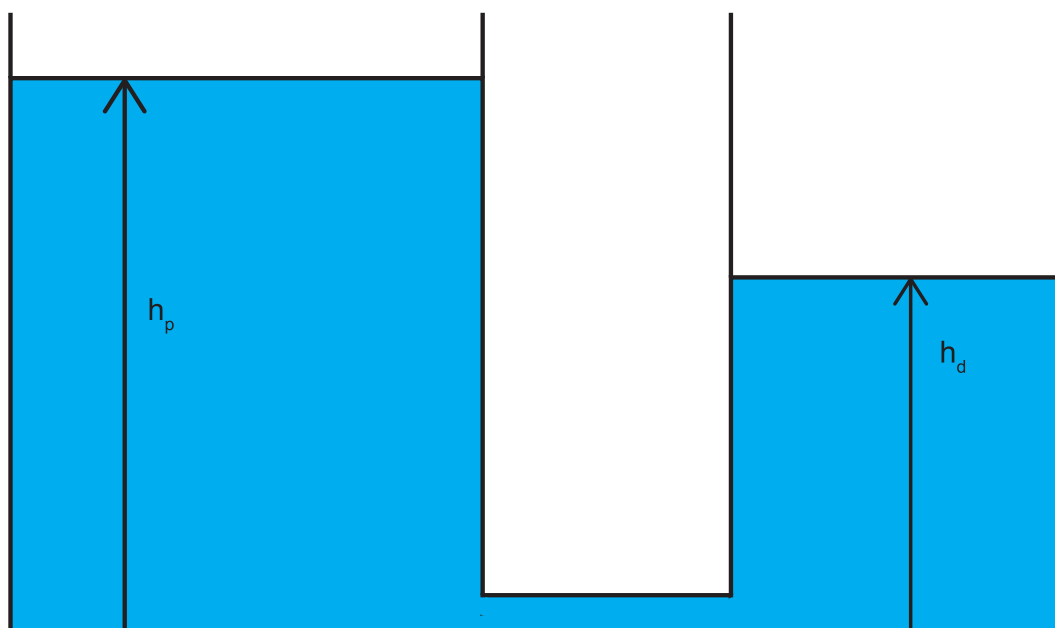
Obr. 8.11: Jednokapacitní hydraulická soustava s odtokem, napájená s konstantním přítokem

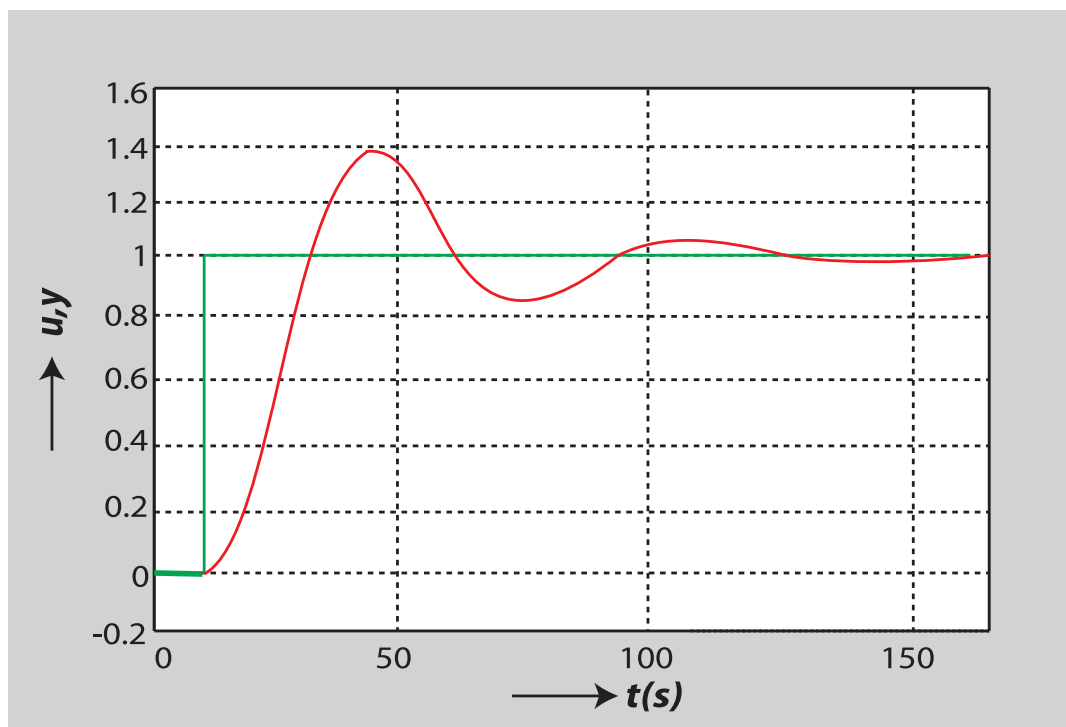
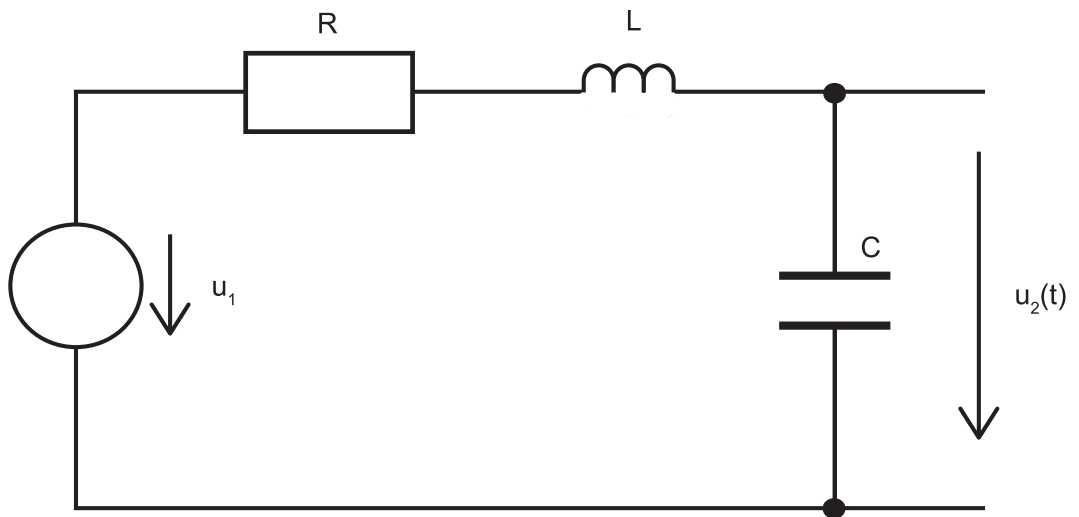
Většina z dosud popsaných soustav (elektrických a hydraulických), s výjimkou astatické, byly napájeny ze zdroje napětí nebo z jeho hydraulické analogie (ze zdroje konstantního tlaku – bazénu). Uvedeme několik modifikací jejich struktury, která spočívá v použití proudového zdroje nebo jeho hydraulické analogie – ze zdroje konstantního průtoku.

