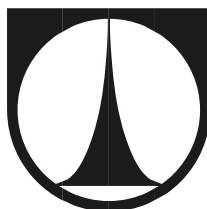


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



**MULTILINEÁRNÍ PREDIKTIVNÍ ŘÍZENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ S
PEVNÝM OXIDICKÝM ELEKTROLYTEM**

Multilinear Model Predictive Control of Solid Oxide Fuel Cells

Autoreferát disertační práce



MULTILINEÁRNÍ PREDIKTIVNÍ ŘÍZENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ S PEVNÝM OXIDICKÝM ELEKTROLYTEM

Autoreferát disertační práce

Studijní program: P2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 – Technická kybernetika

Autor práce: **Ing. Radek Horálek**

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Mgr. Jaroslav Hlava



ABSTRAKT

Palivové články představují čistý zdroj elektrické energie s vysokou účinností. Jedním z nejpoužívanějších typů jsou v současnosti palivové články s pevným oxidickým elektrolytem (SOFC), jejichž oblasti využití zahrnují stacionární i mobilní energetické zdroje různého výkonu. Aby mohlo dojít k jejich skutečně širokému uplatnění, je ovšem třeba vyřešit některá současná technologická omezení, především je nezbytné zvýšení schopnosti provozu při častých změnách zátěže. To je předmětem současného intenzivního výzkumu v různých technických oblastech a nezbytnou součástí tohoto výzkumu je i návrh vhodného řídicího systému.

Cílem této disertační práce je přispět k vývoji v oblasti řízení SOFC palivových článků. Je provedena podrobná rešerše současného stavu problematiky řízení SOFC článků včetně stanovení klíčových faktorů ovlivňujících životnost článku. Ukazuje se, že většina dosud publikovaných prací využívajících pokročilé metody řízení se zaměřuje na řízení založené na nelineárním prediktivním modelu (nelineární MPC). Tato metoda ovšem vykazuje i v současnosti řadu problémů souvisejících s nelineární optimalizací znesnadňujících jeho praktické využití. Vhodným řešením proto může být MPC založené sadě lineárních modelů (multilineární MPC).

V práci je navržen postup návrhu multilineárního MPC regulátoru pro provoz SOFC palivových článků v širokém rozsahu výkonů. Pro volbu vhodných lineárních modelů je využito metody gap metriky a linearizace na různých úrovních proudového zatížení článku. Lineární modely jsou upraveny tak, aby zohledňovaly výpočetní zpoždění regulátoru přítomné v reálných aplikacích. Pro omezení tepelného namáhání během změn zátěže je navržen způsob omezení rychlosti změny teploty článku.

Metody návrhu multilineárního MPC regulátoru jsou ověřeny simulačně v širokém rozsahu zátěže spolu s celým řídicím systémem. Za tímto účelem je implementován model planárního SOFC článku publikovaný v literatuře a ten je rozšířen o vnitřní reformování paliva, kterým je zemní plyn. Pro tento konkrétní palivový článek jsou pak nastaveny parametry regulátoru a celého řídicího systému pro dva odlišné provozní režimy (regulace výstupního výkonu a regulace na konstantní výstupní napětí).

Výsledky v případě regulace výkonu dodávaného do elektrické sítě ukazují velmi dobrou schopnost řídicího systému reagovat v širokém pracovním rozsahu na skokové změny požadovaného výkonu. Přestože omezení rychlosti změny teploty článku má vliv na dobu regulace výkonu, je možný dobrý kompromis mezi výkonem regulátoru a snížením tepelného namáhání článku. Při regulaci napětí článku přímo připojeného k zátěži jsou ukázány obecné limity kvality regulace napětí a omezení rychlosti změny teploty při rychlých změnách odebíraného proudu, nevyhnutelných v tomto provozním režimu. Je proto též ukázáno, že dalšího zlepšení kvality regulace může být v tomto režimu dosaženo za použití superkondenzátorů.

Klíčová slova: multilineární regulátor, prediktivní řízení, palivový článek s pevným oxidickým elektrolytem

ABSTRACT

Fuel cells are relatively clean, high efficiency technology for electricity generation. Several fuel cell technologies exist. Solid oxide fuel cells (SOFC) nowadays rank as one of the most important fuel cell types. SOFC systems can be built as both stationary and mobile energy sources with wide range of nominal output power. However, SOFC cells still have some technological limitations that must be overcome in order to enable their extensive commercial applications. One of such limitations is their limited load following capability. It is caused by the sensitivity of the cell to fast changes of temperature and other variables that result from load changes. For this reason, constant load operation is now recommended for SOFC cells in order to avoid significant lifetime reduction. Control is a key enabling technology for removing this limitation.

This thesis is focused on control of SOFC based electricity generation that is conceived in such a way that lifetime related constraints are always considered together with the main control objective. In the first part of the thesis, a detailed SOFC control system literature review is done including cell lifetime key factors as well. It is shown that most of the current research papers dealing with the advanced control of SOFC use nonlinear model predictive control (MPC). However, as nonlinear MPC still has many issues limiting its practical applicability in control systems of SOFC based electricity generators, the approach preferred in this thesis is to use MPC based on multiple linear models (multilinear MPC).

Thereafter methods of multilinear MPC controller design methods suitable for wide range operation are developed. It is shown that cell current load can be used as the only scheduling variable to switch between different linearized models. Gap metric based method is used to analyze cell nonlinearity and to select an appropriate model bank. Linearized models are modified to take into account controller computational delay existing in real applications. To restrict cell thermal stress related to load changes, rapid thermal changes restriction method is introduced.

Performance of multilinear MPC controller and other components of the control system is tested by simulations in wide operational range. For this purpose dynamic model of planar SOFC published in the literature is implemented and this model is extended to include direct internal reforming of fuel (natural gas). Guidelines for tuning the multilinear MPC controller are developed. Two different operation modes are considered: AC grid connected application where tracking the changing power requirement is the main control objective and standalone application with DC output where the main control objective is to maintain constant DC output voltage despite load changes.

In the case of grid connected fuel cell power control, demand power step changes in a wide operational range were realized during simulation. Simulation results show successful restriction of rapid thermal changes while high control system performance can be kept. In the case of voltage control of cell directly connected to the load, some general limitations of voltage control are shown that relate to fast load changes in this operation mode. For this reason there is also shown that another improvement of control performance can be obtained by adding supercapacitor to the fuel cell.

Key words: multilinear control, model predictive control, solid oxide fuel cell

OBSAH

Úvod	6
1 Princip funkce palivového článku	7
1.1 Palivové články s pevným oxidickým elektrolytem	8
2 Současný stav problematiky řízení SOFC článků	9
2.1 Spolehlivost a životnost článku.....	10
2.2 Stávající metody řízení SOFC.....	11
3 Cíle práce	12
4 Dynamický model SOFC palivového článku	13
4.1 Planární SOFC s vodíkem jako palivem.....	13
4.1.1 Materiálové bilance jednotlivých složek.....	13
4.1.2 Tepelná bilance	14
4.1.3 Napětí článku	14
4.2 Planární SOFC s vnitřním reformováním paliva (DIR-SOFC)	14
4.2.1 Reformní reakce.....	15
4.2.2 Materiálové bilance jednotlivých složek.....	16
4.2.3 Tepelná bilance	16
5 Návrh řízení SOFC článku v různých provozních režimech	17
5.1 Regulace výkonu dodávaného do sítě.....	17
5.1.1 Cíle řízení.....	17
5.1.2 Model DC/AC měniče	18
5.1.3 Ustálené stavy	18
5.1.4 Návrh řídicího systému	19
<i>Volba vhodných lineárních modelů.....</i>	<i>20</i>
<i>Zavedení výpočetního zpoždění.....</i>	<i>21</i>
<i>Omezení rychlosti změny teploty.....</i>	<i>22</i>
<i>Návrh regulátoru</i>	<i>22</i>
5.1.5 Výsledky simulací.....	23
<i>Simulace při změnách zátěže.....</i>	<i>23</i>
<i>Srovnání výsledků s omezením ΔT_s a bez omezení ΔT_s</i>	<i>25</i>
<i>Reakce na měřené poruchy teplot vstupních proudů</i>	<i>27</i>
5.1.6 Zhodnocení výsledků	28

