

Obsah

1	Regulační obvod	1
1.1	Základní definice, spojitý regulační obvod.....	1
1.2	Diskrétní regulační obvody.....	2
1.3	Přesnost regulace, typy regulačních obvodů.....	4
2	Regulátory	5
2.1	Spojité lineární regulátory.....	6
2.1.1	Proporcionální regulátor (regulátor P).....	6
2.1.2	Regulátor I.....	6
2.1.3	Regulátor PI.....	6
2.1.4	Regulátor PD.....	7
2.1.5	Regulátor PID.....	8
2.2	Diskrétní lineární regulátory.....	10
2.3	Kombinované lineární regulátory.....	10
2.4	Nelineární a spínací regulátory.....	11
2.5	Impulsní regulátory.....	12
2.6	Omezení výstupu, windup.....	14
2.7	Beznárazové zapojení.....	14
3	Analýza polohy pólů regulačního obvodu	15
3.1	Spojité regulační obvod.....	15
3.2	Kriteria hodnocení regulačního obvodu v časové oblasti.....	16
3.2.1	Okamžik prvního maxima a překmit přechodové charakteristiky.....	17
3.2.2	Doba zpoždění a doba náběhu.....	18
3.2.3	Doba regulace.....	18
3.3	Diskrétní regulační obvod.....	18
3.4	Geometrické místo kořenů.....	19
3.4.1	Konstrukce geometrického místa kořenů pro zápornou zpětnou vazbu.....	21
3.4.2	Grafická konstrukce geometrického místa kořenů pro „kladnou zpětnou vazbu“.....	23
3.4.3	Příklady.....	23
3.4.3.1	„Záporná“ zpětná vazba.....	23
3.4.3.2	„Kladná“ zpětná vazba.....	24
3.4.3.3	Vliv polohy nuly regulátoru na tvar GMK, různá výsledná postavení pólů uzavřené smyčky.....	24
4	Stabilita lineárního regulačního obvodu	26
4.1	Stabilita v otevřené smyčce.....	26
4.2	Stabilita v uzavřené smyčce – Nyquistovo kritérium.....	27
4.2.1	Příklad 1: systém, stabilní v otevřené smyčce.....	28
4.3	Míry stability v Nyquistově kritériu.....	29
4.4	Pomocné triky a výpočetní program pro Nyquistovo kritérium.....	29
4.4.1	Zjednodušení Nyquistova kritéria.....	31
4.4.2	Příklad 2 (podmíněně stabilní systém).....	31
4.5	Nyquistovo kritérium pro diskrétní systémy.....	32
5	Frekvenční analýza regulačního obvodu.....	32
5.1	Vztah mezi frekvenční charakteristikou otevřeného a uzavřeného regulačního obvodu.....	32
5.2	Nicholsův diagram.....	33
6	Frekvenční syntéza regulačního obvodu	34
6.1	Úprava zesílení v otevřené smyčce.....	34
6.2	Nastavení regulátoru PD.....	35
6.2.1	Příklad.....	36
6.3	Nastavení regulátoru PID.....	36
6.3.1	Příklad.....	37
7	Syntéza polohy pólů regulačního obvodu.....	40
7.1	Předepsaná konfigurace predominantních pólů.....	40
7.1.1	Příklady.....	41
7.1.1.1	Soustava třetího řádu, regulátor se dvěma konstantami (funkce $pkpp3$).....	41



7.1.1.2	Soustava čtvrtého řádu, regulátor se třemi konstantami (funkce <i>pkpp4</i>)	41
7.1.1.3	Soustava pátého řádu, regulátor se čtyřmi konstantami (funkce <i>pkpp5</i>).....	42
7.1.1.4	Regulace statické soustavy s regulátorem s dvojí integrací	42
7.1.1.5	Příklad nevhodného výsledku.....	43
7.2	Zobecnění předepsané konfigurace predominantních pólů.....	44
7.2.1	Příklady.....	44
7.2.1.1	Výpočet konstant regulátoru pomocí soustavy rovnic a nerovností - soustava čtvrtého řádu, regulátor se dvěma konstantami, jeden volný pól (funkce <i>pkpp42</i>).....	44
7.2.1.2	Numerický příklad.....	45
7.2.1.3	Zkusmé hledání předepsané konfigurace pomocí funkce <i>rltool</i>	45
7.3	Obecné umístění pólů.....	46
7.3.1	Příklady.....	49
7.3.1.1	Diskrétní systém, minimum počtu kroků, slabá verze	49
7.3.1.2	Diskrétní systém, minimum počtu kroků, silná verze.....	50
7.3.1.3	Spojité systém.....	51
7.3.2	Diofantická rovnice	52
8	Klasické metody syntézy lineárního regulačního obvodu	53
8.1	Empirické metody seřizování regulátorů	53
8.1.1	Ruční seřízení regulátoru.....	53
8.1.2	Metoda Zieglera a Nicholse.....	54
8.2	Integrální kritéria	54
8.2.1	Metoda minima lineární regulační plochy	55
8.2.1.1	Příklad – minimalizace lineární regulační plochy.....	55
8.2.1.2	Cvičení.....	56
8.2.2	Metoda minima kvadratické regulační plochy.....	56
8.2.3	Metoda ITAE.....	56
8.3	Optimální modul.....	56
8.3.1	Příklad.....	57
9	Stabilita nelineárního regulačního obvodu.....	58
9.1	Některé pojmy z oblasti stability	58
9.1.1	Asymptotická stabilita rovnovážného stavu systému	58
9.1.2	Neutrální stabilita.....	58
9.1.3	Definice stability v závislosti na počátečních podmínkách	59
9.1.3.1	Definice: stabilita v malém	59
9.1.3.2	Definice: stabilita v dané oblasti (praktická stabilita).....	59
9.1.3.3	Definice: stabilita ve velkém (globální stabilita)	59
9.1.4	Stabilita periodického řešení.....	59
9.1.5	Stabilita buzeného systému.....	60
9.2	Ljapunovova teorie stability	60
9.2.1	Ljapunovova funkce	60
9.2.1.1	Definice: Ljapunovova funkce.....	61
9.2.2	Ljapunovovo kritérium stability	61
9.2.2.1	Teorém: stabilita v malém.....	61
9.2.2.2	Teorém: asymptotická stabilita v definované oblasti Ω	61
9.2.2.3	Teorém: asymptotická stabilita ve velkém.....	62
9.2.2.4	Absolutní stabilita	62
9.2.3	Generování Ljapunovovy funkce.....	62
9.2.3.1	Generování Ljapunovových funkcí pro lineární autonomní systémy	62
9.2.3.2	Generování Ljapunovovy funkce pro nelineární autonomní systém - příklad	62
9.3	Popovovo kritérium	63
9.3.1	Formulace problému.....	63
9.3.2	Formulace a použití Popovova kritéria.....	64
9.3.2.1	Teorém: Popovovo kritérium stability s jednoznačnou časově invariantní nelinearitou.....	64
9.3.2.2	Grafická formulace kritéria v komplexní rovině.....	64
9.3.2.3	Příklad.....	65
9.3.2.4	Popovovo kritérium a Ajzermanova hypotéza	65
9.4	Metoda harmonické rovnováhy	66
9.4.1	Příklad: harmonická rovnováha pro dvoupolohový regulátor a statickou regulovanou soustavu.....	66
9.5	Ekvivalentní přenos	67
9.5.1	Ekvivalentní přenosy některých nelineárních prvků.....	68
9.5.1.1	Třípolohový člen s hysterezí.....	68

