

Studentův průvodce po automatickém řízení

Michael Šebek

volně podle Denise Bernsteina¹, inspirován také Douglasem Adamsem²

K čemu je automatické řízení

Automatické řízení je „záračná“ technologie: Pomocí zpětné vazby zlepšuje chování široké škály systémů od parního stroje po vesmírnou stanici. To Wattův regulátor zkontroloval parní stroj a nastartoval průmyslovou revoluci. Zpětnou vazbu užíváme všichni a pořád: Je-li voda ve sprše moc horká, otočíme kohoutkem studené. Řízení zpětnou vazbou najdeme opravdu všude: v televizorech (zesilovače), CD přehrávačích (sledování laserem), autech (řízení rychlosti, motoru, brzdění a pérování), letadlech (autopilot a zvýšení stability), kosmických lodích (řízení směru a navádění), obráběcích strojích, robotech, elektrárnách, při zpracování materiálů a v mnoha jiných aplikacích.

Mnohdy je automatické řízení dokonce „umožňující“ technologií: Bez něj by systém prostě vůbec nefungoval. Zpětná vazba také reguluje prakticky všechny systémy v lidském těle a bez přerušení pracuje v systémech ekologických. Ale dál už nezabíhejme.

Je to snadné nebo obtížné?

Na první pohled vypadá automatické řízení přímočaře a jednoduše, ale ve skutečnosti takové není. I když mnohé nabízí a umožňuje, je to předmět ohromně komplikovaný a rafinovaný, v teorii i v praxi. Tak rafinovaný je hlavně proto, že změny chování dynamického systému nedocílíme okamžitě: Když je sprcha tak vařící, že se jí nemůžeme ani dotknout, to už je pozdě zavírat horkou vodu. Přejde-li jinak správné řídicí rozhodnutí v nesprávný čas, může způsobit katastrofu. Počítat s tímhle a s mnoha dalšími efekty, právě o tom je obor automatické řízení. Jeho základy probíráme v předmětu Automatické řízení. Pokročilé předměty přijdou později v magisterském programu Kybernetika a řízení.

Kdo by si měl tohle přečíst?

Protože je řízení tak složitý předmět, studenti často pro stromy nevidí les. Tento Průvodce má pomoci bakalářským i magisterským studentům. Bakalářští studenti si mohou Průvodce prohlédnout na začátku kurzu Automatické řízení, aby zhruba viděli, co je čeká. Jaké pojmy, problémy a terminologii mají před sebou. Později, během semestru, mohou do Průvodce občas nahlížet. Na konci kurzu jim Průvodce pomůže při opakování před závěrečnou zkouškou. Magisterským studentům poskytne před nástupem kurzů moderního řízení rychlé opakování, které jim umožní pohlédnout na dříve nabyté znalosti ze správné perspektivy.

¹ D. S. Bernstein: A Student's Guide to Classical Control. IEEE Control Syst. Mag., vol. 17, pp. 96-100, Aug. 1997.

² D. Adams: Stopařův průvodce po galaxii. Česky ARGO 2002.

0. Nepochybně panice!

Podle Douga Adamse „Existuje teorie, která tvrdí, že kdyby jednou někdo přišel na to, k čemu vesmír je a proč tu je, vesmír by okamžitě zmizel a jeho místo by zaujalo něco ještě mnohem bizarnějšího a nevysvětlitelnějšího. Existuje jiná teorie, která tvrdí, že už se stalo.“

1. Zpětná vazba je všudypřítomná!

Interakce jakýchkoli dvou systémů skoro vždy obsahuje *zpětnou vazbu*. Jeden systém reaguje na systém na druhý a naopak. To jednosměrná interakce, *kaskáda*, je výjimečným případem. Třetí Newtonův zákon vyjadřuje zpětnou vazbu: Jestliže A působí silou na B, pak B v reakci naopak působí silou na A. Propojíte-li dva elektrické obvody navzájem mezi sebou, pak každý z nich ovlivní ten druhý. A Kirchhoffovy zákony určují, jaká ta interakce je.

2. Blokový diagram není obvodové schéma!

Blokové diagramy pomáhají pochopit zpětnou vazbu. Nesmíte si je ale plést s obvodovými schémata. Je užitečné, když umíte obvodová schémata převést na blokové diagramy. Takový převod vyžaduje vyjádřit impedance a admitance jako systémy, jejichž vstupy a výstupy jsou napětí a proudy. Pamatujte ale, že **šipky mezi bloky v blokovém diagramu nejsou dráty**. Podobně užitečné je převést mechanické systémy do blokových diagramů se silami, polohami, rychlostmi a zrychleními s bloky reprezentujícími kinematiku a dynamiku.