5.2	Regulace konstantního výstupního napětí článku	29
5.2.1	Cíle řízení	29
5.2.2	Stanovení provozních stavů článku	29
5.2.3	Návrh řídicího systému	30
	<i>Omezovací blok na výstupu regulátoru</i>	31
	<i>Volba vhodných lineárních modelů</i>	31
	<i>Úpravy lineárních modelů</i>	32
	<i>Návrh MPC regulátoru</i>	32
5.2.4	Palivový článek s kondenzátorem	33
5.2.5	Výsledky simulací	35
	<i>Výsledky simulace při změnách zátěže</i>	36
	<i>Srovnání výsledků simulace při omezení ΔT_s a bez omezení ΔT_s</i>	37
	<i>Reakce na měřené poruchy teplot vstupních proudů</i>	38
	<i>Článek s kondenzátorem</i>	38
5.2.6	Zhodnocení výsledků	39
6	Závěr	41
6.1	Shrnutí dosažených výsledků	41
6.2	Nástin možných směrů dalšího výzkumu	43
	Citovaná literatura	44
	Seznam vlastních publikací týkajících se tématu disertační práce	46
	Další výsledky autora	46

ÚVOD

Palivové články představují čistou technologii výroby elektrické energie s vysokou účinností. Přes řadu výhod proti běžným zdrojům energie a intenzivní výzkum a vývoj zejména v posledních desetiletích ovšem stále vyžadují vyšší počáteční investice, bránící skutečně masovému rozšíření. Existuje několik různých typů palivových článků, které jsou alternativou k současným malým a středním zdrojům na fosilní paliva (plynovým motorům, dieselaagregátům, plynovým mikroturbínám, kogeneračním jednotkám, počítá se s jejich nasazením v automobilovém průmyslu) i větším elektrárenským zdrojům. Uplatnění naleznou též jako náhrada za baterie a akumulátory. Jejich reálné uplatnění začalo u některých speciálních aplikací (vesmírné projekty, podmořský výzkum) a v současnosti se postupně rozšiřují i do jiných oblastí. Jestliže počet zprovozněných energetických jednotek v roce 2013 dosáhl v Evropě 6000 a v Severní Americe 8700, pak v Asii to bylo 51 100 kusů, což je dáno zejména podporou této technologie v Japonsku. Navíc celosvětově se jedná o nárůst za posledních 5 let z 14400 na 66800 jednotek všech typů (FuelCellToday 2013). Snaha snížit cenu energie produkované palivovými články (tj. snížení počátečních investic, zvýšení životnosti, vyšší efektivita provozu atd.) vede k současnému pokračujícímu intenzivnímu výzkumu a vývoji této technologie. Hledání a návrh vhodné strategie řízení je důležitou součástí tohoto procesu.

Jedním z nejrozšířenějších typů palivových článků jsou v současnosti vysokoteplotní palivové články s pevným oxidickým elektrolytem (SOFC). Dosahují vysoké účinnosti, ovšem při jejich provozu je zapotřebí dodržet řadu omezení, zajišťujících bezpečnost provozu a dostatečnou životnost článku. Výrazný negativní vliv na životnost tohoto typu článků mají rychlé a velké změny teploty, způsobené změnami zátěže. Proto byly palivové články typu SOFC dosud provozovány s pokud možno malými změnami výkonu. To ovšem neodpovídá současným nárokům na provoz v širokém pracovním rozsahu s častými změnami výkonu. Tyto nároky vyplývají z energetických požadavků budov, ve kterých mohou být SOFC články použity, či z případného zapojení do chytrých elektrických sítí ovlivněných připojením značného množství obnovitelných zdrojů.

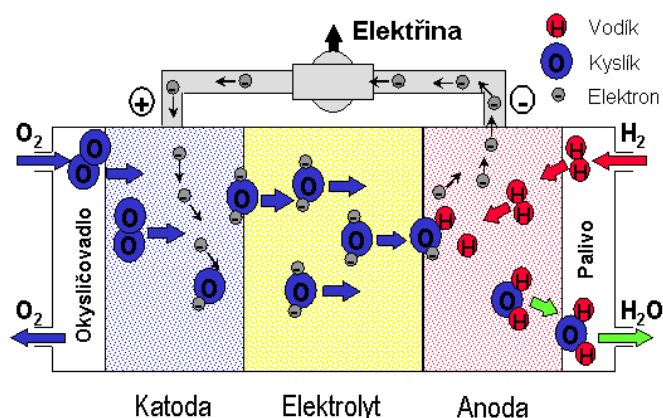
To vše znamená, že pro další rozšíření tohoto vysoce efektivního zdroje energie je zapotřebí dosáhnout vysoké životnosti i při provozu v širokém pracovním rozsahu a při častých změnách zátěže. Z hlediska regulace lze charakterizovat palivové články jako nelineárními systémy s více vstupy a výstupy, mezi nimiž existují vícenásobné interakce, s různými časovými měřítky a s řadou provozních omezení, zajišťujících bezpečnost provozu a dostatečnou životnost článku. Proto k dosažení tohoto cíle poskytují více možností moderní pokročilé metody řízení, než tradiční proporcionálně integračně derivační (PID) regulátory a prediktivní řízení založené na modelu (MPC) je logickou volbou. Přestože nelineární chování palivových článků ukazuje na použití nelineárního MPC, řada problémů souvisejících s nelineární optimalizací znesnadňuje jeho praktické využití. Na druhou stranu v případě lineárního MPC, požadavek na provoz v širokém rozsahu zátěže vylučuje možnost použití linearizovaného modelu v okolí jednoho pracovního bodu. Proto vhodným řešením může být MPC založené na sadě přepínaných lineárních modelů.

1 PRINCIP FUNKCE PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo v elektrickou energii. Skládá se z porézních elektrod oddělených elektrolytem. V oblasti pórů elektrod vzniká třífázové rozhraní – elektroda, elektrolyt a reagenty vzniklé oxidací paliva a redukcí oksyličovadla. Základní princip transformace energie je pro všechny palivové články stejný, jednotlivé typy se však liší materiálem elektrod, použitým elektrolytem a pracovní teplotou i konkrétními chemickými reakcemi na anodě a katodě. Princip funkce palivového článku, děj v principu inverzní k elektrolýze, je patrný z obrázku 1.1. V případě čistého vodíku jako paliva a kyslíku jako oksyličovadla dochází v místě třífázového rozhraní k elektrochemické oxidaci paliva a redukcí oksyličovadla podle sumární rovnice (1.1):



Molekulární kyslík je přiváděn na katodu palivového článku, kde se dvěma elektrony redukuje na kyslíkový aniont, který je transportován elektrolytem k anodě. Na anodě se přiváděný vodík redukuje kyslíkovým aniontem za vzniku vody, přičemž uvolněné elektrony jsou z anody vedeny na katodu jako využitelný elektrický proud.