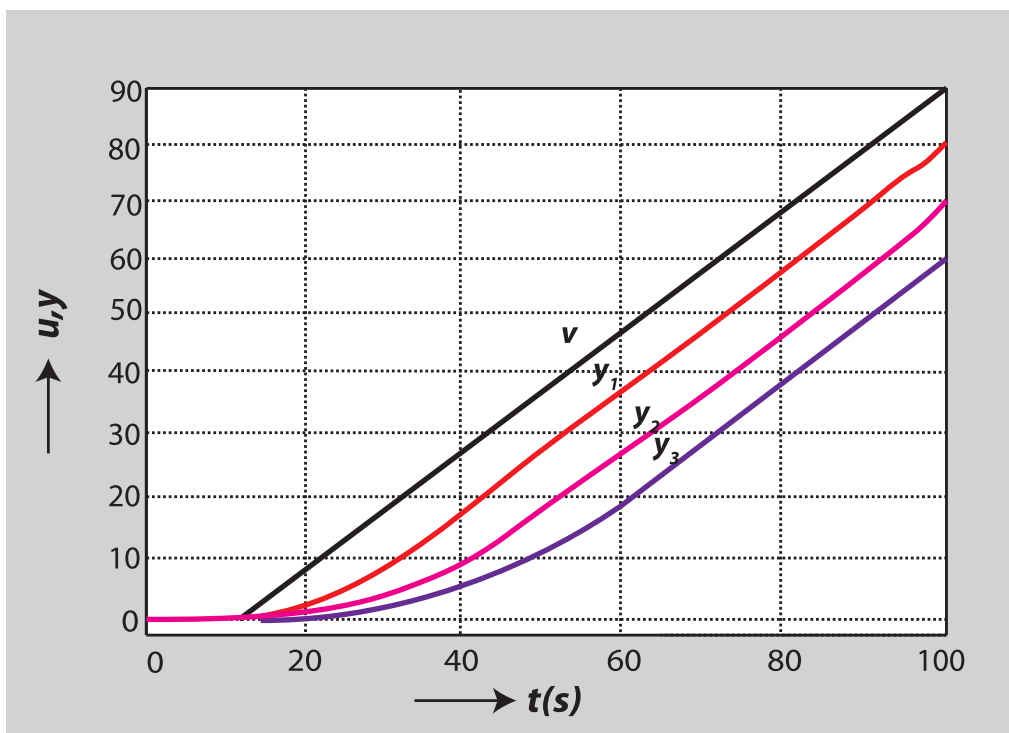
8.20 Kmitavé soustavy

Soustavy vyššího řádu lze získat i jiným způsobem a to nejenom s monotónním přechodovým dějem. Některé se mohou vyznačovat nápadnou kmitavostí. Obvykle u nich dochází k transformaci různých forem energie. Např. u zavěšeného kyvadla se navzájem proměňuje potenciální energie na kinetickou a zpět, u torsního kyvadla se proměňuje energie pružné deformace na kinetickou a zpět. Kmitavý charakter mívají mechanické soustavy, u nichž se projevuje setrvačnost (hmota, moment setrvačnosti), direktivní síla (pružina nebo jiná vratná deformace) a tlumení.

Úkolem řídicího systému někdy je právě utlumení kmitající soustavy (např. aktivní tlumení podvozku automobilu nebo sedačky řidiče, optimalizace pojezdu jeřábu, aby se minimalizovalo kývání závěsu). Elektrické obvody s induktory, kapacitory a rezistory se rovněž vyznačují sklonem ke kmitání. Kmitavé bývají i velké plochy vodní hladiny. Složité soustavy, někdy i nestabilní, vznikají zpětnými vazbami. Do série lze řadit nejenom statické soustavy, ale i statické s astatickými nebo jen astatické.



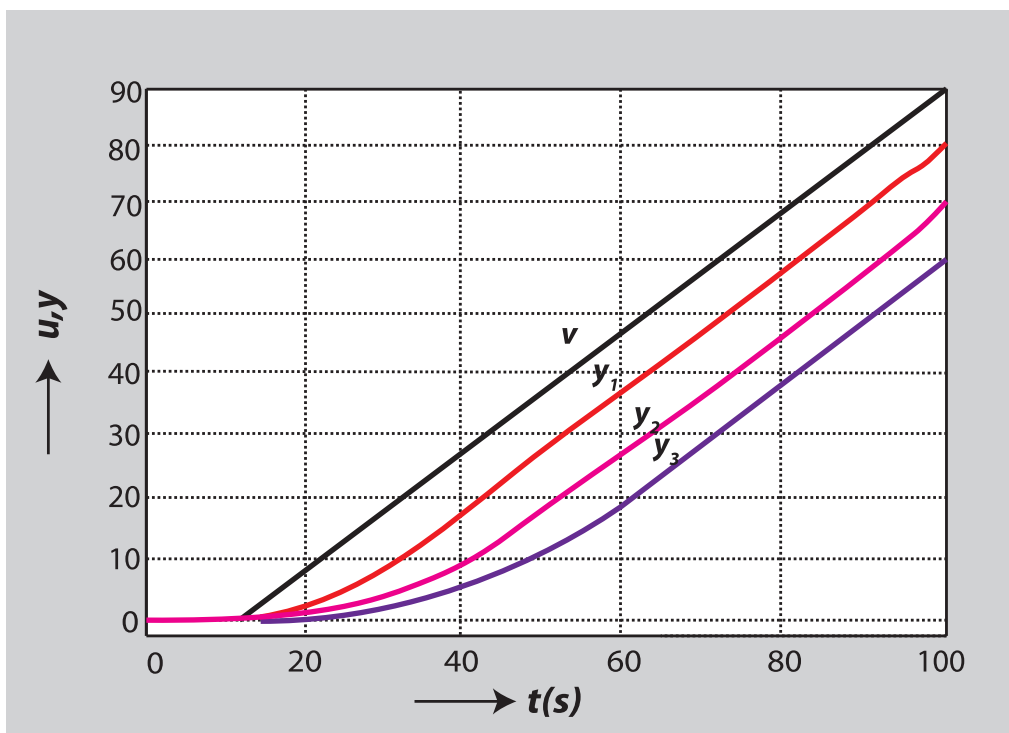


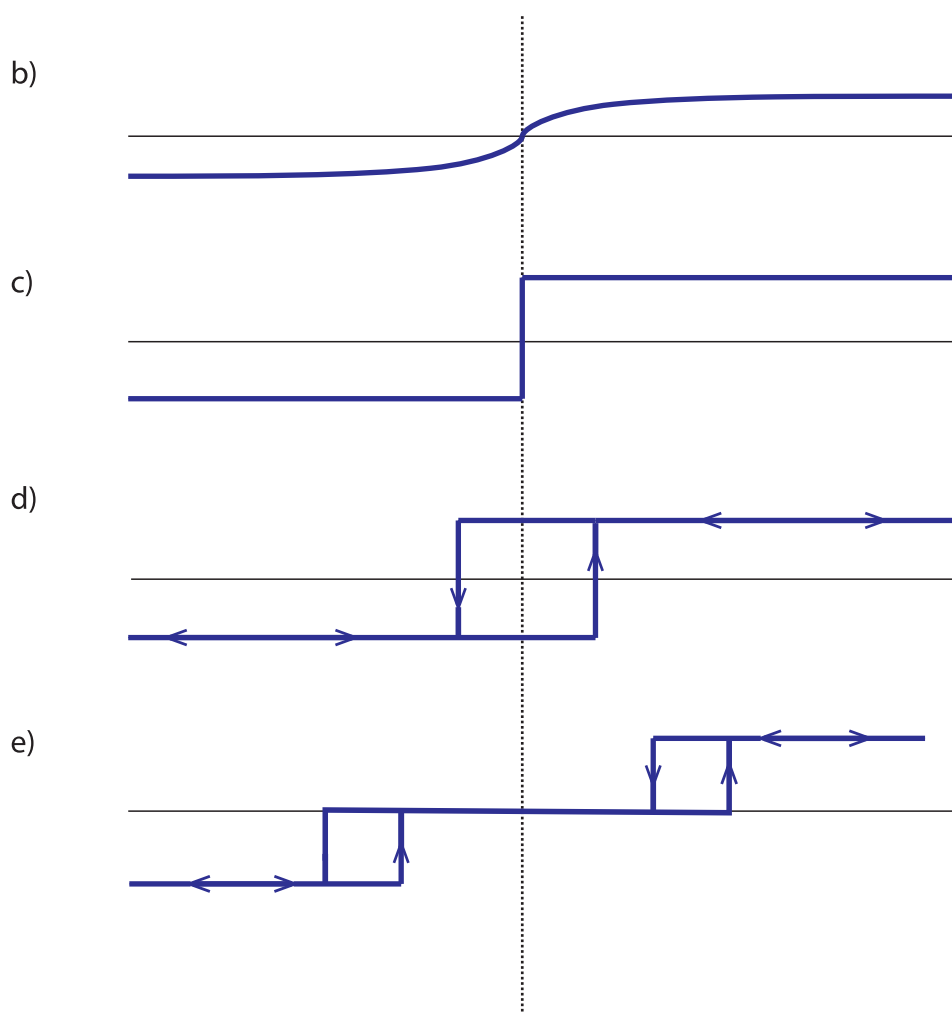
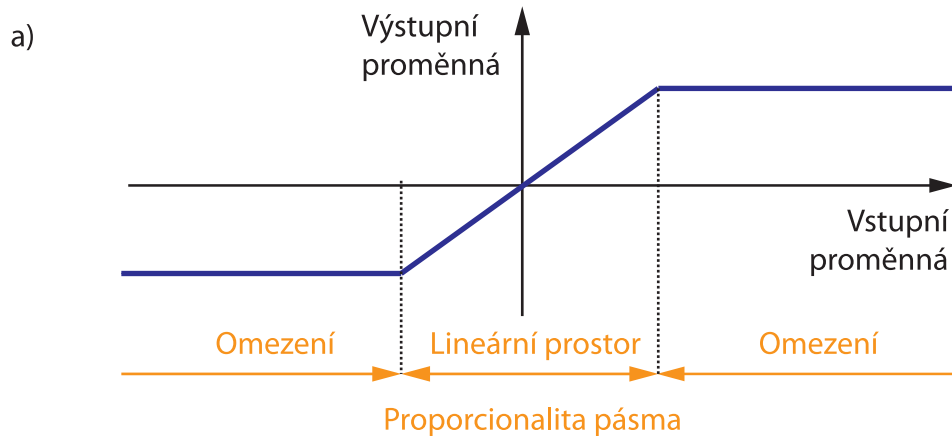