3. Má být model složitý nebo jednoduchý?

Reálný systém bývá velmi složitý. Proto se omezíme jen na ty jeho vlastnosti, které nás zajímají a ty popíšeme modelem. Pokud náš model věrně popisuje vše zajímavé, je pořád ještě dost složitý. Takové modely používáme pro simulace a ověřování. Mají být co nejvěrnější, aby se na nic nezapomnělo. Pro návrh řízení musíme naopak použít jednodušší model, abychom vůbec něco spočítali. Tento jednoduchý model naopak popisuje na systému jen to nejpodstatnější. *V praxi potřebujeme oba typy modelů: ty věrné i ty jednoduché.*

4. Model časový nebo frekvenční?

Každou změnu můžeme popsat buď pomocí času („každé pondělí“) nebo pomocí frekvence („jedenkrát týdně“). Proto systémy můžete modelovat v čase nebo ve frekvenci. Model v časové oblasti (diferenciální nebo diferenční rovnice, stavové rovnice) říká, jaký bude časový průběh výstupu, poté, co na vstup přivedete signál určitého tvaru v čase. Model ve frekvenční oblasti (frekvenční přenos) říká, jaká bude amplituda a fáze výstupního sinusového signálu, když na vstup přivedete sinusový signál určité amplitudy. To má smysl, jen když je frekvence na výstupu stejná jako na vstupu. Frekvenční popis má proto smysl jen pro lineární model. Nelineární systémy mění

nejen amplitudu, ale i tu frekvenci. Variantou frekvenčního popisu je popis operátorový (přenos v Laplaceově nebo z-transformaci).

5. Model vnější nebo vnitřní?

Vnější model (přenos, diferenciální rovnice) popisuje signály, které jsou na systému *vidět zvenku*. Říká, jaká bude výstupní odezva na určitý vstup. Vnitřní signály systému – jeho stavy – tě přitom nezajímají. Naopak *vnitřní model* (stavové rovnice) popisuje i *vnitřní stavy*, tj. veličiny, které zvenku vidět nejsou. I když vnitřní veličiny zvenku přímo nevidíme, většinou je můžeme z těch venkovních vypočítat.

6. Není porucha jako porucha

Na každý reálný systém působí jeho okolí a vy mu v tom nemůžete přímo zabránit. Na plovoucí loď působí vlny, vítr a vodní proudy. Takové vnější veličiny nemůžete přímo ovlivnit. Musíte je ale při řízení vzít v úvahu a třeba se vám povede jejich vliv eliminovat nebo alespoň potlačit. Protože vás při řízení ruší, říkáme jim *rušení*, *rušící veličiny*, a v klasickém českém názvosloví také *porucha*. To je trochu nešťastné, protože slovo *porucha* může často znamenat i něco jiného: totiž že „se něco porouchalo, rozbilo.“ Takže pozor, nepleťte to, není *porucha jako porucha*. A snažte se vliv rušení potlačit, aby nezpůsobilo poruchu.

7. Urči ekvilibria a linearizuj!

Ekvilibrium je stav, ve kterém by systém zůstal, kdyby ho nic zvenku nevyrušovalo. Ekvilibrium může být *nestabilní* (vajíčko stojící na špičce), *neutrálně stabilní* (kniha ležící na stole) nebo *stabilní* (kulička na dně důlku). U systému řízeného zpětnou vazbou ekvilibriu říkáme *pracovní bod*.

Reálné systémy jsou většinou *nelineární*. Postupem zvaným *přibližná linearizace* ale můžeme vytvořit *linearizovaný* model, který aproximuje nelineární systém v okolí pracovního bodu. Tím dostaneme lineární systém s ekvibiem v nule, což odpovídá ekvilibriu původního nelineárního systému a popisuje odchylky od něj. I když jsou linearizované modely jen aproximacemi, jsou vhodné pro analýzu a dávají dostatečný náhled na chování nelineárního systému v blízkosti ekvilibria. Když je nulové ekvilibrium lineárního systému stabilní, pak je většinou ekvilibrium původního nelineárního systému *lokálně stabilní*. Pokud neřekneme jinak, budeme nadále uvažovat jen linearizované modely systému.