Obrázek 1.1: Princip činnosti palivového článku (Porš 2002)

V současné době existuje několik základních typů palivových článků, které se liší především druhem elektrolytu a provozní teplotou. Tím je dáno i odlišné konstrukční provedení, způsob provozu a přípravy paliva:

- **PEMFC (Proton Exchange Membrane FC, Polymer Electrolyte Membrane FC):** Funkci elektrolytu plní polymerní elektrolytická membrána, provozní teploty 40-90 °C.
- **DMFC (Direct Methanol FC):** Funkci elektrolytu plní polymerní elektrolytická membrána, provozní teploty 60-130 °C.
- **AFC (Alkaline FC):** Alkalický elektrolyt (zejména KOH), 80-200 °C.
- **PAFC (Phosphoric Acid FC):** Elektrolytem je kyselina fosforečná, provozní teplota 200 °C.
- **MCFC (Molten Carbonate FC):** Elektrolytem je tavenina alkalických uhličitanů, provozní teplota 600-700 °C.
- **SOFC (Solid Oxide FC):** Pevný oxidický elektrolyt, typicky ZrO₂ stabilizovaný 8 mol % Y₂O₃, provozní teplota 600-1000 °C.

Základním palivem pro všechny typy palivových článků je čistý vodík, který může v palivovém článku přímo reagovat za vývoje elektrického proudu. Současně je věnována velká pozornost i tzv. nepřímým palivům, ze kterých je možné vodík získávat reformovacím procesem. Mezi

nejvýznamnější nepřímé zdroje vodíku patří zemní plyn, metan, metanol, etanol, případně čpavek nebo i běžné současné kapalné pohonné hmoty do spalovacích motorů automobilů. Reformováním těchto zdrojů vodní parou nebo tzv. parciální oxidací při vysokých teplotách vzniká vodík s oxidy uhlíku.

Palivové články jsou konstruovány v různém geometrickém uspořádání. Existují dva základní způsoby konstrukce: planární typ, který může být realizován v kruhové či obdélníkové formě, a typ tubulární. Z důvodu zvýšení jmenovitého elektrického napětí a výkonu je nutno elementární články spojovat do větších celků o desítkách, stovkách až tisících článků, tzv. souborů palivových článků („Fuel Cell Stack“). Celý systém s palivovými články se může skládat z více zařízení, než jen z palivových článků. V principu jde o tři základní podsystémy: systém přípravy a reformování paliva, soubor palivových článků a případně měniče elektrického proudu ze stejnosměrného na střídavý.

1.1 Palivové články s pevným oxidickým elektrolytem

Palivové články s pevným oxidickým elektrolytem jsou v současnosti vedle článků typu PEM nejrozšířenějším typem palivových článků. Mohou být konstruovány v širokém výkonovém rozsahu a jsou v současné době využívány v širokém spektru aplikací (McPhail *et al.* 2013) (mobilní či vojenské energetické zdroje (<1 kW), pomocné (APU) a záložní energetické zdroje (1 až 250 kW), malé stacionární zdroje s kombinovaným využitím elektrické energie a tepla (m-CHP, 1–5 kW), střední až velké stacionární energetické zdroje (0,1–10 MW)). SOFC palivové články se vyznačují nejvyšší provozní teplotou ze všech typů palivových článků, dosahují účinnosti konverze paliva na elektrickou energii přes 60 %, v případě komplexního kombinovaného systému s využitím tepla může být výsledná účinnost přes 80 % (EG&G Technical Services 2004). Jak název napovídá, v SOFC článcích se používá pevný keramický elektrolyt namísto kapalného elektrolytu nebo membrány. Používá se jak planární, tak i tubulární konstrukční řešení. Vysoká provozní teplota umožňuje reformování paliva přímo uvnitř článku, v důsledku čehož je možné se obejít bez externího zařízení pro reformování paliva a používat širokou škálu paliv od vodíku po vyšší uhlovodíky. Současné jsou SOFC články poměrně odolné vůči obsahu síry v palivu ve srovnání s ostatními typy palivových článků. To jednak snižuje nároky na předzpracování paliva a také umožňuje použití paliv vyráběných z uhlí (svítiplyn aj.). Výhodou vysoké provozní teploty je i zlepšení reakční kinetiky, a tudíž odpadá nutnost použití drahých kovových katalyzátorů. Na druhou stranu vysoká provozní teplota přináší i některé nevýhody. Vedle delšího času potřebného pro spuštění či vypnutí článku a dosažení optimální provozní teploty a nutnosti důkladné tepelné izolace kvůli minimalizaci tepelných ztrát se jedná především o vyšší nároky na konstrukci a provoz článku. Ty plynou z vysokého tepelného namáhání použitých materiálů a z toho plynoucí nižší životnosti ve srovnání např. s PEM články. Důsledkem je požadavek na provoz v co nejvíce ustáleném režimu, což je v rozporu se současnými trendy použití palivových článků jako mobilních energetických zdrojů či jako distribuovaných zdrojů zapojených do elektrické sítě, ovlivněné velkým množstvím obnovitelných zdrojů se značně proměnlivým výkonem. Tyto způsoby využití tedy kladou nové nároky nejen na konstrukci SOFC článků, ale přirozeně i na jejich řídicí systém.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY ŘÍZENÍ SOFC ČLÁNKŮ

Strategie řízení je rozhodující pro splnění energetických a ekonomických požadavků koncového uživatele palivového článku. Cíle řízení závisí na účelu, k jakému je daný článek určen. V případě připojení k elektrické síti, ať již jako distribuovaný zdroj energie či v „ostrovním“ režimu, je hlavním cílem dodat požadovaný výkon. Jsou však případy, kdy je žádoucí provoz při konstantním stejnosměrném výstupním napětí článku, a primárním cílem řídicího systému je udržet konstantní výstupní napětí článku při změnách zátěže. To nastává například v případě, kdy je zátěž primárně stejnosměrného typu nebo při použití výkonové jednotky s měničem bez možnosti regulace napětí. V obou zmíněných provozních režimech je ovšem žádoucí vysoká efektivita provozu a maximalizace životnosti článku. V současné době rostou nároky nejen na stacionární distribuované zdroje energie v důsledku zapojení velkého množství obnovitelných zdrojů do elektrické sítě, ale i na menší mobilní zdroje. K požadavkům na provoz palivových článků se tak přidává nutnost pracovat v širokém výkonovém rozsahu, což klade nové požadavky na jejich konstrukci i řídicí systém.

Jakákoliv strategie řízení palivového článku musí tedy vedle přirozených regulovaných veličin (výkon/napětí) uvažovat i řadu dalších výstupních veličin a jejich regulaci či alespoň omezení maximálními a/nebo minimálními přípustnými hodnotami. Jde především o veličiny spojené se spolehlivostí a efektivitou provozu a životností článku: teplota (teploty) článku, teplotní gradienty, využití paliva (U_f , tj. poměr zreagovaného a dodaného vodíku), využití vzduchu (U_a , tj. poměr dodaného a zreagovaného kyslíku), poměr vodní páry k uhlíku v palivu („steam-to-carbon ratio“, SCR), výstupní teploty paliva/vzduchu, rozdíl tlaků vodíku a kyslíku na anodě a katodě či poměr vodíku a kyslíku ve vstupních prouděch. Řídicí systém se tedy musí pro dosažení optimálního provozu vyrovnat jak se změnami zátěže/výkonu, tak i s provozními omezeními zajišťujícími vysokou efektivitu a spolehlivost provozu. Přesto, že je v literatuře publikována řada řešení založených na klasických metodách řízení, je také evidentní, že použití pokročilých metod řízení, zejména MPC, umožňuje celkové zvýšení efektivitu a flexibility provozu SOFC i splnění všech omezujících podmínek.

Důležitým faktorem ovlivňujícím návrh řídicího systému je i silná vícenásobná provázanost jednotlivých akčních a regulovaných veličin, tzn. většina řízených veličin je významně ovlivňována více akčními veličinami. Vedle těchto interakcí mohou mít jednotlivé řízené veličiny také velmi rozdílné časové konstanty pro vazby se stejnou akční veličinou. Tato rozdílná dynamika je důležitým faktorem pro rozhodnutí, zda volit centralizovaný či decentralizovaný způsob řízení.