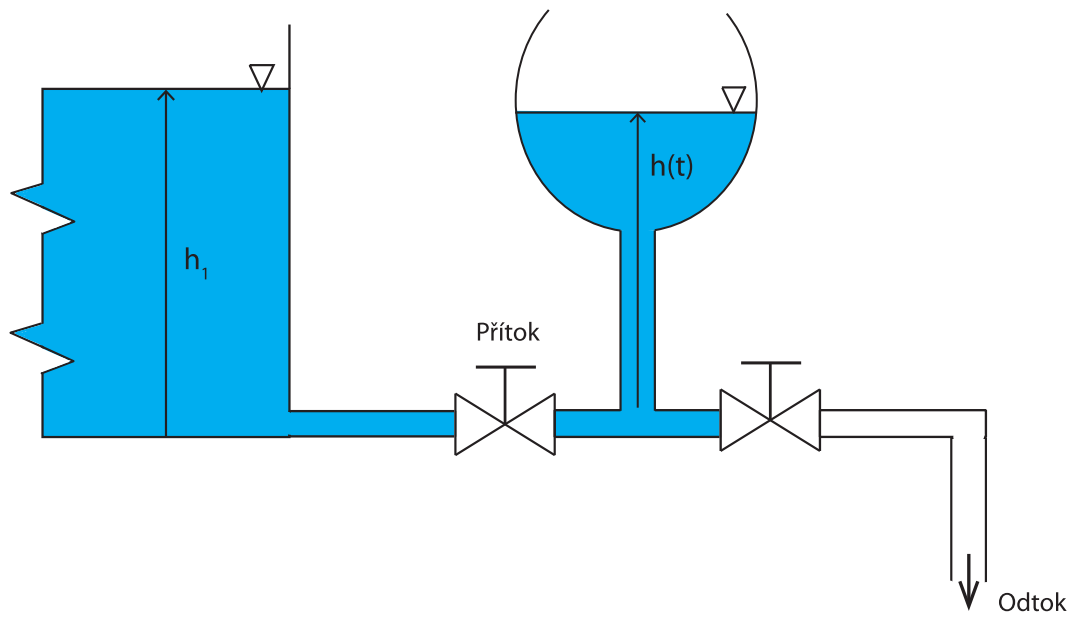
Obr. 8.12: Elektrický obvod RLC

8.21 Nonlinearity

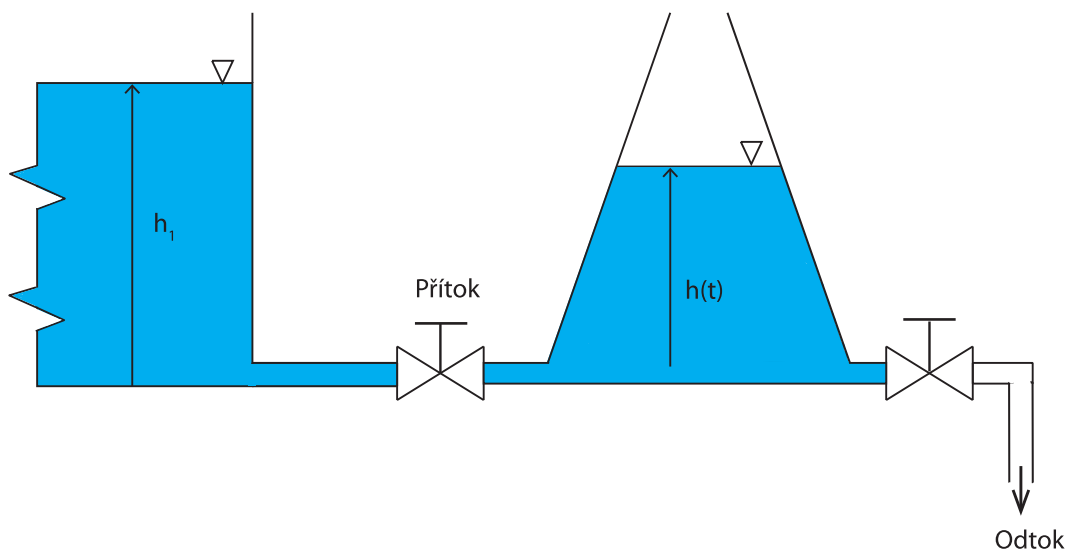
Některé soustavy se vyznačují výraznými nelinearitami. O některých už jsme se zmínili, např. nelinearita typu omezení (saturace), nebo obecná funkční závislost (např. kvadratická, sigmoidální nebo odmocninová), reléová charakteristika, jednoduchá hystereze, dvojitá a vícenásobná hystereze, pásmo necitlivosti a suché tření nebo nesymetrie soustavy. Charakter nasycení mívá i nelinearita typu omezení akční veličiny. Vzniká v situaci, regulátor vyčíslí určitou hodnotu akčního zásahu (např. teplotu vody v otopné soustavě rovnou 250 °C, zatímco fyzikálně realizovatelná je do 100 °C, ale v potrubí je dostupná jen voda o teplotě 80 °C, někdy podstatně méně. Někdy obsahuje jedna soustava více nelinearit, např. u hydraulických soustav to bývá omezení spolu s odmocninovou závislostí a nesymetrií soustavy. Další nelinearity mohou být např. u hydraulických soustav způsobeny neobvyklými tvary nádrží.