8. Nejdřív ověřte stabilitu!

Jakmile máte linearizovaný model, musíte ověřit stabilitu. Stabilita znamená, že libovolné počáteční podmínky systému postupně odeznějí do nuly. A také že efekt každé poruchy konečného trvání také postupně vymizí.

Na stabilitu se můžete ptát u každého systému, ať už je neřízený (s vypnutým řízením) nebo je v uzavřené smyčce (řízen zpětnou vazbou). Je-li systém popsán *přenosem*, pak kořeny polynomu

v jeho jmenovateli (nazývané *póly*) ukazují, jestli je stabilní a tedy, za určitých podmínek, jestli je ekvilibrium nebo *pracovní bod* původního systému stabilní. Stabilitu můžete testovat buď přímo výpočtem kořenů tohoto polynomu, nebo nepřímo použitím Routhova kritéria na jeho koeficienty. Máte-li systém popsán ve *stavovém tvaru*, můžete pro explicitní test stability vypočítat vlastní čísla *matice dynamiky* (stavové matice).

9. Stabilní systémy mají frekvenční charakteristiku

Mnoho metod pro analýzu řídicích systémů vychází z frekvenční charakteristiky. Významu frekvenční charakteristiky porozumíte, když si uvědomíte *důležitou vlastnost lineárních systémů*: Představte si, že na vstup stabilního lineárního systému s přenosem $G(s)$ přivedete (jako buzení) sinusový (nebo harmonický) signál s frekvencí ω . Pak, po odeznění přechodového chování, bude mít výstupu sinusový signál o stejné frekvenci, jako je frekvence vstupu. Tento limitní sinusový pohyb se nazývá *harmonická ustálená odezva*. Všimněte si ale, že ten výstup nemá limitu v obvyklém matematickém smyslu, jelikož se harmonická ustálená odezva neblíží konstantní hodnotě. Přechodové chování systému, tedy před tím, než dosáhne harmonické ustálené odezvy, závisí na pólech a *nulách* systému a také na počátečních podmínkách jeho vnitřních stavů. Poměr amplitudy harmonické ustálené odezvy k amplitudě sinusového vstupního signálu je rovný absolutní hodnotě neboli *zesílení* přenosové funkce vyhodnocené pro frekvenci ω , tj. $|G(j\omega)|$, zatímco fázový posun neboli *fáze* harmonické ustálené odezvy vzhledem k fázi vstupu je dána fázovým úhlem přenosové funkce vyhodnocený pro vstupní frekvenci, tj. arkus tangentou hodnoty $ImG(j\omega)/ReG(j\omega)$.

10. Jaký je rozdíl mezi Bodeho a Nyquistovým grafem?

Oba ukazují totéž, frekvenční odezvu, ale každý jinak. Oba ukazují zesílení a fázi přenosu $G(\omega j)$ pro každou frekvenci ω v rozsahu frekvencí. *Bodeho graf* kreslí zvlášť zesílení a zvlášť fázi, jako funkce frekvence. Pozor na jednotky, bývají různé: lineární nebo logaritmické, v absolutních hodnotách nebo v decibelech. *Nyquistův graf* kreslí obojí dohromady, je to polární graf v komplexní rovině.

Protože se nestabilní systémy nikdy neustálí, nemůžeme jejich frekvenční charakteristiku naměřit. Přesto i pro ně můžeme tyto grafy formálně nakreslit. Někdy je užitečné i těmto grafům říkat frekvenční odezva, i když systém není stabilní.

11. Nezapomeňte na přenos otevřené smyčky!

Rozpojením smyčky zpětnovazebního systému dostanete *přenos otevřené smyčky*, což je součin všech přenosů ve smyčce včetně soustavy, senzoru, regulátoru a aktuátoru. Vždycky si uvědomte, jestli je přenos otevřené smyčky stabilní nebo ne. Zesílení a fáze přenosu otevřené smyčky pro danou frekvenci se říká *zesílení smyčky* a *fáze smyčky*. Tyto hodnoty se definují, *ať už je přenos otevřené smyčky stabilní nebo ne*.

Všimněte si, že i když je přenos otevřené smyčky stabilní, nemusí z toho plynout, že bude stabilní systém s uzavřenou smyčkou. Naopak, i když je přenos otevřené smyčky nestabilní, nemusí nutně být nestabilní systém s uzavřenou smyčkou. Stabilitu zpětnovazebního systému s uzavřenou

smýčkou testujeme výpočtem pólů zpětnovazebního systému nebo užitím Routhova kritéria na uzavřenou smýčku. Je-li zpětnovazební systém stabilní, obsahuje přenos uzavřené smýčky *funkci citlivosti*, které je *jedna lomeno jedna plus přenos otevřené smýčky*.