Vedle silné vícenásobné provázanosti jednotlivých regulovaných a akčních veličin a rozdílných dynamických vlastností těchto vazeb je důležitým faktorem, ovlivňujícím volbu řídicí strategie také nelineární chování palivového článku, které snižuje přesnost řízení založeného na lineárním modelu v okolí jednoho pracovního bodu. Nelineární zesílení je dobře patrné z chování otevřeného regulačního obvodu, viz např. (Aguiar *et al.* 2005). To nabývá na důležitosti v současné situaci, kdy je požadavek na flexibilní provoz v širokém výkonovém rozsahu pro různé druhy distribuovaných zdrojů energie. Protože nelineární MPC vykazuje i v současnosti řadu problémů souvisejících s nelineární optimalizací, které znesnadňují jeho praktické využití, může být vhodným řešením MPC založené na sadě přepínaných lineárních modelů (multilineární MPC).

Akční veličiny řídicího systému mohou být různé a jsou voleny na základě konkrétního technologického řešení. Protože vstupními proudy souboru palivových článků jsou palivo a okysličovadlo (nejčastěji vzduch), možné akční veličiny jsou zejména parametry těchto vstupních proudů: průtoky, tlaky a teploty paliva a vzduchu. Dále se jako akční veličina objevuje také celkový

tlak v systému. Při použití výkonové jednotky může být jako akční veličina použit i elektrický proud odebíraný z článku či výstupní napětí článku. Tyto fyzikální veličiny jsou řízeny regulačními ventily, kompresory atd. Do řízeného systému mohou být vedle samotného souboru palivových článků dále zahrnuty i další prvky, jako např. plynová turbína, tepelné výměníky, zařízení pro úpravu zemního plynu, reformer paliva, kondenzátor či baterie pro snížení výkyvů napětí při změnách zátěže apod., což s sebou přináší další případné regulované či akční veličiny spjaté s těmito systémy.

Aby bylo možné přesně stanovit současné otevřené směry vývoje v oblasti řízení SOFC článků a následně konkrétní cíle této práce, byla provedena podrobná literární rešerše dané problematiky. Ta byla zaměřena do dvou oblastí. První oblastí je stanovení parametrů a omezení klíčových pro efektivní provoz SOFC palivových článků a udržení jejich dlouhé životnosti. Druhou oblastí pak byly dosud publikované způsoby řízení SOFC článků. Hlavní poznatky rešerše jsou shrnuty v následujících dvou kapitolách.

2.1 Spolehlivost a životnost článku

Veličinami majícími zásadní význam pro bezpečnost provozu SOFC palivových článků jsou bezesporu stupeň využití paliva (U_f) a stupeň využití vzduchu (U_a). Tyto veličiny charakterizují poměr spotřebovávaného (zreagovaného) ($\dot{n}_{H_2}^r$) a dodávaného paliva ($\dot{n}_{H_2}^{in}$), resp. vzduchu ($\dot{n}_{O_2}^r, \dot{n}_{O_2}^{in}$) a lze je vyjádřit pomocí vztahů (2.1, 2.2):

$$U_f = \frac{\dot{n}_{H_2}^r}{\dot{n}_{H_2}^{in}} = \frac{2K_{er}I}{\dot{n}_{H_2}^{in} + \dot{n}_{CO}^{in} + 4 \cdot \dot{n}_{CH_4}^{in}} \quad (2.1)$$

$$U_a = \frac{\dot{n}_{O_2}^r}{\dot{n}_{O_2}^{in}} = \frac{K_{er}I}{\dot{n}_{O_2}^{in}} \quad (2.2)$$

kde N_0 je počet článků v souboru, F [C/mol] je Faradayova konstanta, $K_{er} = \frac{N_0}{4F}$ konstanta charakterizující množství vodíku/kyslíku spotřebovaného elektrochemickou reakcí [mol/C] a I [A] proud odebíraný z článku.

Překročení jejich maximálních přípustných hodnot může vést až ke zničení článku vyhladověním elektrod. Jejich aktuální hodnoty jsou závislé na odebíraném proudu a průtoku paliva, resp. vzduchu, tudíž maximální přípustné hodnoty budou uvažovány jako omezení navrženého MPC regulátoru. Nezbytné je rovněž vyhnout se překročení maximální povolené teploty článku. Přestože ve většině provozních režimů se provozní teplota pohybuje v poměrně úzkém rozsahu a překročení maximální povolené hodnoty nehrozí, bude uvažováno mezení absolutní teploty článku jako další omezení MPC regulátoru.

Minimální poměr páry a uhlíku v palivu (SCR) zabraňuje případné karbonizaci v anodovém prostoru, která může vést k vážnému poškození článku, či snížení jeho životnosti. Protože tato práce je zaměřena na řízení samotného článku, regulace SCR není její součástí a jako zdroj paliva bude uvažována částečně předreformovaná směs metanu a vodní páry s bezpečným poměrem $SCR = 2$. Dalším popsáním nežádoucím jevem, jehož prevence spočívá v omezení rychlosti změny tlaku, je zpětný tok na anodě. Protože tento jev je spjatý s rozšířením systému o plynovou turbínu, toto omezení nebude uvažováno. Dále bylo ukázáno, že nejsou v literatuře dostupné relevantní informace, že rozdíl tlaků mezi anodou a katodou má významný vliv na životnost či spolehlivost palivových článků typu SOFC. Toto omezení proto nebude uvažováno.

Důležitým faktorem, ovlivňujícím životnost článku, je tepelné namáhání. Vedle již zmíněného omezení absolutní hodnoty teploty článku mají zásadní vliv na tepelné namáhání změny teploty. Ty

mohou být charakterizovány různými způsoby. Jedním z nich jsou teplotní gradienty uvnitř článku. Jejich vliv na celkové tepelné namáhání SOFC článků s planárním uspořádáním není dosud zcela zřejmý. Navíc se jedná o neměřitelné veličiny a pro jejich predikci jsou nutné modely s rozloženými parametry. Ty jsou příliš složité pro použití v MPC, což omezuje jejich praktické využití. Naopak známou skutečností je velký negativní vliv rychlých změn teploty článku na jeho životnost a rovněž byl dobře popsán negativní efekt opakovaného kolísání teploty, které podporuje vznik mikrotrhlin v materiálech, ze kterých jsou vyráběny SOFC. Tradiční metoda, jak eliminovat vliv rychlých změn teploty, je provoz při konstantní teplotě. To ovšem není možné při provozu v širším rozsahu zátěže. Proto pro zvýšení životnosti článku bude jako další omezení MPC regulátoru uvažováno omezení rychlých změn teploty.

2.2 Stávající metody řízení SOFC

V rámci literární rešerše byla charakterizována řada vědeckých prací zaměřených na řízení SOFC článků. Tyto práce používají různé metody řízení, různé typy modelů SOFC a často se zaměřují i na rozdílné cíle. Navíc, protože existuje řada aplikací SOFC a také více konstrukčních variant samotného SOFC článku, jednotlivé zmiňované práce se liší typem uvažovaného SOFC článku (geometrické uspořádání, použité palivo), výběrem akčních a regulovaných veličin i případnými dalšími komponentami zahrnutými do regulované soustavy. Jedná se zejména o elektronické výkonové jednotky, systémy zpracování paliva, turbíny, prostředky pro kombinované využití tepla jako jsou tepelné výměníky či hořáky apod.