9.5.1.2	Dvoupolohový člen s hysterezí	68
9.5.1.3	Lineární člen s omezením	69
9.5.1.4	Dvoupolohový člen bez hystereze.....	69
9.5.2	Příklad použití metody ekvivalentního přenosu.....	69
9.5.3	Ekvivalentní přenos periodicky buzeného systému a systému s více nelinearitami	70
10	Syntéza nelineárního regulačního obvodu	71
10.1	Linearizace spínacího regulátoru – ustálený stav	71
10.2	Linearizace spínacího regulátoru – trvalé kmity	71
10.3	Syntéza pomocí ekvivalentního přenosu	72
11	Rozvětvené regulační obvody	72
11.1	Rozvětvené regulační obvody s pomocnou regulovanou veličinou	72
11.1.1	Příklad: výkonový servomechanismus.....	73
11.1.2	Příklad: regulace průtočné vodní elektrárny	73
11.1.2.1	Běh naprázdno	74
11.1.2.2	Zapojení do sítě, dostatek vody.....	75
11.1.2.3	Zapojení do sítě, nedostatek vody	75
11.1.2.4	Zapojení do samostatné zátěže, nepřetížený generátor, dostatek vody	75
11.1.2.5	Zapojení do samostatné zátěže, přetížený generátor nebo nedostatek vody.....	75
11.1.2.6	Náhlé odpojení zátěže	75
11.1.2.7	Korektory výkonu	75
11.2	Rozvětvené regulační obvody s pomocnou akční veličinou.....	76
11.2.1	Příklad: výměník tepla.....	76
11.2.2	Pomocná akční veličina s vlastním zdrojem energie	76
11.3	Rozvětvené regulační obvody s měřením poruchové veličiny – invariance.....	76
11.4	Rozvětvené regulační obvody s modelem.....	77
11.4.1	Rozvětvený regulační obvod s kompenzací dopravního zpoždění	77
11.4.2	Rozvětvený regulační obvod se vzorovým modelem	78
12	Mnoharozměrové regulační obvody	78
12.1	Základní vztahy	78
12.2	Autonomnost mnoharozměrového regulačního obvodu.....	79
12.2.1	Příklad: odvození vzorců pro diagonalizaci přenosu 2×2	79
12.2.2	Příklad: konkrétní diagonalizace přenosu 2×2 , experimentální program.....	80
12.2.3	Příklad: autonomní regulace tlaku a teploty páry parního kotle	81
13	Citlivost a robustnost regulačního obvodu	82
13.1	Citlivostní funkce	82
13.1.1	Základní pojmy	83
13.1.2	Druhy citlivostních funkcí	83
13.1.3	Citlivostní funkce v časové oblasti	84
13.1.3.1	Výstupní citlivostní funkce	84
13.1.3.2	Stavová citlivostní funkce	84
13.1.4	Citlivostní funkce ve frekvenční oblasti	85
13.1.4.1	Bodeho citlivostní funkce	85
13.1.4.2	Horowitzova citlivostní funkce	85
13.1.4.3	Horowitzova citlivost přenosu uzavřeného zpětnovazebního obvodu	86
13.1.4.4	Citlivostní funkce kořenů charakteristické rovnice	86
13.2	Citlivostní operátory.....	87
Cruz - Perkinsův citlivostní operátor.....	87	
13.3	Robustnost regulačního obvodu.....	88
13.3.1	Příklad: lineární systém	88
13.3.2	Příklad: nelineární systém s pomocnými regulovanými veličinami	90
13.3.2.1	Zadání úlohy	90
13.3.2.2	Rozvaha.....	91
13.3.2.3	Lineární řešení.....	91
13.3.2.4	Nelinearity v regulátoru	93
Rejstřík.....	95	
Literatura.....	97	