12. Rozlišujte otevřenou smýčku od uzavřené!

Návrhem řízení se snažíte zajistit vhodný přenos (tvar frekvenční charakteristiky) *uzavřené smýčky*. Bohužel přímo měnit můžete jen přenos *smýčky otevřené*. Pozor na to! Uzavřením smýčky se mnohé mění: třeba poloha nul a pólů nebo i stabilita. Frekvenční charakteristika uzavřené smýčky se dá ze smýčky otevřené odhadnout jen pro malé a pro vysoké frekvence. Ve středním pásmu to jednoduše nejde, tam je vztah k systému s uzavřenou smýčkou relativně složitý.

Naštěstí třeba stabilitu uzavřené smýčky můžete analyzovat *nepřímo* pomocí přenosu otevřené smýčky. To vám umožňuje *Nyquistovo kritérium* a metoda *root locus* (geometrické místo kořenů).

13. Naučte se Nyquistovo kritérium!

Z tvaru citlivostní funkce je intuitivně jasné, že frekvenční odezva přenosu otevřené smýčky se nikdy nesmí rovnat -1 , aby mohla být uzavřená smýčka stabilní. Nyquistovo kritérium ukazuje přesně, jak se musí frekvenční odezva otevřené smýčky této kritické hodnotě vyhnout. Toto kritérium používá Nyquistův graf, tj. polární graf přenosu otevřené smýčky. Jeho argument sleduje konturu, která obsahuje imaginární osu, vyhne se pólům otevřené smýčky na imaginární ose a ohradí celou pravou polorovinu.

Nyquistovo kritérium konkrétně říká, že zpětnovazební systém je stabilní, když a jen když tento polární graf přenosu otevřené smýčky, obkrouží **kritický bod $-1+j0$** právě tolikrát proti směru hodinových ručiček, kolik je nestabilních pólů přenosu otevřené smýčky. Ať už jsou to póly soustavy nebo regulátoru.

Všimněte si, že Nyquistův graf může obkroužit kritický bod $-1+j0$, jen když je zesílení otevřené smýčky v určitém frekvenčním rozsahu větší než jedna. Takže stabilizace zavádí minimální požadavek na zesílení otevřené smýčky v určitém frekvenčním rozsahu. Z něj pak omezení na zesílení regulátoru, které závisí na zesílení soustavy.

14. Pohrajte si s procedurou root-locus!

Procedura root locus neanalyzuje otevřenou smýčku ale uzavřenou. Ukazuje umístění pólů uzavřené smýčky pro všechny hodnoty *konstantního zesílení ve zpětné vazbě*. Pro malé zesílení leží póly uzavřené smýčky poblíž pólů přenosu otevřené smýčky. Jak zesílení roste do nekonečna, konvergují k nulám přenosu otevřené smýčky anebo se pohybují do nekonečna podél asymptot. Takže neminimálně fázový systém, to je systém s alespoň jednou nestabilní nulou, můžete velkým konstantním zesílením v zpětné vazbě destabilizovat. Navíc z asymptot vidíte, že systém s relativním řádem (převahou pólů nad nulami) alespoň tři můžete velkým zesílením ve zpětné vazbě destabilizovat také.

15. Po stabilitě, chování je všechno!

Jakmile zajistíte stabilitu, chování systému je to hlavní! Ve skutečnosti pro soustavy stabilní v otevřené smyčce je úprava chování *jediným* důvodem pro zpětnovazební řízení. Základní kritéria na chování zahrnují schopnost sledovat nebo potlačit signály jako skoky, rampy, sinusovky a šумы (náhodné signály). Dobré chování obecně vyžaduje velké zesílení ve smyčce, z čehož plyne malé zesílení funkce citlivosti. To redukuje chybu sledování nebo potlačuje vliv rušení. Bohužel, *Bodeho integrální věta* vám říká, že pro žádný reálný řídicí systém nemůže být funkce citlivosti menší než jedna současně pro všechny frekvence.