Z hlediska použité strategie řízení je možné publikované práce rozdělit do dvou skupin. První z nich jsou práce, využívající tradiční metody řízení. Ve většině těchto případů je řídicí systém založený na dvou PI(D) regulátorech. Tyto tradiční metody řízení jsou ovšem v novějších publikacích nahrazovány řídicími systémy, využívajícími některé ze současných moderních pokročilých metod řízení. Důvody jsou zřejmé. SOFC je vícerozměrové nelineární systém s širokým rozsahem charakteristických časových měřítek a silnou provázaností jednotlivých akčních a regulovaných veličin. Současně rostou nároky na flexibilitu provozu (široký rozsah výkonů) i zvýšení životnosti článku, což přináší další provozní omezení. Tyto náročné požadavky přirozeně vedou k použití pokročilých metod řízení a řízení založené na modelu je logickou volbou. Byly publikovány některé práce, využívající fuzzy MPC, ovšem vzhledem k současnému stavu problematiky modelování SOFC článků, nabývá na významu spíše MPC založené na tradičním modelu. Bylo publikováno několik prací, zabývajících se nelineárním MPC palivových článků typu SOFC. Některé ovšem vůbec neuvažují vliv teploty, případně se zaměřují na řízení soustavy článek/turbína. Kromě toho nelineární MPC vykazuje i v současnosti řadu problémů souvisejících s nelineární optimalizací, které znesnadňují jeho praktické využití. Naopak požadavek na provoz v širokém rozsahu zátěže vylučuje možnost použití linearizovaného modelu v okolí jednoho pracovního bodu.

Vhodným řešením může být MPC založené na sadě přepínaných lineárních modelů. Proto je překvapivé, že toto řešení není dosud v souvislosti se SOFC články dostatečně publikováno. Výjimkou je práce (Hajimolana *et al.* 2013), která ovšem neuvažuje řadu nezbytných omezení ani široký provozní rozsah.

Existuje tedy značný prostor pro výzkum využití multilineárního MPC pro řízení SOFC palivových článků. Nedořešeným problémem zůstává rovněž možnost omezení rychlosti změn teploty článku a tím zvýšení jeho životnosti.

3 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce je pro řízení SOFC palivových článků navrhnout řídicí systém, založený na multilineárním MPC regulátoru umožňující provoz v širokém rozsahu zátěže. Protože tato práce je zaměřena na řízení palivového článku jako zdroje elektrické energie, budou pro potřeby návrhu řízení uvažovány a modelovány technologické části a procesy, podstatné pro tento účel: samotný soubor SOFC palivových článků a reformování paliva.

Pro potřeby návrhu řídicího systému bude vytvořen a implementován vhodný dynamický model SOFC článku na základě známých fyzikálních a chemických principů fungování palivových článků a jejich modelů, dostupných v literatuře.

Při návrhu MPC regulátoru budou uvažována všechna provozní omezení, zajišťující bezpečnost provozu daného typu článku a bránící jeho zničení: maximální přípustné hodnoty stupně využití paliva a vzduchu, maximální přípustná teplota článku. Cílem je rovněž snížení tepelného namáhání článku a tím zvýšení jeho životnosti při změnách zátěže. K tomuto účelu bude realizováno omezení maximální rychlosti změny teploty článku.

SOFC články mohou být provozovány ve dvou hlavních provozních režimech. V případě připojení k elektrické síti je základním cílem dodat požadovaný výkon při změnách žádané hodnoty výkonu. Kolísání výstupního stejnosměrného napětí článku je v tomto případě kompenzováno modulačním indexem DC/AC měniče, který umožňuje připojení k elektrické síti. Naopak v případě přímého připojení článku ke stejnosměrné zátěži je nutná regulace na konstantní stejnosměrné napětí článku při změnách odebíraného proudu. Cílem této práce je navrhnout multilineární MPC regulátor a vhodný řídicí systém pro oba tyto režimy a simulačně ověřit jejich chování v širokém rozsahu zátěže.

4 DYNAMICKÝ MODEL SOFC PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Pro potřeby návrhu řídicího systému a simulační ověření jeho chování je třeba zvolit vhodný dynamický model SOFC palivového článku. V literatuře lze najít řadu modelů palivových článků s pevným oxidickým elektrolytem různého stupně složitosti. Při bližším zkoumání se ovšem ukázalo, že většina z nich není popsána do té míry, aby byla možná jejich pouhá přímá implementace pro potřeby simulací. Z modelů, vhodných pro návrh řízení, je poměrně dobře popsán model souboru palivových článků s pevným oxidickým elektrolytem a planárním uspořádáním vytvořený Murshedem a spoluautory (Murshed *et al.* 2007). Tento model byl též využit pro potřeby návrhu řízení v dalších pracích (např. (Huang *et al.* 2012, Murshed *et al.* 2010)) a je použit i v této disertační práci. V této kapitole bude stručně nastíněn způsob modelování všech uvažovaných jevů i získané výsledné vztahy. Původní model uvažuje jako primární palivo čistý vodík. Protože vodík jakožto primární palivo vykazuje řadu nevýhod (cena, dostupnost), je model dále rozšířen o vnitřní reformování paliva.

4.1 Planární SOFC s vodíkem jako palivem

Model vychází z široce citovaného modelu (Padulles *et al.* 2000), rozšiřuje jej o modelování teploty a je založen na následujících předpokladech: ideální chování plynů, konstantní tlak uvnitř jednotlivých kanálů, nadkritický tlakový spád na výstupu anodového i katodového kanálu, stejná teplota ve všech částech celého souboru palivových článků, ideální míchání plynů uvnitř článku, tj. výstupní teplota paliva i vzduchu je rovna vnitřní teplotě, zanedbatelné tepelné kapacity paliva a vzduchu ve srovnání s kapacitou pevných částí článku, zanedbatelné tepelné ztráty do okolního prostředí a pro výpočet napětí článku lze použít Nernstovu rovnici. Na základě těchto předpokladů jsou provedeny tepelné a materiálové bilance celého souboru palivových článků.

4.1.1 Materiálové bilance jednotlivých složek

Materiálová bilance i -té složky je definována jako ((Felder and Rousseau 2004), (Sedghisigarchi and Feliachi 2004)):

$$\frac{PV}{RT_s} \frac{dx_i}{dt} = \dot{n}_i^{\text{in}} - \dot{n}_i^{\text{out}} + \dot{n}_i^r \quad (4.1)$$

kde P [atm] je tlak, T_s [K] je teplota článku, V [m³] objem; x_i je molární koncentrace i -té složky, \dot{n}_i^{in} , \dot{n}_i^{out} , \dot{n}_i^r [mol/s] jsou vstupní, výstupní a reakční molární toky i -té složky.

Po zavedení parciálního tlaku je tedy bilanční rovnice pro vodík následující:

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{RT_s}{V_{an}} (\dot{n}_{H_2}^{\text{in}} - \dot{n}_{H_2}^{\text{out}} + \dot{n}_{H_2}^r) \quad (4.2)$$

kde V_{an} [m³] je objem anodového kanálu a p_{H_2} [atm] parciální tlak vodíku.

Přítom reakční a výstupní molární toky lze vyjádřit:

$$\dot{n}_{H_2}^r = 2K_{er}I \quad (4.3), \quad \dot{n}_{H_2}^{\text{out}} = K_{H_2}p_{H_2} \quad (4.4)$$

kde $K_{er} = N_0/4F$, I [A] je proud procházející článkem, N_0 je počet sériově zapojených jednotlivých článků v souboru článků, K_{H_2} [mol/atm/s] je molární konstanta pro průtok vodíku anodovým kanálem. Obdobným způsobem lze odvodit bilanční rovnice pro všechny ostatní složky.