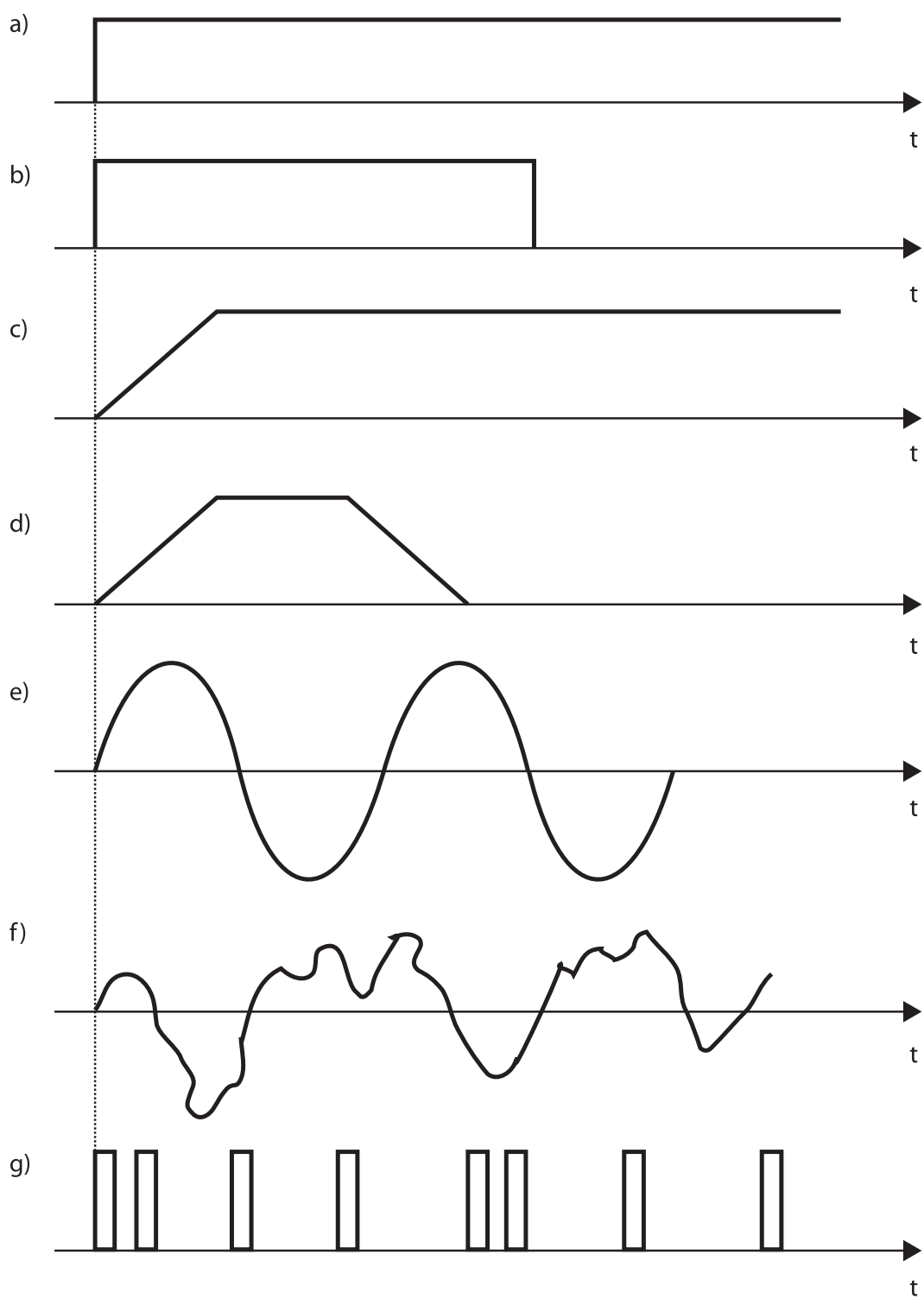
Obr. 8.13: Charakteristiky typických nelinearit



Obr. 8.14: Jednokapacitní hydraulická

8.22 Identifikace soustav

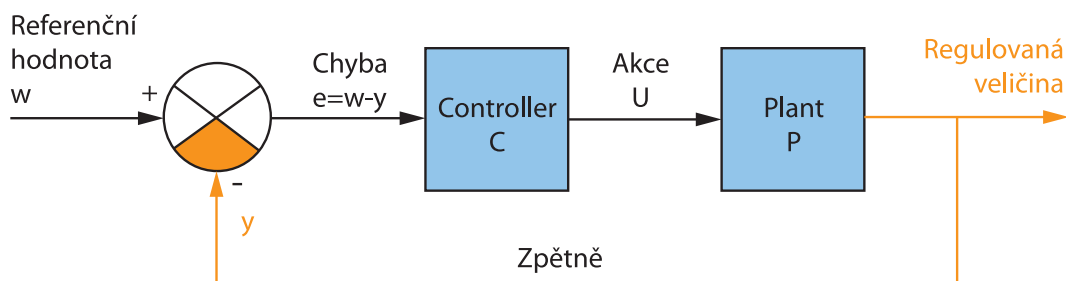
Pro identifikaci soustav se často používají typové signály a podle odezvy se pak vyhodnotí typ a parametry soustavy. V teoretické literatuře se často píše o skoku žádané nebo akční veličiny. Odezva soustavy na něj se nazývá přechodová charakteristika. Někdy se používá krátký impuls a odezva na něj se nazývá impulsní charakteristika. Oba typy testovacích signálů však mají význam spíše teoretický. Někdy nejsou tak náhlé změny pro soustavu žádoucí nebo jsou přímo nebezpečné (např. rychlé otevření či uzavření ventilu na dlouhém potrubí může způsobit nebezpečné rázy, nežádoucí nebo nebezpečný může být rychlý rozjezd vozidla, výtahu nebo lanovky). Většinou jsou skokové změny v praxi nerealizovatelné. Například rozběh motoru, uzavření či otevření ventilu, nebo změna teploty pece si může vyžádat značnou dobu. Místo testovacího skoku nebo obdélníku se často pracuje s rampovými nebo lichoběžníkovými průběhy (záměrně nebo z nouze). Někdy se k testování používají sinusové průběhy vstupů, jindy vstupní signály náhodného či pseudonáhodného charakteru (spojité nebo impulsní).



Obr. 8.15: Typické průběhy testovacích signálů

8.23 Regulace

Regulace je způsob řízení, které využívá zpětnou vazbu (zpětnovazební řízení). Cílem regulace je zajistit požadovanou hodnotu řízené veličiny (např. teplotu v místnosti, hladinu v nádrži) nebo její požadovaný časový průběh (např. průběh teploty v místnosti podle denního či týdenního programu vytápění nebo průběh teploty v chemickém reaktoru podle výrobní receptury). Požadovanou hodnotu řízené (regulované) veličiny je třeba zajistit nejenom při změnách žádané hodnoty, ale i při působení poruchových veličin, které působí na řízenou soustavu a mnohdy mají nepředvídatelný charakter, např. tepelné ztráty a zisky ve vytápěné místnosti (snížení venkovní teploty, otevření okna, průvan, oslunění fasády a místnosti, zapnuté elektrické spotřebiče nebo přítomnost většího počtu lidí ve vytápěné místnosti).



Obr. 8.16: Základní schéma regulace

8.24 Zpětná vazba

Předcházející obrázek znázorňuje principiální schéma regulačního obvodu. Jeho vstupem je žádaná hodnota řízené (regulované) veličiny (značí se w) a výstupem je její skutečná hodnota (y). V diferenčním členu se vytváří jejich rozdíl, nazývaný regulační odchylka $e = w - y$, který je vstupem regulátoru R . Ten ji zpracuje do formy akční veličiny u , která prostřednictvím akčních členů působí na regulovanou soustavu S tak, aby byla hodnota regulační odchylky minimalizována – aby se skutečná hodnota řízené veličiny y co nejvíce přiblížila její žádané hodnotě w .

V praxi se patrně nejvíce používají nespojité regulátory, obvykle dvoustavový (termostat), třístavový a vícestavové, a různé varianty regulátorů PID (PI a P, případně PII). Existují samozřejmě i komplikovanější a náročnější regulátory.

9 PID regulátory

Typickou vlastností obvyklých regulátorů typu P, PI, a PID je lineární závislost mezi zpracováványými veličinami. Pro proporcionální regulátor (P) je akční veličina u přímo úměrná regulační odchylce e .

Akční veličina proporcionálně – integračního regulátoru (PI) je součtem dvou složek – proporcionální (která je podobně jako u regulátoru P úměrná regulační odchylce) a integrační složky, která je úměrná nastřádané hodnotě regulační odchylky (jejímu integrálu). Integrační složka umožňuje dosáhnout nulové ustálené hodnoty odchylky a překonat případné necitlivosti v oblasti malých akčních zásahů (např. „suché tření“ v pohonu). Má setrvačný charakter a někdy může být zdrojem nestability nebo kmitavého průběhu regulačního procesu.

Výstup (akční veličina) proporcionálně – integračně – derivačního regulátoru (PID) obsahuje navíc ještě derivační složku. Ta má „předvídavý charakter“ a dává regulátoru schopnost okamžitého reagování na rychlé změny žádané veličiny nebo na náhlé změny poruchových veličin (např. při otevření okna nebo oslunění místnosti). Problémem je, že zesiluje i vysokofrekvenční šумы a může být proto zdrojem nestability.