16. Perfektní chování můžete dosáhnout asymptoticky!

V extrémních případech můžete asymptoticky dosáhnout perfektního sledování nebo potlačení vlivu poruchy. Potřebujete na to nekonečné zesílení otevřené smyčky a tedy nulovou citlivost na frekvencích rušení. Obvykle použijete integrální regulátor, který má nekonečné stejnosměrné zesílení (tedy to na nulové frekvenci), takže asymptoticky sleduje skokový referenční signál nebo potlačuje skokový rušící signál. Podobně můžete asymptoticky přesně sledovat nebo potlačit sinusový signál pomocí nekonečného zesílení regulátoru na frekvenci poruchy (je-li známa). Protože v sobě takový regulátor obsahuje model referenčního signálu nebo poruchy, je to zvláštní případ *principu vnitřního modelu*. Nezapomeňte pro takový regulátor s nekonečným zesílením ještě zkontrolovat stabilitu uzavřené smyčky.

17. Zkuste vést zpětnou vazbu od stavů

Nemusíte používat jen klasický dynamický regulátor se zpětnou vazbou z výstupu. Pokud můžete měřit i všechny stavové veličiny, tak se nabízí stavová zpětná vazba. Stavový regulátor je v něčem složitější (má více vstupů a jeden výstup) a v něčem jednodušší (není dynamický, ale jen statický). Ale pozor: stavová zpětná vazba se vede od stavů a ne z výstupu.

Pokud všechny stavy měřit nejde, můžete je zkusit odhadnout pomocí pozorovatele. Pak už byste zpětnou vazbu nevedl od stavů soustavy, ale od stavů toho pozorovatele. Dohromady to dává dynamický regulátor s výstupní zpětnou vazbou.

18. Jak umístit póly?

Ze specifikace požadovaného chování můžete často určit, v jakých polohách mají ideálně ležet póly uzavřené smyčky. Zkuste najít regulátor, který je přesně tam umístí. To už je dneska také klasika. Můžete navrhnout buď stavovou zpětnou vazbu stavovými metodami anebo dynamický výstupní regulátor pomocí polynomiální rovnice.

19. Při neurčitostech zajistěte nominální stabilitu!

Máte-li v modelu nezanedbatelnou neurčitost, tak zajistěte alespoň nominální stabilitu. Vše, co jsme dosud řekli o stabilitě a chování, platilo za předpokladu, že linearizovaný model je přesnou reprezentací soustavy v okolí ekvilibrí. Protože jsou všechny reálné systémy nelineární, raději přistupujte k lineární aproximaci s vědomím, že obsahuje *neurčitost modelování*. Tedy to, o čem jsme zatím mluvili, byl jen *nominální model* soustavy. Všechny testy stability, ať už přímé či nepřímé, můžeme aplikovat na nominální model a ověřit *nominální stabilitu*.

20. Co zaručí robustní stabilitu?

Robustní stabilita znamená stabilitu všech lineárních modelů v rozsahu neurčitosti. V principu ji můžete ověřit testováním stability všech jednotlivých modelů neurčitého systému. Je to ale bohužel těžká práce. K testování robustní stability neurčitého modelu ve frekvenční oblasti, který měří velikost neurčitosti pro každou frekvenci, raději použij Nyquistovo kritérium. Obecně je neurčitost větší na vysokých frekvencích a většinou znáte lépe zesílení smyčky než její fázi.

21. Nyquistovo kritérium pomůže určit robustní stabilitu!

Počet obkroužení Nyquistova grafu přenosu otevřené smyčky kolem kritického bodu $-1+j0$ je klíčovým testem nominální stability uzavřené smyčky ve frekvenční oblasti. Jakmile je počet obkroužení správný pro nominální stabilitu, určuje vzdálenost Nyquistova grafu přenosu otevřené smyčky od kritického bodu $-1+j0$ robustní stabilitu frekvenčního neurčitého modelu. Tato vzdálenost je převrácenou hodnotou zesílení funkce citlivosti. Takže, malá citlivost pro danou frekvenci odpovídá velké vzdálenosti Nyquistova grafu přenosu otevřené smyčky od kritického bodu $-1+j0$ a tedy robustní stabilitě na této frekvenci.

22. Bezpečnost aneb jak moc je stabilita robustní

Bezpečnost v zesílení (Gain Margin, odstup v zesílení) měří robustní stabilitu pro frekvence, na kterých je fáze 180° . To kvantifikuje robustní stabilitu pro případ *perturbací čistě v zesílení* přenosu otevřené smyčky a nikde jinde. Naopak *bezpečnost ve fázi* (Phase Margin, odstup fáze) měří robustní stabilitu pro frekvence, na kterých je zesílení přenosu otevřené smyčky jednotkové (to jsou takzvané *přechodové frekvence*). Tak kvantifikuje robustní stabilitu pro případ *perturbací čistě ve fázi* přenosu otevřené smyčky a nikde jinde.