4.1.2 Tepelná bilance

Provedená tepelná bilance popisuje celý soubor palivových článků najednou za předpokladu, že všechny součásti článku mají v každém okamžiku stejnou teplotu (palivo, okysličovadlo, elektrody, interkonektory atd.). Oprávněnost tohoto předpokladu pro potřeby řízení ve zvoleném výkonovém rozsahu dokládá statická charakteristika v (Murshed *et al.* 2007), kde je provedeno srovnání s modelem, který bilancuje zvlášť elektrody, interkonektor, palivový a vzduchový kanál a s modelem (Padulles *et al.* 2000) neuvažujícím vliv teploty. Výsledná bilance má následující podobu:

$$m_s \bar{C}_{ps} \frac{dT_s}{dt} = \sum_i \dot{n}_i^{in} \int_{T_{ref}}^{T_{in}} C_{p,i}(T) dT - \sum_i \dot{n}_i^{out} \int_{T_{ref}}^{T_s} C_{p,i}(T) dT - 2K_{er} I \Delta H_{ER}(T_s) - V_s I \quad (4.5)$$

kde m_s [kg] je hmotnost souboru palivových článků, \bar{C}_{ps} [J/K/kg] průměrná měrná tepelná kapacita článku, $C_{p,i}$ [J/mol/K] je měrná tepelná kapacita i -té plynné složky, ΔH_{ER} [J/mol] je reakční teplo elektrochemické reakce a V_s [V] napětí článku.

4.1.3 Napětí článku

Napětí článku V_s je počítáno z Nernstovy rovnice s uvažováním ztrát v důsledku ohmické, aktivační a koncentrační polarizace:

$$V_s = V_0 - \eta_{ohm} - \eta_{act} - \eta_{con} \quad (4.6)$$

kde napětí otevřeného obvodu V_0 je:

$$V_0 = N_0 \Delta E = N_0 \left[\Delta E_0 + \frac{RT_s}{2F} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right] \quad (4.7)$$

kde p_i jsou parciální tlaky [atm], ΔE_0 je standardní potenciál jednoho článku jehož lineární závislost lze vyjádřit na základě experimentálních dat (viz (EG&G Technical Services 2004), tab. 2-6).

Ohmické ztráty lze vyjádřit úbytkem napětí podle Ohmova zákona (4.8), přičemž hodnota odporu je závislá na teplotě a tuto závislost lze vyjádřit Steinhart-Hartovou rovnicí (4.9):

$$\eta_{ohm} = r(T_s) I \quad (4.8), \quad r(T_s) = r_0 \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \quad (4.9)$$

kde r_0 [Ω] je odpor při teplotě T_0 [K] a α je konstanta.

Pro výpočet aktivačních a koncentračních ztrát jsou použity vztahy (Braun 2002, Larminie and Dicks 2003, Sedghisigarchi and Feliachi 2004):

$$\eta_{act} = a + b \log I \quad (4.10), \quad \eta_{con} = -\frac{RT_s}{2F} \ln \left(1 - \frac{I}{I_L} \right) \quad (4.11)$$

kde a a b jsou konstanty v Tafelově rovnici (4.10) a I_L [A] je limitní proud článku.

4.2 Planární SOFC s vnitřním reformováním paliva (DIR-SOFC)

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, základním palivem pro všechny typy palivových článků je vodík, který ovšem není ideální z důvodů ceny a dostupnosti pro stacionární aplikace SOFC palivových článků. Proto je vhodné model SOFC článku popsany v předchozí kapitole (4.1) rozšířit o použití některého dostupnějšího paliva a vzhledem ke své rozšířenosti byl zvolen zemní plyn. Zemní plyn se skládá především z metanu a dále v malé míře z některých vyšších uhlovodíků (etan, propan, butan) a dusíku; pro potřeby modelování je tedy možné uvažovat metan jako palivo. Pokud je jako

palivo pro SOFC článek použít metan, je nutné metan reformovat katalytickou reakcí s vodní párou na vodík a další produkty. Toto je v současnosti možné realizovat třemi způsoby:

- 1) Vnější reformování (ER)
- 2) Nepřímé vnitřní reformování (IIR)
- 3) Přímé vnitřní reformování (DIR)

Protože reformní reakce je silně endotermní, vnější uspořádání (ER) vyžaduje zdroj tepla, jako např. hořák či horký plyn. V případě nepřímého vnitřního reformování paliva (IIR) je možné teplo uvolňované elektrochemickou reakcí využít přímo a zvýšit tak efektivitu celého procesu. Tato tepelná integrace může rovněž redukovat potřebný průtok vzduchu, který je často používán při regulaci teploty článku. Přímé spojení článku s reformačním procesem (DIR) nabízí další výhody, zejména další redukci energetických ztrát (produkce tepla je přímo v místě jeho spotřeby) a snížení ceny. Přesto přímé vnitřní reformování paliva stále vyžaduje určitý stupeň předreformování paliva na primární palivo, tj. vodík. Je to z důvodu předejití usazování uhlíku (karbonizace) a omezení příliš vysokých teplotních gradientů. Na druhou stranu, další výhodou DIR je výrazně rychlejší dynamika ve srovnání s ER. Z výše uvedených důvodů je model rozšířen o přímé vnitřní reformování paliva. Uvažovaným palivem je předreformovaná směs metanu, vodní páry, vodíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého o složení 28,3 % H₂, 5,0 % CO₂, 2,3 % CO, 47,3 % H₂O a 17,1 % CH₄, nicméně model umožňuje použít libovolný stupeň předreformování metanu. Rozšíření modelu zahrnuje modelování dynamiky uvažovaných chemických reakcí a s tím spojenou úpravu bilančních rovnic. Naopak výpočet výstupního napětí článku zůstává stejný (rovnice 4.6 až 4.11).

4.2.1 Reformní reakce

Při endotermické reformní reakci reaguje metan s vodní párou za přítomnosti katalyzátoru, vzniká vodík a oxid uhelnatý (4.12), který následně exotermicky reaguje s vodní párou („water-gas shift reaction“, konverze vodního plynu) (4.13).



Aby bylo možné určit koncentraci všech uvažovaných složek v anodovém kanálu v každém okamžiku, je nutné modelovat dynamiku těchto reakcí. Dle (Ahmed and Foger 2000) je možné vyjádřit rychlost reformní reakce (4.12) takto:

$$r_r = -r_{\text{CH}_4} = K_r p_{\text{CH}_4}^\alpha p_{\text{H}_2\text{O}}^\beta \exp\left(-\frac{E_r}{RT_{\text{palivo}}}\right), \quad (4.14)$$

kde K_r je koeficient rychlosti reformní reakce, E_r je aktivační energie, α a β jsou koeficienty pro metan a páru.

Ve srovnání s reformní reakcí (4.12) je konverzní reakce (4.13) výrazně rychlejší a lze tedy uvažovat, že se nachází v rovnovážném stavu. Její rovnovážnou konstantu lze dle (Campanari and Iora 2004) vyjádřit takto:

$$K_{\text{eq}} = \frac{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}} = \exp\left(\frac{4276}{T_{\text{palivo}}} - 3,961\right). \quad (4.15)$$

Protože v rovnovážném stavu platí, že dopředná i zpětná rychlost reakce jsou si rovny, lze z definice rovnovážné konstanty odvodit následující rovnici pro rychlost konverzní reakce (4.13):

$$r_s = K_s (K_{\text{eq}} p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}} - p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}), \quad (4.16)$$

kde koeficient K_s je nutné volit dostatečně veliký, dle (Qi *et al.* 2006) je použita hodnota $K_s = 100$.

