

MODELOVÁNÍ ZPĚTNOVAZEBNÍHO ŘÍZENÍ POLOHY PLAZMATU V TOKAMAKU COMPASS

Radek Beňo, Jan John

Katedra řídicí techniky - K335, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze, Technická 2, 166 27 Praha 6

Termojaderné slučování v tokamacích je jedním z nejnadějnějších energetických zdrojů pro příští generace, pokud se podaří uspokojivě vyřešit mnohé zbývající fyzikální a technologické problémy. Jedním z nich je schopnost kontrolovat proud, polohu a tvar plazmatického sloupce v průběhu výboje, jež se mění v důsledku nejrůznějších plazmatických nestabilit. Článek se zabývá fyzikální analýzou vertikální nestability a jevy, které ji doprovází a matematicko-fyzikálním popisem řídicího systému, na jehož základě je sestaven celkový model systému řízení vertikální nestability v tokamaku COMPASS.

Hlavním úkolem zpětnovazebního řízení tokamaků, včetně nově nainstalovaného tokamaku COMPASS na Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR je především vertikální stabilizace plazmatického sloupce během výboje. Právě zpětnovazebnímu řízení vertikální nestability byla věnována bakalářská práce [1], která byla na podzim roku 2008 úspěšně obhájena na katedře řídicí techniky elektrotechnické fakulty ČVUT. S využitím volně dostupných programů [2, 3] zde byl navržen fyzikálně podložený model velmi rychlé regulace nestabilního systému. Konkrétně se jedná o model regulace vertikální polohy plazmatu v tokamaku COMPASS. Ten umožňuje vyzkoušet různá nastavení regulátorů včetně citlivosti takto získaného regulačního obvodu. Podrobnější informace o tokamaku COMPASS lze nalézt v [4] či [5]. Rozšířené informace ohledně modelování zpětnovazebního řízení plazmatického výboje pak v již zmíněné bakalářské práci [1].

Nestability plazmatu

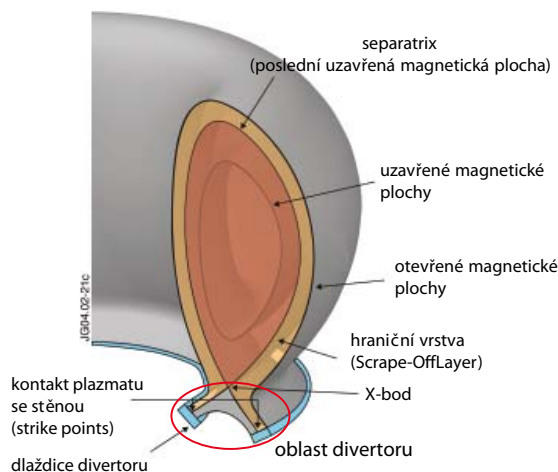
Jeden z největších pokroků tokamaků celého světa se týká právě stability plazmatu. A je to právě díky zpětnovazebnímu řízení, které umožnilo prodloužit původně milisekundové výboje na dnešní prakticky kontinuální provoz. Některé nestability byly zcela odstraněny, jiné mohou být predikovány, a to přesto, že příslušné fyzikální modely nejsou zdaleka vyčerpávající. Z hlediska základní stabilizace plazmatického sloupce při výboji v tokamaku je nejdůležitější vertikální nestabilita s relativně rychlým, typicky exponenciálním časovým nárůstem výchylky polohy. Horizontálně je plazma v principu stabilní, což je dáno rovnováhou mezi tlakem vertikálního magnetického pole a tlakem plazmatu. Jelikož tlak plazmatu se v čase vyvíjí mnohem pomaleji než vertikální nestabilita, nebudeme horizontální stabilizaci v tomto článku věnovat pozornost. Celkový zpětnovazební systém ale samozřejmě musí být schopen řídit obě

nestability, a to obvykle ve vztahu k dalším řízeným parametřům, jako je například hustota plazmatu.

Vertikální nestabilita plazmatu

Nejvýznamnější makroskopickou nestabilitou, kterou je potřeba při výboji kontrolovat, je právě vertikální nestabilita. Ta se začíná dramaticky projevovat u vertikálně protaženého plazmatu – například tzv. D-shape tvar (viz obr. 1). Kruhové plazma je poloidálními obvodů „roztahováno“ ve vertikálním směru a plazmatický sloupec již není symetrický jako v případě kruhového plazmatu. To sice zlepšuje udržení plazmatu (poměr tepelné energie k celkovým ztrátám), na druhou stranu tím klesá stabilita rovnovážného stavu.