K určení bezpečnosti v zesílení a ve fázi můžete použít Nyquistův graf. Uvědomte si, že pokud má přenos otevřené smyčky neminimální fázi, tak má zpětnovazební systém omezenou bezpečnost v zesílení. To je zřejmé, jakmile si představíte root-locus. Podobně, má-li pro některé frekvence přenos otevřené smyčky zesílení větší než 1, pak má zpětnovazební systém omezenou bezpečnost ve fázi. To je zřejmé z Nyquistova grafu. Nikdy ale nezapomeňte, že vzdálenost Nyquistova grafu od kritického bodu $-1+j0$ je nepodstatná, pokud je počet obkroužení nesprávný,

tedy, pokud neplatí nominální stabilita. Proto není použití velkých zesílení regulátoru vždycky schůdnou strategií řízení.

23. Vždycky chraňte fázi!

Protože kritický bod leží ve $-1+j0$, je každý zpětnovazební systém nejdále 180° od nestability na každé přechodové frekvenci. Jen si to představte v Nyquistově grafu. A těchto 180° není zrovna moc, zvláště na vysokých frekvencích, kde lze systém těžko přesně modelovat a identifikovat a proto je tam fáze přenosu otevřené smyčky nejspíš hodně nepřesná. Každý stupeň fáze přenosu otevřené smyčky na přechodové frekvenci je vzácný a musíš ho udržet pečlivým návrhem. Ještě důležitější je to pro číslicové řízení, kde AD a DA převodníky (vzorkovače a tvarovače) mohou způsobit fázové zpoždění.

24. Dejte pozor na málo tlumené póly!

Nezapomeňte, že každý málo tlumený pár komplexně sdružených pólů soustavy nebo regulátoru má za následek velké zesílení přenosu otevřené smyčky poblíž rezonanční frekvence. A vedle toho i obrovský posun fáze o 180° na malém frekvenčním pásmu. „Důlkem“ ve frekvenční charakteristice regulátoru (pásmovou propustí) můžete toto zesílení na rezonanční frekvenci redukovat a tím pomoci se vyhnout nechtěné změně počtu Nyquistových obkroužení vyvolané neurčitostí. To ale bude fungovat, jen pokud skutečně znáte frekvenci rezonance. Důlek ve frekvenční charakteristice regulátoru s sebou ale nese trochu zhoršené chování ve frekvenčním pásmu vrubu. Ke zvýšení zesílení přenosu otevřené smyčky na frekvencích, kde soustavu přesně znáte, můžete naopak použít kopeček (pásmovou zádrž).

25. Velké zesílení regulátoru mám mnoho výhod!

Když je zesílení regulátoru velké a přitom zesílení samotné soustavy není moc malé, pak bude zesílení otevřené smyčky velké. Z toho plyne malá citlivost a dobré sledování nebo potlačení poruchy. Navíc, pokud je nominální stabilita, velké zesílení znamená velkou vzdálenost od kritického bodu $-1+j0$ a tedy jistou úroveň robustní stability. Mohlo by se tedy zdát, že velké zesílení automaticky dává jak dobré chování, tak robustní stabilitu. Má to ale nejméně tři háčky: *roll-off*, *saturaci* a *šum*.

26. Trénujte bezpečný roll-off!

Nezapomeňte (a tohle nikdy nelze zdůraznit dostatečně), že velké zesílení vám je k ničemu, pokud je počet Nyquistových obkroužení špatný pro nominální stabilitu. Proto nedoporučujeme nekritické používání velkého zesílení regulátoru, ale to už jsme říkali. Když ale nominální stabilita platí, je tu ještě problém *roll-off*: Zesílení každého reálného systému a tedy i zesílení otevřené smyčky, jde *pro vysoké frekvence vždycky asymptoticky k nule*. Jakmile zesílení smyčky poklesne na přechodové frekvenci pod jedničku, pak musíte udržet bezpečnost ve fázi i zesílení, abyste byl dostatečně

daleko od kritického bodu $1+j0$ a tím zajistil robustní stabilitu při neurčitostech v soustavě. Obecně musíte s rostoucí frekvencí zesílení smyčky snížit (skutálet, roll-off) mnohem rychleji, než roste neurčitost.