4.2.2 Materiálové bilance jednotlivých složek

Na základě modelu chemických reakcí popsaném v předchozí kapitole je nutné modifikovat a rozšířit materiálovou bilanci popsanou v kapitole 4.1.1. V bilanční rovnici (4.1) pro jednotlivé složky je nutné vyjádřit reakční molární toky \dot{n}_i^r pro každou jednotlivou složku na základě známé stechiometrie jednotlivých probíhajících reakcí (1.1, 4.12, 4.13). Bilance všech uvažovaných složek v anodovém i katodovém kanálu jsou pak následující:

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{RT_s}{V_{an}} (\dot{n}_{H_2}^{in} - K_{H_2} p_{H_2} - 2K_{er} I + 3AN_0 r_r + AN_0 r_s) \quad (4.17)$$

$$\frac{dp_{CO_2}}{dt} = \frac{RT_s}{V_{an}} (\dot{n}_{CO_2}^{in} - K_{CO_2} p_{CO_2} + AN_0 r_s) \quad (4.18)$$

$$\frac{dp_{CO}}{dt} = \frac{RT_s}{V_{an}} (\dot{n}_{CO}^{in} - K_{CO} p_{CO} + AN_0 r_r - AN_0 r_s) \quad (4.19)$$

$$\frac{dp_{H_2O}}{dt} = \frac{RT_s}{V_{an}} (\dot{n}_{H_2O}^{in} - K_{H_2O} p_{H_2O} + 2K_{er} I - AN_0 r_r - AN_0 r_s) \quad (4.20)$$

$$\frac{dp_{CH_4}}{dt} = \frac{RT_s}{V_{an}} (\dot{n}_{CH_4}^{in} - K_{CH_4} p_{CH_4} - AN_0 r_r) \quad (4.21)$$

$$\frac{dp_{O_2}}{dt} = \frac{RT_s}{V_{ca}} (\dot{n}_{O_2}^{in} - K_{O_2} p_{O_2} - K_{er} I) \quad (4.22)$$

$$\frac{dp_{N_2}}{dt} = \frac{RT_s}{V_{ca}} (\dot{n}_{N_2}^{in} - K_{N_2} p_{N_2}) \quad (4.23)$$

kde A [m^2] je reakční plocha.

Protože (Padulles *et al.* 2000) ani (Murshed *et al.* 2007) nepracují s vnitřním reformováním paliva, k dispozici jsou pouze molární průtočné konstanty pro průtok vodíku, kyslíku a vodní páry. Molární průtočné konstanty ostatních složek je ovšem možné snadno dopočítat na základě vztahu $\frac{\dot{n}_i}{p_i} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_i}} = K_i$, kde \dot{n}_i je molární průtok látky i , p_i její parciální tlak, M_i molární hmotnost, K_i molární průtočná konstanta, K_{an} molární průtočná konstanta anodového kanálu.

Stejně tak objemy anodového a katodového kanálu byly dopočteny na základě publikovaných hodnot časových konstant jednotlivých složek, kdy časovou konstantu i -té složky τ_i lze vyjádřit jako $\tau_i = \frac{V_{an(ca)}}{K_i RT}$, kde V_{an} , resp. V_{ca} , je objem anodového, resp. katodového kanálu [m^3].

4.2.3 Tepelná bilance

Tepelná bilance (4.5) musí být rovněž rozšířena o reakční tepla uvažovaných reformačních chemických reakcí a nabývá tedy tvaru:

$$\begin{aligned} m_s \bar{c}_{ps} \frac{dT_s}{dt} &= \sum_i \dot{n}_i^{in} \int_{T_{ref}}^{T_{in}} C_{p,i}(T) dT - \sum_i \dot{n}_i^{out} \int_{T_{ref}}^{T_s} C_{p,i}(T) dT \\ &- 2K_{er} I \Delta H_{ER}(T_s) - r_r AN_0 \Delta H_R(T_s) \\ &- r_s AN_0 \Delta H_S(T_s) - V_s I \end{aligned} \quad (4.24)$$

kde ΔH_R [J/mol] je reakční teplo reformační reakce (4.12), ΔH_S [J/mol] je reakční teplo konverze vodního plynu (4.13), A [m^2] je reakční plocha, N_0 počet článků v souboru a význam ostatních symbolů je stejný jako v rovnici (4.5).

5 NÁVRH ŘÍZENÍ SOFC ČLÁNKU V RŮZNÝCH PROVOZNÍCH REŽIMECH

Cílem této práce je vypracovat postup návrhu multilineárního MPC regulátoru pro SOFC palivový článek, který umožní provoz v širokém rozsahu zátěže a současně umožní snížení tepelného namáhání článku během změn zátěže omezením rychlosti změny jeho teploty. Vedle toho musí regulátor zajistit splnění standardních provozních omezení, která zabraňují poškození článku (omezení hodnot využití paliva a využití vzduchu).

Protože byly identifikovány dva hlavní provozní režimy SOFC článků, které vyžadují odlišný návrh řídicího systému, je následující část této disertace, která se zabývá vlastním návrhem multilineárního MPC regulátoru, rozdělena na dvě kapitoly: regulace výkonu palivového článku připojeného k elektrické síti a regulace na konstantní výstupní napětí článku. Pro oba režimy je vypracován postup návrhu multilineárního MPC regulátoru. Chování řídicího systému je ověřeno simulačně a výsledky simulací jsou publikovány a diskutovány.

5.1 Regulace výkonu dodávaného do sítě

Palivové články typu SOFC jsou často využívány jako stacionární zdroj elektrické energie. Tyto zdroje mohou být použity buď izolovaně od elektrické sítě (ostrovní režim), nebo jako distribuovaný zdroj energie připojený na elektrickou síť.

V případě ostrovního režimu je palivový článek doplněn o zařízení na ukládání energie (akumulátor, případně superkondenzátor), umožňující pokrytí odebíraného výkonu při rychlém zvýšení zátěže (tj. do doby, než stihne palivový článek zvýšit výkon na požadovanou úroveň). Tento akumulátor je naopak dobíjen při poklesu zátěže či v ustáleném stavu. Přesto je důležitá schopnost samotného článku rychle reagovat na měnící se celkový odebíraný výkon, protože tato schopnost umožňuje snížit cenu zařízení na ukládání energie a tím i celého systému. I v případě připojení k elektrické síti je žádoucí, aby palivový článek dokázal rychle reagovat na měnící se požadavky na dodávaný výkon. Tato potřeba zásadně nabývá na významu v současné době, kdy zvyšující se množství obnovitelných zdrojů připojených k síti způsobuje výkyvy dodávaného výkonu, které musí být kompenzovány jinými zdroji.

Tato kapitola se tedy zabývá návrhem multilineárního MPC regulátoru pro regulaci výkonu SOFC palivového článku připojeného k elektrické síti. Její nejdůležitější výsledky jsou publikovány v (Horalek and Hlava 2015b).

5.1.1 Cíle řízení

Základním provozním cílem systému založeného na palivovém článku připojeného k elektrické síti je dodat požadovaný střídavý výkon, přičemž současné nároky vyžadují schopnost reagovat na změny požadovaného výkonu v širokém výkonovém rozsahu. Vedle toho je samozřejmě nutné udržet střídavé napětí na výstupu systému na požadované hodnotě dané napětím elektrické sítě. Současně je nezbytné splnit provozní omezení, bránící poškození či dokonce zničení palivového článku. Tato provozní omezení jsou (viz kapitoly 2 a 3) maximální přípustné hodnoty využití paliva a vzduchu bránící zničení článku vyhladověním a maximální povolená provozní teplota daná konstrukcí článku. Navíc je ale nezbytné zajistit co možná ekonomicky nejefektivnější provoz. To znamená udržet hodnoty využití paliva a vzduchu okolo optimálních hodnot v ustáleném stavu. Protože na výslednou ekonomickou kalkulaci ceny produkované energie má samozřejmě významný vliv i životnost článku,

cílem je také prodloužení životnosti článku omezením jeho tepelného namáhání při změnách zátěže. Prostředkem k tomuto cíli je snížení maximální rychlosti změny teploty při změnách zátěže.

5.1.2 Model DC/AC měniče

Protože výstupem palivového článku je stejnosměrné napětí, aby mohl být připojen k elektrické síti, musí být toto napětí převedeno na střídavé napětí o vhodné hodnotě. Za tímto účelem je zapotřebí k palivovému článku připojit vhodnou výkonovou jednotku a tu zahrnout do řídicího systému.