9.1 Implementace

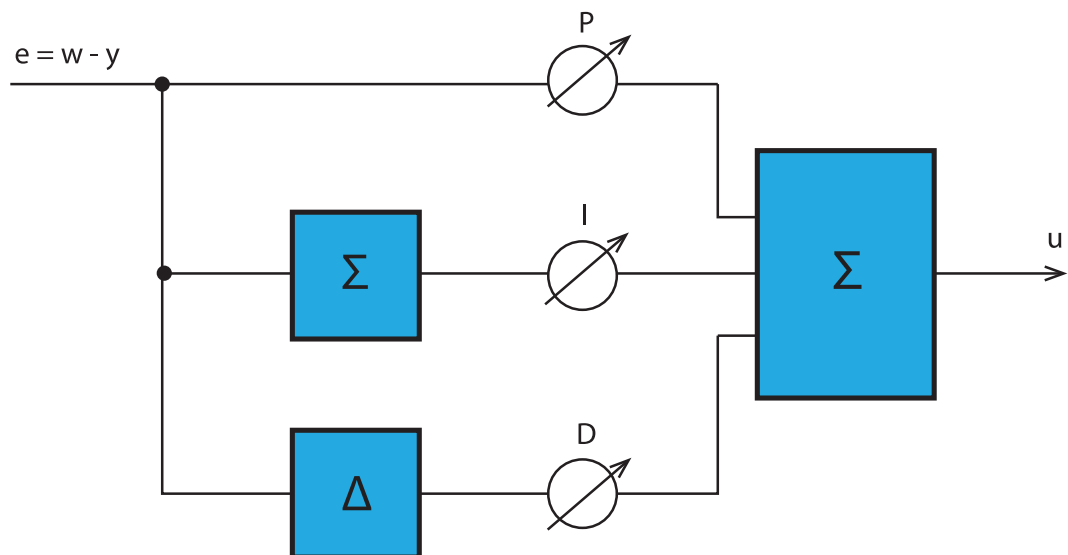
Ještě donedávna se používaly regulátory PID, realizované analogovou technikou, obvykle s využitím operačních zesilovačů.

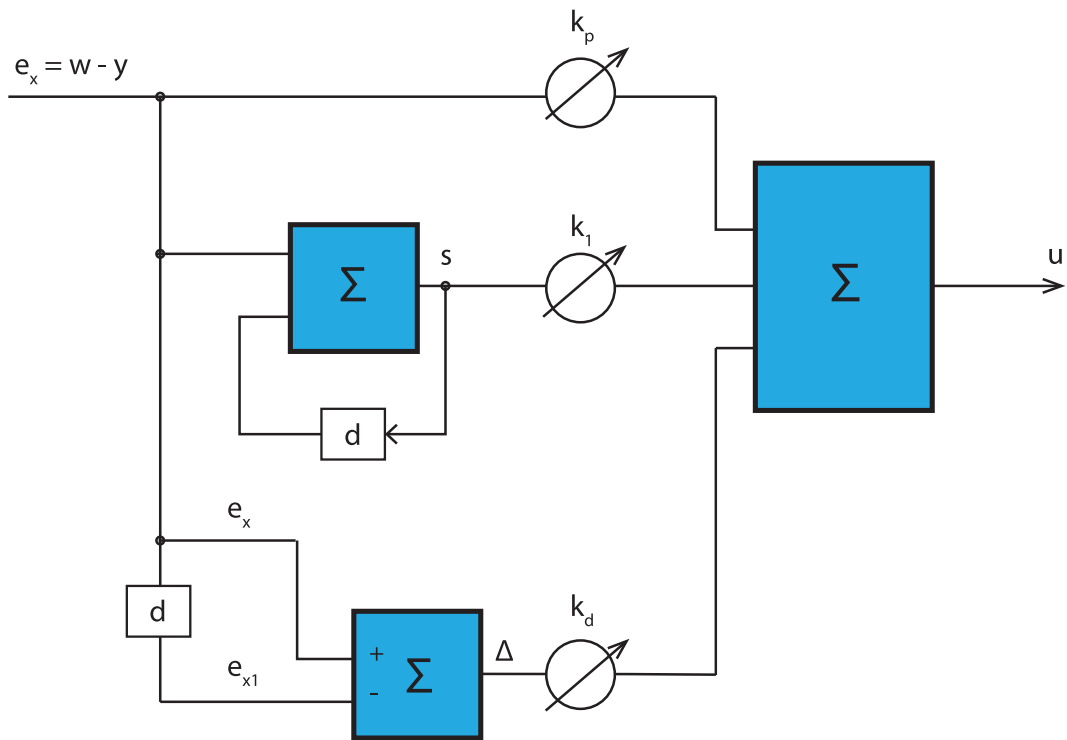
V současnosti se již regulátory realizují programem – pro malé regulátory programem mikrořadiče nebo signálového procesoru, pro rozsáhlejší průmyslové aplikace programem PLC nebo počítače. Uvádíme principiální schéma jeho číslicového algoritmu.

Vyčísluje matematický vztah

$$u_k = P \cdot e_k + I \cdot \sum e_k + D \cdot \Delta e_k$$

Integrovaní regulační odchylky je zde nahrazeno postupným sčítáním (sumací) hodnot regulační odchylky vyčíslené v jednotlivých krocích ($\sum e_k = \sum e_{k-1} + e_k$). Derivace je zde nahrazena zpětnou diferencí, tj. rozdílem hodnoty odchylky v aktuálním a minulém kroku $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$.





Obr. 8.17: Principiální schéma polohového (absolutního) algoritmu PID

9.2 Varianty

Tento typ regulátoru sice není identický regulátoru PID se stejnými hodnotami parametrů, ale úspěšně jej v praxi nahrazuje. Pro odlišení se někdy označuje zkratkou PSD, proporcionálně – sumačně – derivační. Zde zůstaneme u tradičního označení PID i s vědomím určité nedůslednosti. Výstupní proměnnou programu je aktuální hodnota akční veličiny u_k (např. poloha řízené části mechanismu, natočení regulačního ventilu). Tento algoritmus se často nazývá jako polohový či absolutní. V teoretické literatuře se místo součinitelů (zesílení) u jednotlivých složek výstupu používají komplikovanější konstanty, zde pro názornost používáme symboly P, I, D ve významu zesílení odpovídajících složek.

Program s tímto algoritmem v každém výpočetním kroku vypočítává aktuální hodnoty akční veličiny u . Často se pro něj používá pojmenování polohový nebo absolutní algoritmus pro odlišení jeho odvozené varianty, která vyčísľuje hodnoty přírůstků akční veličiny Δu . Ten se označuje jako přírůstkový nebo rychlostní algoritmus. Můžeme si jej představit, jako by vznikl „derivováním“ (diferencováním) polohového algoritmu. Snáze se realizuje a má několik výhod oproti polohovému algoritmu. Pokud je přesto nutné vyčísľit výslednou hodnotu akční veličiny, je třeba sumarizovat přírůstky – někdy to provádí akční orgán řízené soustavy (např. jako výslednou polohu mechanismu nebo natočení ventilu).

9.3 Přírůstkový algoritmus

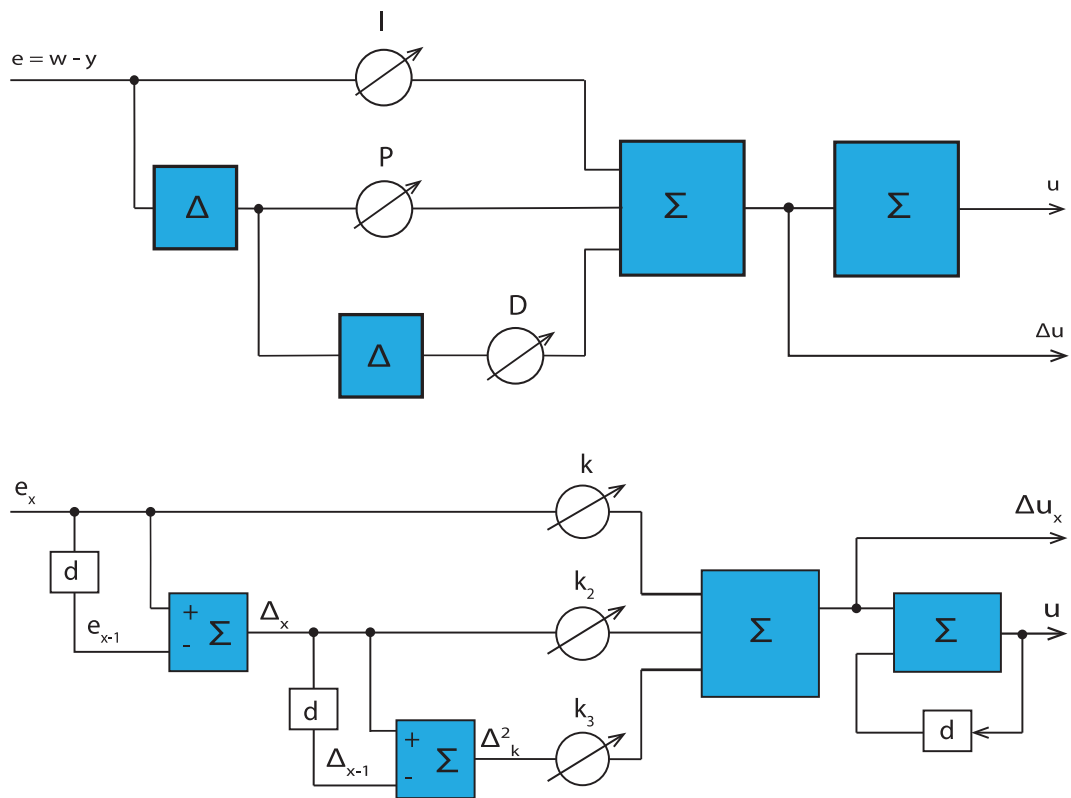
Přírůstkový algoritmus lze získat jen formální úpravou absolutního a vyčísluje vztah