Z materiálových vlastností komory dokážeme vyvodit, že všechny nestability s časovou konstantou $\tau < 0,5$ ms budou zatlumeny vířivými proudy, které pohybuji se plazmatický sloupec indukuje do komory tokamaku [6]. Jejich absence byla příčinou velké nestability prvních tokamaků,



Obr. 1 D-shape tvar plazmatu. Přetištěno s laskavým svolením EFDA JET.

kteřé měly stěnu komory z nevodivého materiálu (keramika). Komora tak nemohla odfiltrovat velmi krátké výkyvy plazmatického sloupce a vytvořeného plazma se velmi rychle ochladilo (a znečistilo) dotykem se stěnou a následkem toho zaniklo. Po výměně konstrukčního materiálu komory za nerezovou ocel se již situace výrazně zlepšila. U tokamaků další generace se používal k pasivní stabilizaci vertikální polohy plazmatu tzv. „kožuch“ (anglicky *copper-shell*). Jednalo se o tlustou měděnou obálku komory, která díky velké vodivosti mědi dokázala rychle indukovat vířivé proudy a tím zatlumit rychlé vertikální skoky plazmatu. S příchodem D-shape plazmatu se však od této pasivní stabilizace ustoupilo a začala se používat aktivní analogová zpětná vazba. Důvodem k tomu byly jednak velké síly, které D-shape plazma vychylují, ale též velké konstrukční problémy při instalování měděné obálky. V současné době se využívá vodivá komora tokamaku k tlumení výchylky velmi rychlých vertikálních skoků plazmatu, zatímco pomalejší výkyvy jsou regulovány zpětnou vazbou. Vodivá komora však neumožňuje ze stejného důvodu působit na plazma rychlými změnami magnetického toku řídicí cívky.

Silové působení na plazma je dáno Lorentzovou silou, $F = A \times I_p \times B = I_p \times x \times B = I_p \times \Phi / A$, kde I_p je elektrický proud v plazmatu a A je plocha průřezu, kterým prochází magnetický tok. Pro typické hodnoty plazmatu v tokamaku COMPASS ($I_p = 200$ kA, $B = 2$ T) dostáváme sílu vzrůstající o zhruba 50 N na každém milimetru vertikální výchylky. Nebýt tedy pasivní stabilizace dané vířivými proudy, tak bychom při hmotnosti 1 m^3 plazmatu $m = 2n_p V \sim 0,2 \text{ mg}$ dostali obrovské zrychlení, které by plazma „hodilo“ na stěnu během několika mikrosekund.

Pro tokamak COMPASS je nejmenší možná časová konstanta vertikální nestability plazmatu $\tau \sim 0,5$ ms [6] a tato nestabilita má exponenciální charakter. Velmi přesně ji lze přirovnat k nestabilitě inverzního kyvadla. Každý z nás si dovede představit situaci, kdy na špičce prstů

balancuje s obráceným koštětem. Zde je časová konstanta nestability rovna přibližně $\tau = 0,4$ s, a tudíž zvládné situaci stabilizovat i ruka člověka. Situace se stává o poznání horší, pokud koště vyměníme např. za tužku. Pokud bychom chtěli být adekvátní a zachovali především časové vlastnosti vertikální nestability plazmatu, tj. $\tau \sim 0,5$ ms, mělo by naše pomyslné inverzní kyvadlo délku vzpěry pouhých $1,92 \mu\text{m}$! Navíc naše regulační zásahy nemohou být přehnaně rychlé, neboť by neprošly přes již zmíněný filtr komory. Úkol zpětnovazebního řízení se pak dělí do dvou fází dle požadavků. V první řadě se jedná o stabilizaci: Tak jako kulička na konci inverzního kyvadla musí zůstat v rovnovážné poloze, tak plazma musí být stabilní na tzv. *midplane* („rovník“ komory tokamaku) a nesmí se z této polohy příliš vzdalovat i pod tíhou různých nestabilit. V řadě druhé se pak jedná o regulaci polohy plazmatického sloupce: naše kulička na konci inverzního kyvadla se musí nacházet v přesně definovaném místě prostoru, a stejně i plazmatický sloupec je při regulaci na předem definovaném místě v komoře.