Pamatujte, že k dosažení dobrého roll off nejde jednoduše přidat regulátoru póly a tím snížit zesílení smyčky. Jak se totiž zesílení smyčky zmenšuje, tak se fáze smyčky zpožďuje (tj. fáze smyčky se zmenšuje) o 90° zpoždění na vysokých frekvencích za každý přidávaný pól. Tedy dobrý roll-off vyžaduje dostatečné snížení zesílení bez hromadění přehnaného fázového zpoždění. Jiná Bodeho integrální věta ukazuje, že většina fázového zpoždění je kvůli rychlosti poklesu zesílení na přechodové frekvenci: strmější pokles způsobuje větší fázové zpoždění.

27. Saturace vás může připravit o všechno

Jako by těch starostí s velkým zesílením smyčky už nebylo dost, je velké zesílení k ničemu, pokud aktuátory nedokáží předat potřebný řídicí signál. Když regulátor požaduje čtyři Newtony a aktuátor může dodat jen dva, tak máte vážný problém. Můžete si to představit, jako by byl Nyquistův graf „zmáčknutý“ vlivem saturace. Bezpečnosti v zesílení i fázi budou sníženy a, což je ještě horší, počet Nyquistových obkroužení se může změnit a uzavřená smyčka bude nestabilní. Je velmi důležité si uvědomit, že neschopnost aktuátoru dodat potřebný řídicí signál není jen vinou moc velkého zesílení regulátoru, ale spíš kvůli velikosti zesílení soustavy amplitudě poruchových signálů.

Má-li poruchový signál velkou amplitudu, může se aktuátor dostat do saturace a vy pak nemáte jinou možnost než snížit zesílení regulátoru a tím obětovat trochu z chování, které chcete (a které bylo tím hlavním důvodem pro zavedení zpětné vazby). Tedy saturace vás může připravit o stabilitu i chování. I když jsme o ní mluvili z pohledu lineární analýzy stability, saturace je ve skutečnosti zvláštním druhem nelinearity.

28. Velké zesílení zesiluje šum

A když váš regulátor s velkým zesílením přežije draka roll off a bestii saturaci, ještě může podlehnout monstru šumu. Zatímco integrátor („ $1/s$ “) má sklon šum vyhladit a ztlumit, diferenciátor („ s “) tíhne k zesílení šumu. Každý pól v přenosu je „jako integrátor,“ každá nula je naopak „jako diferenciátor“. Jak zesílení soustavy klesá, můžete chtít přidat nulu, abyste zvětšil zesílení smyčky pro lepší chování. Podobně můžete přidáním fázového předstihu k přenosu zvýšit bezpečnost ve fázi pro robustní stabilitu. Nuly zařídí obojí za vás. Ale výsledný regulátor bude mít velké zesílení a proto bude zesilovat šum měření. To může převážit nad zlepšením chování a stability díky velkému zesílení a fázovému předstihu. A tohle zesílení šumu musíte očekávat, protože se nuly přece jen chovají jako diferenciátory.

29. Dopravní zpoždění může být smrtelné

Dopravní zpoždění můžete považovat za Trojského koně nebo za virus AIDS. Dopravní zpoždění ve zpětnovazební smyčce odpovídá přenosu s jednotkovou velikostí na všech frekvencích ale s fázovým zpožděním, které roste s frekvencí. Toto fázové zpoždění navine Nyquistův graf, zvláště na vysokých

frekvencích. Takže má-li zpětnovazební systém ve smyčce nemodelované zpoždění, může být počet Nyquistových obkroužení přenosu otevřené smyčky jiný, než očekáváte, a uzavřená smyčka může být nestabilní. Když o dopravním zpoždění víte dopředu, můžete jeho vliv při návrhu kompenzovat pečlivým tvarováním frekvenční charakteristiky otevřené smyčky. I když můžete (alespoň teoreticky) navrhnout stabilizující regulátor i pro velké dopravní zpoždění, výsledné chování bude nejspíš mizerné. Představte si, že se máte rozhodnout na základě staré informace.

30. Respektujte ty nestabilní

Jak jsme si na přednášce říkali, řízení nestabilních systémů může být nebezpečná záležitost. Skutečné nestabilní soustavy jsou vždy nelineární, a abychom je mohli stabilizovat, potřebujeme aktuátoru s určitou šířkou pásma a tempem. Poruchový signál může perturbovat stav nelineárního systému mimo jeho *doménu atrakce* a pak ho aktuátoru nedokáže přivést zpět do ekvilibria a tak ho zotavit z poruchy. Navíc by porucha aktuátoru vedla ke katastrofě, a proto k ní nesmí dojít.