$$\Delta u_k = P \cdot \Delta e_k + I \cdot e_k + D \cdot \Delta^2 e_k$$

Jeho výstupem je přírůstek akční veličiny Δu_k . Integrovační složka je úměrná aktuální hodnotě regulační odchylky e_k , proporcionální složka je úměrná její první diferenci $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$ a derivační druhé diferenci $\Delta^2 e_k = \Delta e_k - \Delta e_{k-1} = e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}$. Přírůstek akční veličiny Δu_k je měřítkem rychlosti změny akčního zásahu u_k . Proto se algoritmus často nazývá jako rychlostní nebo přírůstkový. Absolutní hodnotu akční veličiny u_k lze spočítat postupnou sumací vypočítávaných přírůstků $u_k = u_{k-1} + \Delta u_k$ (pravá část obrázku). Symboly p, i, d zde opět mají význam zesílení odpovídajících složek.

Formální úpravou lze vztah pro přírůstkový algoritmus zjednodušit na:

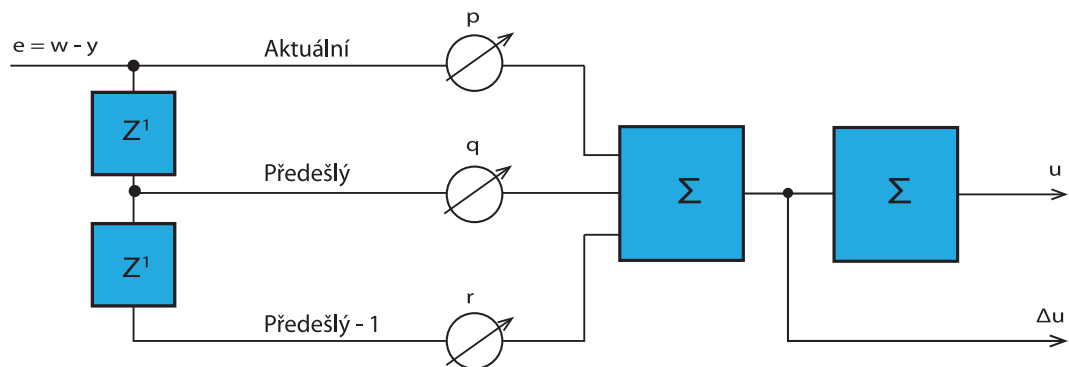
$$\Delta u_k = q_0 \cdot e_k + q_1 \cdot e_{k-1} + q_2 \cdot e_{k-2}$$



Obr. 8.18: Principiální schéma přírůstkového (rychlostního) algoritmu PID

9.4 Souvislost s FIR systémem

Přírůstek akční veličiny je lineární kombinací tří vzorků regulační odchylky – současného e_k , minulého e_{k-1} a předminulého e_{k-2} (obsahu tříúrovňové zpožďovací linky). Je jednoduchým případem systému FIR. V algoritmu se vyskytují jen tři operace násobení a dvě sčítání, koeficienty q_0, q_1, q_2 lze jednorázově spočítat (před aktivací regulátoru nebo při změně jeho parametrů) ze zadaných konstant p, i, d (hodnot zesílení složek) podle vztahů, které jsou uváděny v literatuře, zpracovává tři vzorky z hodnoty.



Obr. 8.19: Schéma přírůstkového (rychlostního)

9.5 Varianty PI, PII

Někdy se používá dvojice regulátorů PI zapojená do kaskády (výstup prvního je přiveden na vstup druhého) a výsledný regulátor tak provádí dvojí integraci, někdy se pro tuto kombinaci používá označení PII nebo PI2.

Je vidět, že samotná realizace algoritmu PID programem není obtížná, i když zde byly uváděny jen principiální vztahy. Mnohé PLC nabízejí i hotové instrukce nebo funkční bloky i s poměrně komplikovanými algoritmy.

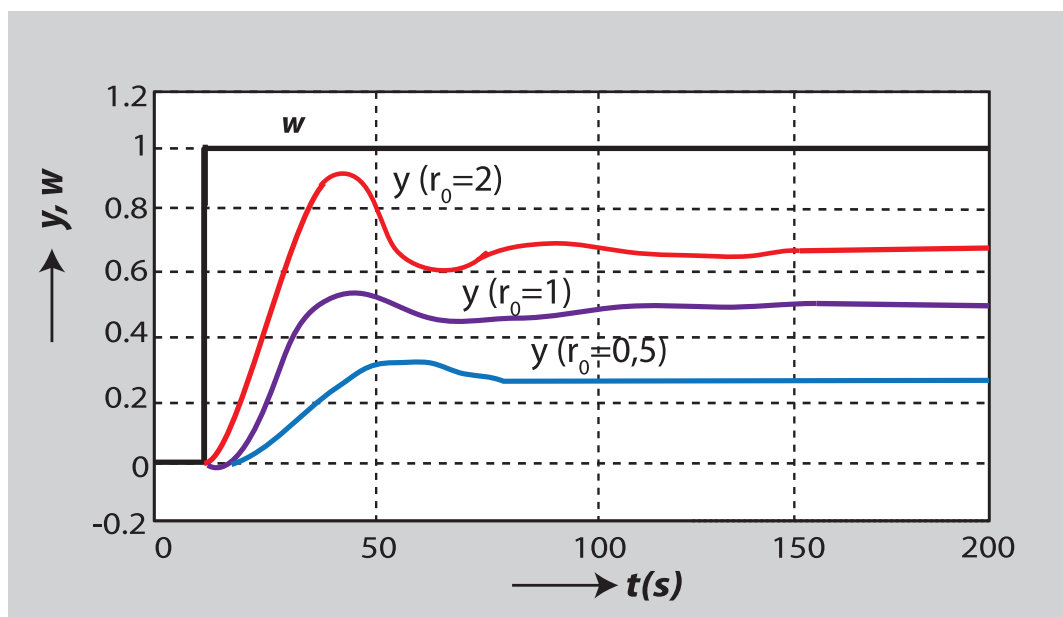
Hlavním problémem regulace je nastavení parametrů regulátorů tak, aby proces regulace byl co možná nejkvalitnější (stabilní, rychlý, ale bez velkých překmitů, s minimální spotřebou energie a šetrný k řízené technologii a jejím akčním členům i šetrný k okolnímu prostředí).

Regulační proces je ovlivňován především vlastnostmi řízené soustavy a jejich znalost (identifikace) je prvním předpokladem metodiky, uváděné v literatuře (většinou nesplnitelným). Dalšími (obvykle nesplněnými) požadavky na řízenou soustavu je její linearita a stálost v čase. Zde není prostor na detailní řešení, ani na popis metodiky. Omezíme se na několik ilustrativních příkladů.