Pokud řízení selže, nastává tzv. *Vertical displacement event* (VDE, ztráta plazmatu vlivem vertikální nestability), což by mohlo u budoucích výkonových tokamaků, kde je plazma a hlavně jeho magnetické pole nositelem velké energie, znamenat i částečnou destrukci komory či poškození konstrukce tokamaku a tím vyřazení reaktoru z provozu. Je třeba poznamenat, že veškeré děje a nestability jsou na větších tokamacích pomalejší a tedy i jejich řízení a stabilizace bude jednodušší než u tokamaků menších rozměrů. O to vážnější však bude situace, pokud zde dojde k VDE.

Modelování systému pro stabilizaci vertikální polohy plazmatu

Celkový řídicí systém je na obr. 2. Jeho základní části tvoří rychlý napěťový zesilovač spolu s vlastní inter-

» **Veškeré děje a nestability jsou na větších tokamacích pomalejší a tedy i jejich řízení a stabilizace bude jednodušší než u tokamaků menších rozměrů.** «

Teorie řízení

Teorie řízení je mezioborová větev matematiky a inženýrských aplikací, která se zabývá popisem a chováním dynamických systémů.

Za první aplikace teorie řízení v novodobé historii lidstva můžeme považovat Wattův odstředivý regulátor pro potřeby regulace mechanických strojů na přelomu 19. a 20. století či zápornou zpětnou vazbu pro operační zesilovač, kterou v roce 1927 objevil Harold Stephen Black. Dnes se s aplikacemi teorie řízení setkáváme v běžném životě takřka neustále.

V současné době se teorie řízení dělí na dva směry, které se však silně prolínají – na tzv. klasickou a moderní teorii řízení. Základním stavebním kamenem obou přístupů je zpětná vazba, která přivádí informaci o chování soustavy zpět na její vstup, a tímto způsobem dovoluje soustavu stabilizovat a ovlivňovat. Dalším neméně důležitým pojmem je model soustavy. Ten matematicky popisuje realitu dějů, které v soustavě probíhají.

Klasická teorie řízení je starší, její počátky můžeme zařadit právě do 30. let 20. století a zabývá se především vnějším popisem systému. Mezi základní pojmy týkající se analýzy systému patří přenos systému, přechodová, impulzní a frekvenční charakteristika. Syntéza systému pak zahrnuje návrhy regulátorů pomocí frek-

venčních metod, metody geometrického místa kořenů či pomocí empirických metod (např. Ziegler-Nichols nebo Åström-Hägglund).

Přenos systému (1) je modelem systému či jeho částí. V případě spojitých systémů se jedná o poměr Laplaceova obrazu výstupní veličiny ku obrazu vstupu, kde s je komplexní proměnná. Popis diskrétních systémů je velmi podobný a využívá Z-transformace. Přenos soustavy (1) získáváme z jejího fyzikálního popisu (z diferenciálních či diferenčních rovnic popisujících dynamiku soustavy) či z naměřených přechodových charakteristik (odezva systému na skokovou změnu vstupní veličiny soustavy), pokud tyto rovnice neznáme nebo o systému víme velmi málo.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

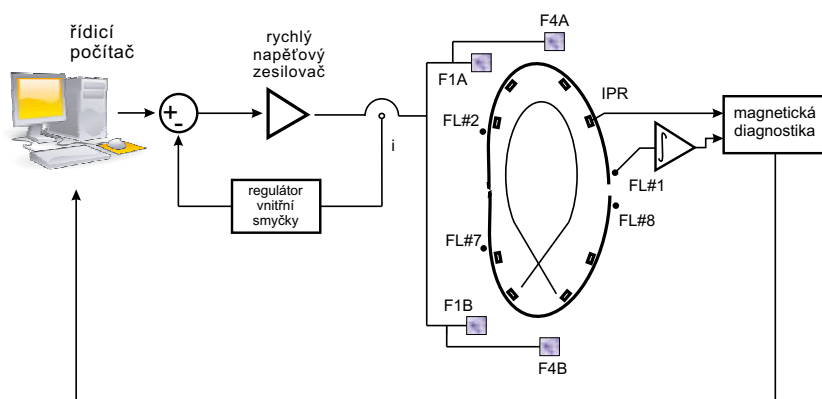
Kořeny jmenovatele přenosu nazýváme póly systému. Tato obecně komplexní čísla nám vypovídají hlavně o vnitřní dynamice systému (převrácenými hodnotami reálné části pólů jsou časové konstanty systému), jsou rovny frekvencím, které dokáže systém sám generovat a rozhodují o stabilitě systému. Pokud jsou reálné části všech pólů záporné, systém je stabilní. Pokud však alespoň jedna z nich nabývá kladné hodnoty, je celý systém nestabilní.