31. Řízení s více smyčkami není triviální

Řízení s více smyčkami je mnohem náročnější než řízení se smyčkou jedinou. Vše, co jsme dosud řekli, platí pro řízení *s jednou smyčkou*. Více smyček je potřeba kdykoli má soustava více senzorů nebo aktuátoru. Pak musíme počítat s interakcí každé smyčky s každou jinou smyčkou. I když mnoho principů řízení s jednou smyčkou v principu platí i pro více smyček, technicky je to mnohem náročnější. Přínos řízení s více smyčkami je ale často mnohem vyšší, než kdybychom použili soubor regulátorů s jednou smyčkou.

32. Vždycky jsou tam nelinearity

Téměř vše dosud řečené platí pro linearizované modely soustav. Reálné systémy ale mají nelinearity nejrůznějšího druhu: *pásmo necitlivosti, mrtvý chod, Coulombovo tření, hysterezi, kvantování, saturaci, kinematické nelinearity* a mnohé další. Proto se regulátor navržený tak, aby splňoval specifikace chování pro lineární model soustavy, může chovat mizerně, když je připojen ke skutečné soustavě! Návrh je vždy kompromisem mezi matematickou ovladatelností linearizovaného modelu a věrností nelineárního modelu.

33. V sázce mohou být lidské životy

Inženýři musí při analýze a návrhu skutečných řídicích systémů počítat se vším uvedeným výše. Musí také specifikovat, navrhnout, analyzovat, postavit, programovat, testovat a udržovat elektromechanický hardware, procesory a software potřebný k implementaci řídicích systémů. Reálné řídicí systémy musí být extrémně spolehlivé, zvláště když na nich závisí životy lidí.

Tyto odvážné a vděčné inženýrské úlohy budou ještě dlouho zaměstnávat spoustu inženýrů z oboru řídicích systémů. Nezapomeňte: **Když udělá chybu kolega z oboru počítačů, tak mohou spadnout Windows. Když uděláte chybu vy, odborník na řízení, tak může spadnout letadlo.**

Ted' jste dokončil základní kurz sice trochu modernizovaného, ale přesto *klasického řízení*. Jste připraven vstoupit do říše divů řízení *moderního a postmoderního*.

Lineární řízení, které jste se naučil pro systémy s jedním vstupem a jedním výstupem, teď může být rozšířeno na soustavy s více vstupy a více výstupy. *Optimální řízení* umožňuje navrhovat řídicí systémy tak, aby byly optimální podle nějakého návrhového kritéria. Zahrnuje teorii LQG a H-2 řízení, která poskytuje explicitní vzorečky pro návrh mnohazměrových regulátorů. *Robustní řízení* hledá jednoduché regulátory, které zajistí robustní stabilitu a chování pro neurčité soustavy. Počítačová implementace těchto regulátorů je předmětem *číslicového řízení*. I když je skok z jednorozměrového řízení ke mnohazměrovému optimálnímu velký a důležitý, můžete jít ještě dál: *Nelineární řízení* bere v úvahu nelinearity a ukazuje jak najít nelineární regulátor, který bude řídit lépe než regulátor lineární. Nebo *adaptivní řízení*, kde se regulátor učí a adaptuje podle změn v soustavě a poruchách. A tak dál. A co takhle *řízení prediktivní*, které využívá predikce budoucího chování, ale pro jistotu je každou chvíli upravuje? S tím vším se seznámíte v magisterském programu Kybernetika a robotika.

A to ještě ani zdaleka není všechno! Dneska už neřídíme jen systémy, ale stále častěji i *systémy systémů*. Řídíme *distribuované sítě* systémů, *formace* mobilních robotů, bezpilotních letadel, lodí, ponorek nebo satelitů (to jsou všechny ty UGV, USV, UAV), budeme řídit *kolony* aut bez řidičů na automatických dálnicích budoucnosti (AHS). Řídíme systémy mrňavé (mikro, nano, *MEMS*) i obrovské (obří teleskopy, letecký provoz v oblasti, energetické sítě celých zemí). Zkoušíme řídit systémy v lidském těle i další bio systémy. Automatické podávání léků, automatické řízení při operacích, ... A co teprve *chytré energetické sítě*, *inteligentní budovy* či systémy *vestavěné* všude. Nebo snad *internet věcí*?

Pro mnohé z těchto výzev ještě ani metody nemáme. To vše čeká na vás! S úžasnými pokroky ve snímání, aktuaci a zpracování a s lepší teorií i algoritmy se automatické řízení stane technologií pro nové tisíciletí. Jste určitě na správném místě ve správný čas.