9.6 Varianta P

Algoritmus proporcionálního regulátoru (P) je jednoduchý „čím ve větší regulační odchylka e (čím více je skutečná hodnota y vzdálena od žádané w), tím větší bude akční zásah u “. Ukázky regulačního pochodu, který je odezvou na skokovou změnu žádané hodnoty (přechodové charakteristiky) jsou na obrázku.

Je vidět, že výstupní veličina y se nikdy neustálí na žádané hodnotě w (regulační odchylka e zůstane nenulová). Při větším zesílení se odchylka zmenšuje, ale současně se zhoršuje kvalita regulačního pochodu – stává se více kmitavým, od určitého zesílení se může stát nestabilním. To je obecná vlastnost regulátorů typu P.

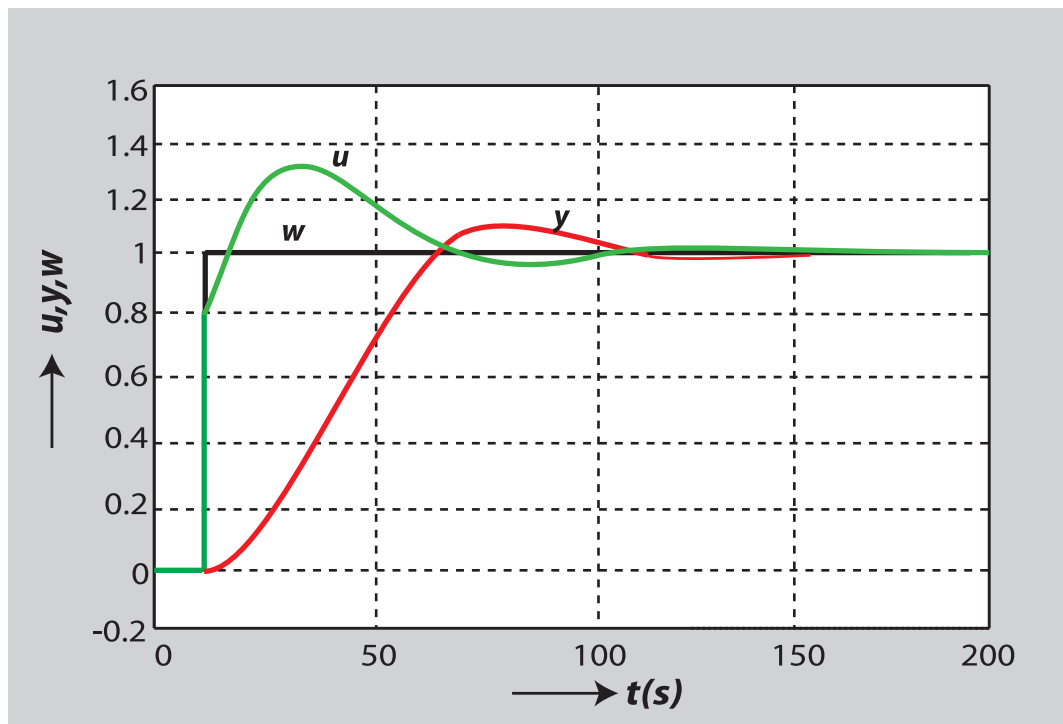


Obr. 8.20: Ukázky regulačního pochodu

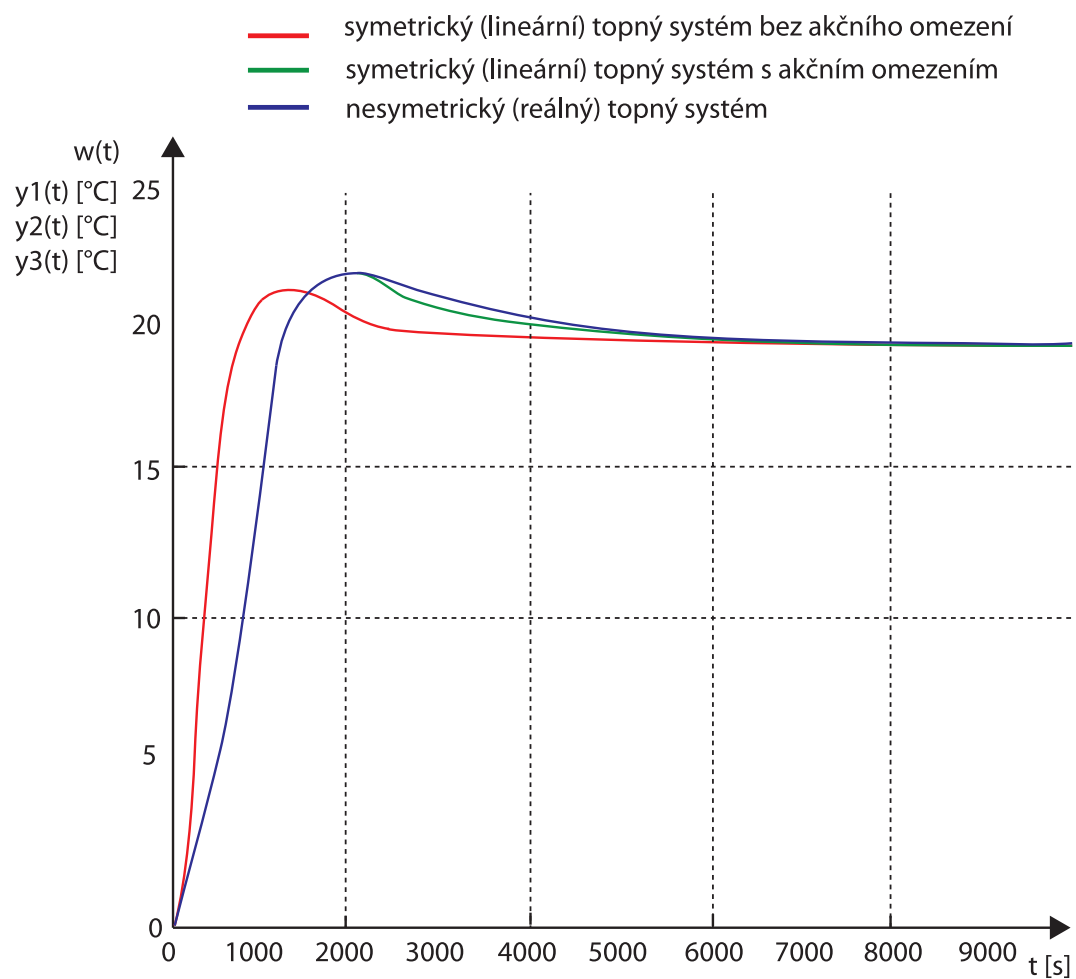
9.7 Varianta PI

Tento nedostatek odstraňuje proporcionálně integrační regulátor (PI), který zajistí ustálení regulačního procesu s nulovou odchylkou, proces mívá tendenci ke kmitání. Na obrázku to ilustruje přechodová charakteristika pro jednu variantu nastavení. Je zde zobrazen i průběh akční veličiny u .