Kořeny čitatele přenosu určují tzv. nuly systému. Opět se jedná o obecně o komplexní čísla, ukazující, jak budou do popisovaného systému vstupovat vnější signály (čítatel přenosu odpovídá pravé straně lineární diferenciální rovnice s konstantními koeficienty). Zajímavostí je pak situace, kdy se v přenosu objeví nula s kladnou reálnou částí. Takovýto systém reaguje na změnu vstupu nejdříve opačnou výchylkou výstupu a říkáme o něm, že je neminimálně fázevý. Příkladem může být prudké přidání plynu u automobilu s dvoutaktním motorem, který pak mírně zpomalí, než se rozjede na požadovanou rychlost.

Poměr koeficientů b_0/a_0 udává statické zesílení soustavy.

Více informací o klasické teorii řízení lze najít v [2] či [3].

Moderní teorie řízení vznikla v 60. letech 20. století a od klasické teorie se liší především zavedením pojmu stavu systému, čímž nám dovoluje plně využívat vnitřní struktury systému. Moderní teorie řízení i nadále využívá matematických modelů k popisu řízených procesů. Syntéza je však brána jako čistě optimalizační úloha. Místo nastavování konstant regulátoru inženýr volí parametry kritéria optimality a případná omezení. Výhodou tohoto přístupu je implicitní zajištění některých vlastností systému (především stability systému).



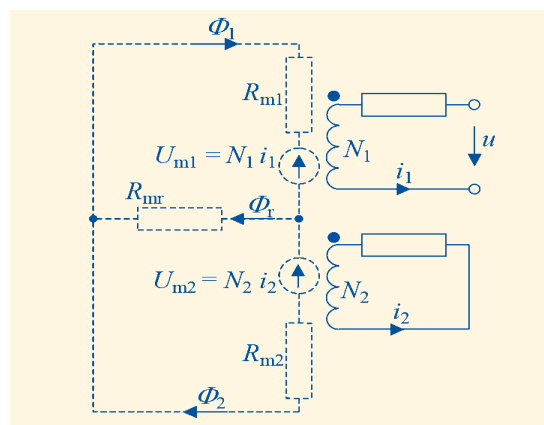
Obr. 2 Celkový řídicí systém.

ni proudovou zpětnou vazbou, řídicí poloidální cívky, měření polohy plazmatu (magnetická diagnostika) a vnější zpětnovazební smyčka s řídicím počítačem.

Měření polohy plazmatu zajišťuje magnetická diagnostika. Vzorkování probíhá při frekvenci $f_{vz} = 20$ kHz a vyhodnocené informace budou předávány v reálném čase systému řízení polohy plazmatu. Tokamak COMPASS disponuje dvěma typy měřicích cívek. Jedná se o tzv. Flux loops (umístěny na vnější straně komory), díky nimž lze získat informaci o poloze plazmatu a tzv. interní parciální Rogowského cívky (umístěny uvnitř komory), které umožňují zjistit rychlost plazmatu. V budoucích výkonových tokamacích nebude ovšem možné pro regulaci vnitřní cívky používat, protože by nevydržely žár a neutronovou radiaci v komoře. Nabízí se tedy možnost vyzkoušet regulaci s využitím vnějších cívek i u COMPASSu pro získání potřebných zkušeností. Navrhování regulátoru však v tomto případě bude komplikovanější vzhledem k některým parazitním signálům, které v přenosové funkci systému přidávají nestabilní nulu – viz [6, 7]. Informace o poloze a rychlosti plazmatu se v reálném čase přenáší z magnetické diagnostiky do řídicího počítače, kde je pomocí regulačního zákona určena žádaná hodnota proudu cívkou. Výsledná hodnota vstupuje do zesilovače, který vyšle potřebný proud do obvodů poloidálních cívek určených k vertikálnímu řízení. Vlastní indukčnost obvodu u tokamaku COMPASS je $L_{br} = 41,4$ μ H, vlastní odpor pak $R_{br} = 10,5$ m Ω . Časová konstanta tohoto obvodu je dána $\tau_{br} = L/R = 4$ ms. Proud cívkou, a tudíž i horizontální magnetické pole, jež má tlačit plazma zpět do rovnovážné polohy, narůstá maximální rychlostí $I/I_0 = 1 - \exp(-t/\tau)$ při skokové změně napětí řídicího zdroje.