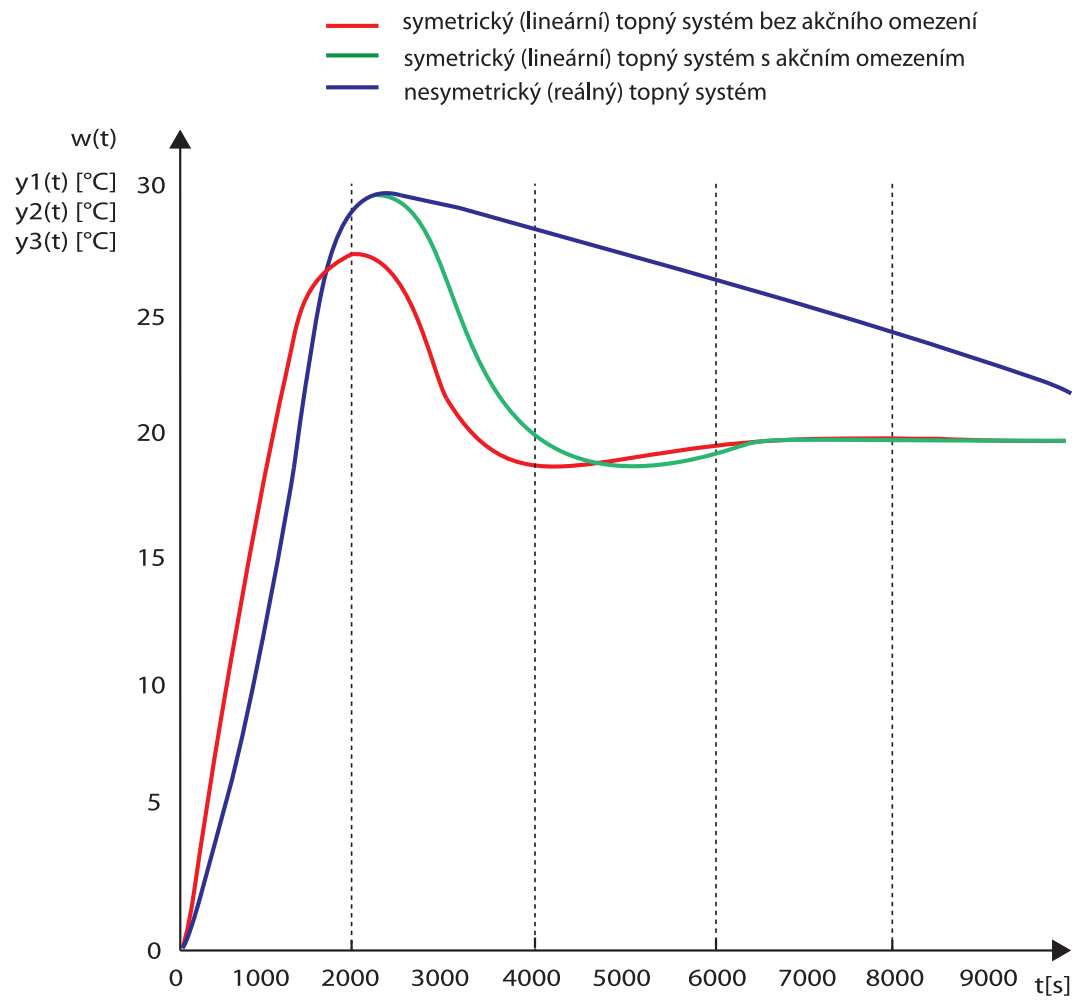
Připomeňme, že průběh regulačního procesu bude jiný nejen pro různé hodnoty parametrů regulátoru, ale i pro jiné vlastnosti regulované soustavy a při jejich změnách se může velmi lišit. Pro ten případ jsou velmi výhodné adaptivní regulátory, které se přizpůsobují změnám soustavy a podle nich mění nastavení svých parametrů (autotuning). Užitečné jsou i robustní regulátory, které sice své nastavení nemění, ale zajišťují dostatečně kvalitní regulační proces i při měnících se vlastnostech soustavy.



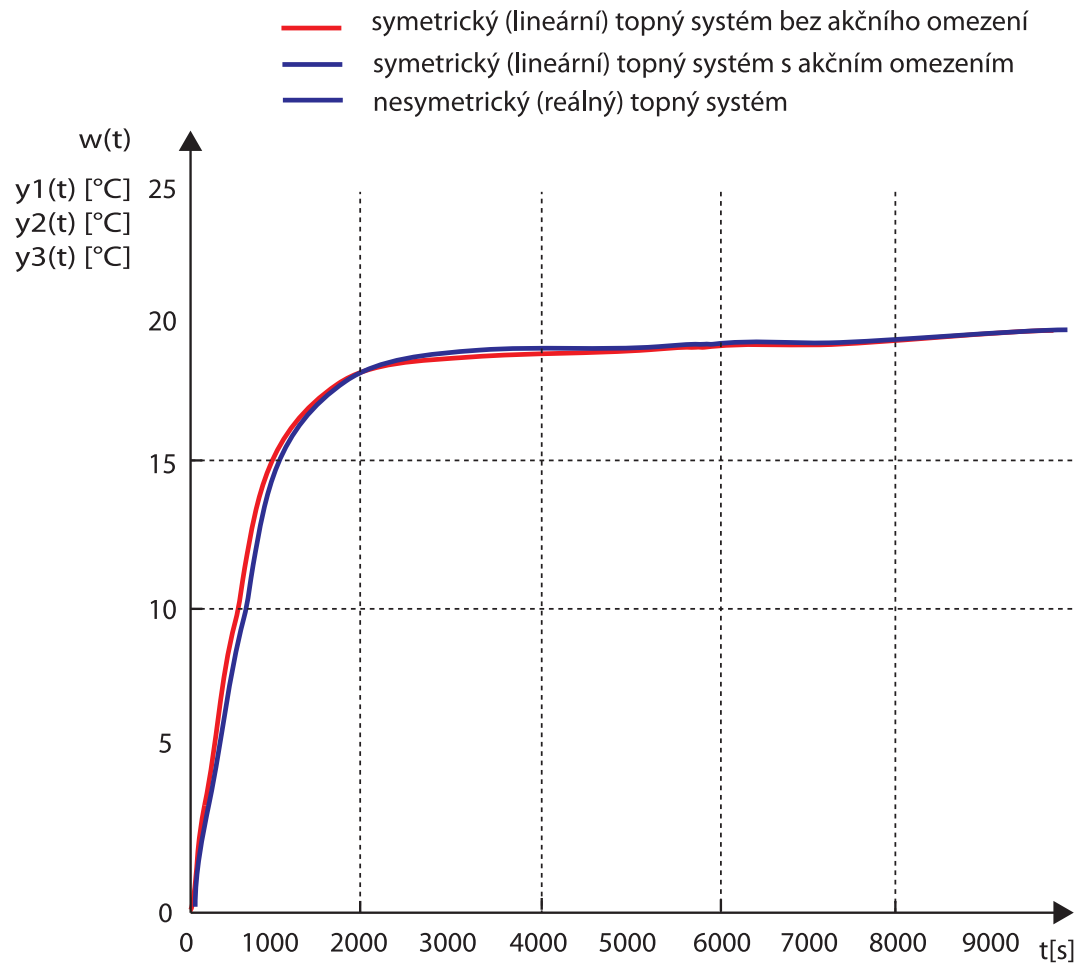
Obr. 8.21: Ukázka regulačního procesu (přechodové charakteristiky) s regulátorem PID



Obr. 8.22: Ukázka regulačního procesu pro 3 typy soustav – s jedním překmitem



Obr. 8.23: Ukázka regulačního procesu pro 3 typy soustav – bez překmitu



Obr. 8.24: Ukázka regulačního procesu pro 3 typy soustav – rychlý kmitavý

9.8 Realizace číslicových regulátorů

Realizace číslicových regulátorů v programovatelných automatech vyžaduje analogové výstupy pro akční veličinu. Tato konfigurace je ale dražší, než s binárními výstupy. Ještě dražší bývá převedení spojitě akční veličiny na potřebnou výkonovou úroveň nutnou k ovládní spojité akční veličiny (obvykle výkonových zesilovačů a frekvenčních měničů nebo regulátorů pro servopohony). Proto jsou v praxi často používány nespojitě regulátory. Zjednodušuje se (nebo odpadá) problém volby parametrů a systém vystačí s binárními výstupy. K ovládní akčních členů obvykle stačí jen relé, stykače, elektromagnetické spojky, elektropneumatické převodníky, nespojitě ovládané regulační ventily apod.

Kvalita průběhu regulačních pochodů s nespojitými regulátory bývá sice horší, než se spojitými číslicovými, ale bývá postačující pro obvyklé regulační úlohy (někdy je rozdíl nerozlišitelný). Nepříjemným důsledkem nespojitosti regulátorů může být kmitavý charakter regulačních dějů nebo časté změny akčních zásahů.

Kompromisem mezi oběma typy jsou regulátory, které jsou vnitřně realizovány jako číslicové (obvykle lineární PI nebo PID) a číselná hodnota akční veličiny je následně převedena na třístavový nebo vícestavový výstupní signál, který je z PLC předáván jako kombinace binárních výstupů. Spojitému charakteru regulátoru se pak lze přiblížit dávkováním akčních zásahů v závislosti na hodnotě akční veličiny, např. impulsy s proměnnou šířkou (šířková modulace) nebo proměnnou frekvencí impulzů shodné délky (frekvenční modulace).