Doba možné reakce na nestabilitu plazmatu je navíc prodloužena o dopravní zpoždění vzniklé zpracováním dat ze senzorů polohy a časem spotřebovaným na výpočet požadovaného akčního zásahu z regulačního zákona (odhadujeme max. 90 μ s) a o zpoždění způsobené skin efektem (tj. zpomaleným průnikem proudu tlustým vodičem) na řídicí cívce (cca 170 μ s) [8]. Tím se dostáváme do nelehké situace – vždy budeme pomocí zpětné vazby schopni reagovat pouze na minulou událost. Dále je třeba poznamenat, že rychlost náběhu stabilizující síly (v důsledku nárůstu proudu v řídicí cívce) je omezená vlastní indukčností řídicí cívky. Všechny tyto jevy mají zásadní dopad na návrh řízení při tak rychlém ději, jako je právě regulace polohy plazmatu.

Model regulace plazmatu je založen na matematicko-fyzikální analýze soustavy, která vychází z rovnováhy magnetických toků uvnitř a vně komory. Řídicí poloidální cívka vytváří magnetický tok Φ_1 , který můžeme rozdělit na rozptylový tok Φ_r (uzavírá se kolem cívky



Obr. 3 Magnetoelektrický obvod.

a do komory nezasahuje – nemůže tedy ovlivnit polohu plazmatu) a tok Φ_2 „užitečný“ pro stabilizaci a řízení (vstupuje do komory a může polohu plazmatu ovlivnit). Každý z těchto toků má vlastní magnetický odpor (odpor prostředí, kterým magnetický tok protéká). Tok procházející komorou je dále zpomalován indukcí vířivých proudů v plášti komory a v plazmatu. Obojí je simulováno jako vinutí s jedním závitem do zkratu.

Na základě této fyzikální analýzy lze sestavit magnetoelektrický obvod – obr. 3 –, díky kterému získáváme stavový popis systému, jenž je jádrem celého modelu (1).

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_1}{dt} &= -\frac{R_1(R_{m1} + R_{mr})}{N_1^2} \cdot \phi_1 + \frac{R_1 R_{mr}}{N_1^2} \cdot \phi_2 + \frac{u}{N_1} \\ \frac{d\phi_2}{dt} &= -\frac{R_2(R_{m2} + R_{mr})}{N_2^2} \cdot \phi_2 + \frac{R_2 R_{mr}}{N_2^2} \cdot \phi_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Problém u takto sestaveného modelu může nastat při určování konstant. Většina z nich byla vypočtena z matematicko-fyzikálních identifikací, další byly převzaty z původní dokumentace tokamaku COMPASS.

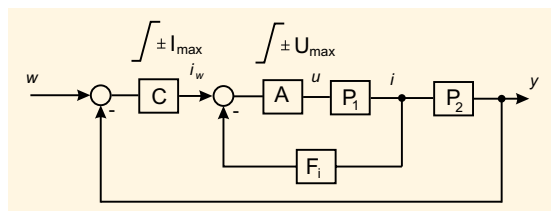
Výhodou zvoleného přístupu je možnost vyjádření přenosů mezi jednotlivými stavy. Příkladem může být přenos napětí na řídicí cívce na magnetický tok Φ_2 , který ovlivňuje plazma (2).

$$\frac{\Phi_2(s)}{U(s)} = \frac{341,3025}{(s + 4634)(s + 216,1)} \quad (2)$$

Další přenosy (prakticky jakékoli) si můžeme ze stavového popisu velmi jednoduše vytvořit – např. pomocí nástrojů v prostředích MATLAB® nebo Mathematica®. Tyto přenosy lze využít k seřizování velkého množství regulátorů různými metodami.

Vertikální regulace byla v předchozích zapojeních spojitá a lineární, s regulátorem typu PD a s využitím vnitřních měřicích cívek. Oproti zapojení tokamaku COMPASS ve Velké Británii bude zpětnovazební systém na ÚFP AV ČR realizován číslicově pomocí sofistikovanějšího regulátoru. Výhodou regulátoru PD je snadná možnost zkusného nastavení a robustnost regulačního obvodu. Pro první pokusy proto bylo zvoleno obdobné schéma jako ve Velké Británii – číslicový PD regulátor s využitím vnitřních měřicích cívek.

Návrh regulátoru [1] je založen na matematicko-fyzikální identifikaci regulovaného systému. Ze získaných dat byl vytvořen stavový model v jazyce MATLAB® a nelineární simulační model v SIMULINKu®. MATLAB® umožňuje transformovat lineární část stavového schématu do různých přenosů nebo rovnou výpočet některých regulátorů, popř. hledání některých



Obr. 4 Blokové schéma regulačního obvodu.

nelineárních závislostí. Je třeba poznamenat, že v době psaní tohoto článku nebylo možno dokončit některá měření potřebná ke sladění navrženého modelu s reálnou soustavou (plné doladění konstant modelu). Nedokonalý model tedy může sloužit jako trenážer nastavování regulátorů pro předpokládaný široký rozsah zatím neznámých parametrů a jejich upřesňování.

Blokové schéma modelu je na obr. 4. Jádrem modelu je přenos P_1P_2 , jenž v sobě zahrnuje dynamiku soustavy a vychází ze stavových rovnic (1). Číslicový regulátor C byl modelován se saturačním omezením žádaného proudu řídicí cívkou a je zakončen tvarovačem signálu. Novinkou v návrhu regulace je rychlá pomocná regulační smyčka $A-P_1-F_i$ výkonového zesilovače A, která mu dodává charakter zdroje proudu. Tím snižuje časovou konstantu řídicích cívek, a navíc se díky ní tento zesilovač proudu stává pomocným regulátorem typu PD s kompenzační derivační složky při nasycení výstupního napětí. Přenos výkonového zesilovače je (3),

$$A(s) = \frac{K_i}{T_a s + 1} \quad (3)$$

kde K_i je formální zesílení proudu ve V/A. V modelu je nutno počítat s omezením výstupního napětí zesilovače $\pm U_{max}$. Předpokládána časová konstanta zesilovače je $T_a = 10 \mu s$. Přenos pomocné proudové zpětné vazby zesilovače F_i (4)

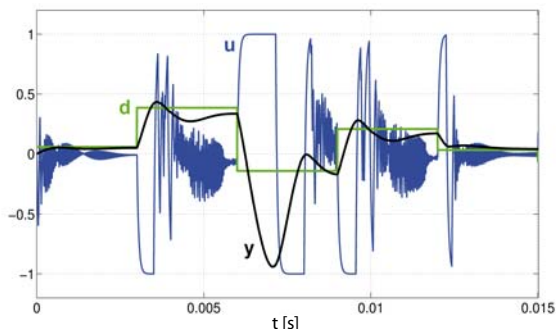
$$F_i(s) = \frac{aT_d s + 1}{T_d s + 1} \quad (4)$$

byl navržen zkusmo pomocí programu *rltool* tak, aby urychlil vnitřní regulační smyčku a dal jí současně charakter pomocného PD regulátoru.

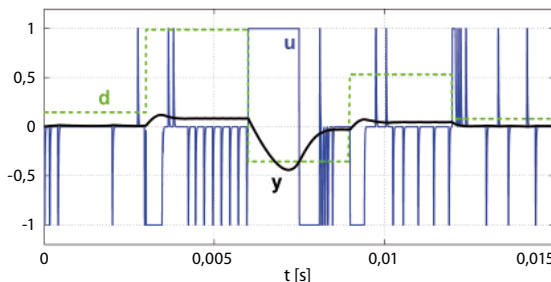
Přenos regulované soustavy hlavní regulační smyčky (bez hlavního regulátoru) se zapojenou pomocnou zpětnou vazbou zesilovače je pak (5).

$$P(s) = \frac{3.2 \cdot 10^{11} (s + 33333)}{(s - 2260)(s + 7078)(s + 90900)(s^2 + 70100s + 1,9 \cdot 10^9)} \quad (5)$$

Vnější regulační smyčka bude tedy pracovat s mnohem rychlejší soustavou, než by odpovídalo skutečnosti. Pomocná regulační smyčka navíc činí příslušnou



Obr. 5 Časový průběh regulace pomocí PD regulátoru. d je porucha, u je napětí zesilovače a y odpovídá poloze plazmatu.



Obr. 6 Časový průběh po náhradě zesilovače třípolohovým spínacím členem. d je porucha, u je napětí zesilovače a y je regulovaná veličina – poloha plazmatu.

část regulačního obvodu méně citlivou na změny parametrů, čímž přispívá k robustnosti celého obvodu.

Pro hlavní regulační smyčku byl pro první zkoušky použit číslicový regulátor PD navržený pomocí metody geometrického místa kořenů. Výsledek regulace můžeme spatřit na obr. 5. Lze vidět, že regulátor funguje dobře pro velmi malé výchylky plazmatického sloupce, při větších výchylkách se však zesilovač nasýtí (obr. 6, čas $t = 0,007 s$) a regulační obvod se ocitne daleko od optimality, popř. se stává nestabilním.

Model navíc umožňuje vyzkoušet i jiné varianty výkonového členu, např. třípolohový spínací obvod apod. Na obr. 6 je časový průběh regulace, s třípolohovým spínacím členem místo spojitého zesilovače. Spínací člen je zapojen jako třípolohový spínací PD regulátor s derivační časovou konstantou $T_{d3} = 50 \mu s$.

Všechny navržené konfigurace regulačních obvodů mají velkou výhodu v tom, že konstanty regulátorů se snadno seřizují zkusmo, pokud je na to seřizující náležitě připraven, a uvedený model je k takové přípravě vynikající pomůckou. V dalších krocích bude potřeba především sladit konstanty modelu s reálnou soustavou a poté pomocí dobrého modelu navrhnout konkrétní regulátor vertikální polohy plazmatu. Na dobře vyladěném modelu se tak ukáže, zda postačí k regulaci pouze „jednoduchý“, ale zato velmi rychlý PD regulátor nebo zda bude muset být struktura regulace složitější.

Podrobnější informace k regulační části budou pravděpodobně otištěny v některém z příštích čísel časopisu Automatizace.

Autoři by chtěli touto cestou poděkovat RNDr. Janu Mlynářovi, Ph.D., a Mgr. Janu Horáčkoví, Ph.D., za ceněné připomínky při psaní článku.

Literatura

- [1] R. Beňo: *Modelování systému řízení polohy plazmatu v tokamaku COMPASS*. Bakalářská práce, ČVUT v Praze, Česká republika, 2008; k dispozici též na WWW <http://sethovy.wz.cz/Beno.pdf>
- [2] J. John: *Systémy a řízení*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2003.
- [3] J. John: dokument dostupný na WWW http://dce.felk.cvut.cz/sri2/ss/comp_files.htm
- [4] R. Pánek a kol.: „Reinstallation of the COMPASS-D tokamak in IPP ASCR“, *Czech. J. Phys.* **56**, B125 (Suppl.B 2006).
- [5] M. Řípa, R. Pánek, J. Mlynář: „Instalace tokamaku COMPASS v Praze“, *Čs. čas. fyz.* **58**, 200 (2008).
- [6] P. Vyas: *Plasma Vertical Position Control in the COMPASS-D Tokamak*. PhD thesis, University of Oxford, England 1996.
- [7] P. Vyas, D. Mustafa, A. W. Morris: „Vertical position control on compass-d“, *Fusion Technology* **33**, 97 (1998).
- [8] J. Havlíček, J. Horáček: „Modelling of Compass tokamak poloidal field coils magnetic fields“, *ECA* **32**, P-4.080 (2008); poster prezentovaný na 35th EPS Conference on Plasma Physics, Hersonissos, 9–13 June 2008.

» Všechny navržené konfigurace regulačních obvodů mají velkou výhodu v tom, že konstanty regulátorů se snadno seřizují zkusmo. «