Výkonová jednotka musí obsahovat DC/AC měnič pro převod stejnosměrného napětí na střídavé a současně umožnit regulaci výstupního střídavého napětí na vhodnou konstantní hodnotu střídavého napětí. V případě, že DC/AC měnič neumožňuje regulaci napětí, nebo se vstupní střídavé napětí pohybuje v příliš velkém rozsahu, výkonová jednotka bývá doplněna ještě o DC/DC měnič pro úpravu stejnosměrného napětí. Protože ale časová konstanta měničů je v řádu mikrosekund až milisekund (viz např. (Luo *et al.* 2005)), a její vliv na dynamiku celého systému je tedy zanedbatelný (časové konstanty článku jsou v řádu sekund), bude v této práci dále uvažována jednotka, sestávající pouze z DC/AC měniče. Pro popis chování měniče byl zvolen model použitý v řadě publikací zabývajících se řízením výkonu palivového článku (např. (Bhuyan and Mahapatra 2011, El-Sharkh *et al.* 2004, Chatterjee *et al.* 2014, Li *et al.* 2007, Saha *et al.* 2007)). Jedná se o jednoduchý model měniče se sinusovou pulsně-širokovou modulací (PWM) (Hatziaioniu *et al.* 2002), kde výstupní napětí a výkon jsou regulovány modulačním indexem měniče (m) a fázovým úhlem měniče (δ) podle vztahů (5.1, 5.2, 5.3):

$$V_{ac} = mV_{dc} \quad (5.1), \quad P_{ac} = \frac{mV_{dc}V_s}{X} \sin(\delta) \quad (5.2), \quad Q_{ac} = \frac{(mV_{dc})^2 - mV_{dc}V_s \cos(\delta)}{X} \quad (5.3)$$

kde V_{ac} [V] je efektivní hodnota střídavého napětí na výstupu měniče, V_{dc} [V] je stejnosměrné výstupní napětí článku, P_{ac} [W] a Q_{ac} [VAr] jsou činný, resp. jalový výkon na výstupu měniče, m [-] je modulační index měniče, δ [rad] je fázový úhel měniče představující fázový posun mezi výstupním napětím měniče a napětím v síti, X [Ω] je reaktance vedení spojujícího palivový článek se sítí a V_s [V] je efektivní hodnota fázového napětí v síti.

V případě, že je uvažován bezetrátový měnič, se musí činný výkon dodávaný do sítě shodovat s výkonem samotného článku, a tedy platí (5.4) a stejnosměrný proud odebíraný z článku lze vyjádřit podle (5.5):

$$P_{ac} = P_{dc} = V_{dc}I \quad (5.4), \quad I = \frac{mV_s}{X} \sin\delta \quad (5.5)$$

Vzhledem k již zmíněné rychlosti dynamiky měniče ve srovnání s dynamikou článku, mohou být tyto statické vztahy použity i pro simulaci dynamického chování celého regulovaného systému. Pro eliminaci přímé vazby mezi akčními (δ , m) a výstupními (P_{ac} , V_{ac}) veličinami v důsledku použití statických vztahů, byl v simulacích na výstup měniče přidán přenos prvního řádu s jednotkovým zesílením a časovou konstantou 10 ms, jejíž velikost odpovídá dynamice reálných měničů.

5.1.3 Ustálené stavy

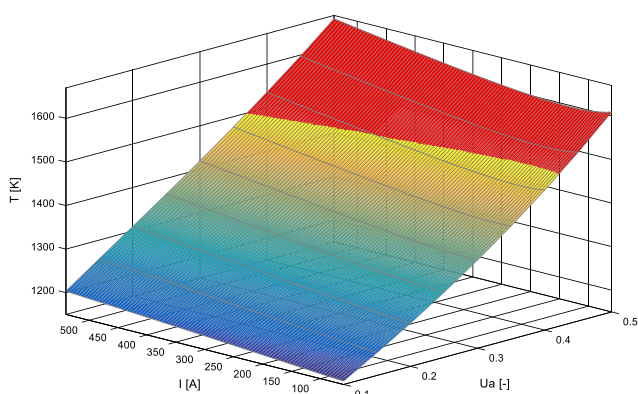
Před návrhem samotného řídicího systému je třeba zvolit vhodné provozní parametry a jejich rozsahy pro uvažovaný palivový článek tak, aby byly v celém provozním rozsahu splněny všechny ekonomické i bezpečnostní nároky kladené na dlouhodobý provoz palivového článku. Proto je zapotřebí nejdříve provést analýzu ustálených stavů SOFC článku. V této práci je provedena tato analýza pro SOFC palivový článek s planárním uspořádáním a s vnitřním reformováním paliva, jehož

model je popsán v kapitole 4 a který je použit pro všechny simulace. Výsledkem analýzy je volba vhodných provozních parametrů či jejich rozsahů.

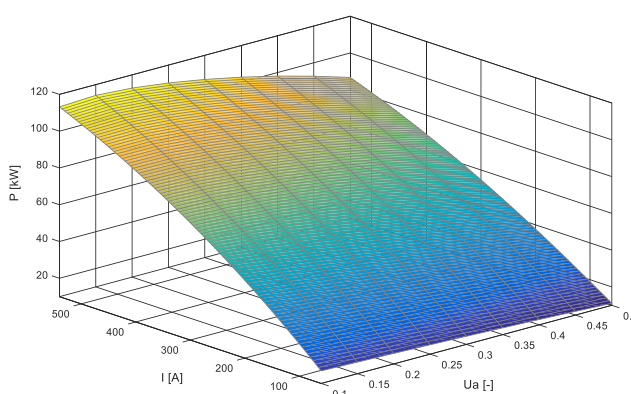
Skutečností je, že stejného výkonu lze dosáhnout různou kombinací vstupních veličin průtoku paliva, průtoku vzduchu a množství odebíraného proudu. Proto byla na základě běžně dostupných údajů pro SOFC články zvolena optimální hodnota využití paliva 0,85 (v literatuře jsou uváděny hodnoty 0,75 až 0,9 jako optimální pro obdobné typy palivových článků). Pro tuto stanovenou hodnotu U_f byly provedeny výpočty napětí, teploty a výkonu při různých hodnotách odebíraného proudu a průtoku vzduchu.

Jedním z provozních omezení vysokoteplotních SOFC palivových článků je maximální přípustná provozní teplota. Ta je daná způsobem výroby a konstrukcí článku a může se lišit pro konkrétní palivové články. V této práci byla pro použitý model článku použita maximální přípustná teplota 1500 K, doporučená pro daný typ článku (Huang *et al.* 2012), která je současně ve shodě s hodnotami běžně uváděnými v literatuře pro SOFC palivové články. Překročení této maximální přípustné hodnoty absolutní teploty článku pro ustálené stavy vypočtené pro různé hodnoty stupně využití vzduchu a různý proudový odběr je vyznačeno červenou barvou na obrázku 5.1. Je patrné, že teplota stoupá s klesajícím průtokem vzduchu (tj. rostoucí stupeň využití vzduchu U_a). Obrázek 5.2 zachycuje výkon článku, opět při různých hodnotách proudového zatížení a různém stupni využití vzduchu. Příliš vysoký průtok vzduchu (tj. nízký stupeň využití vzduchu) vede k nízkým provozním teplotám článku a není příliš ekonomicky výhodný, zatímco nízký průtok vzduchu (tj. vysoký stupeň využití vzduchu) vede k teplotám blízkým maximální přípustné teplotě. Proto byla jako optimální hodnota stupně využití vzduchu v ustáleném stavu použita hodnota $U_a = 0,25$. Tato hodnota je současně ve shodě s dostupnou literaturou.

Výsledkem analýzy ustálených stavů SOFC článku použitého k simulacím je provozní rozsah daný již zmíněnými hodnotami využití paliva (0,85) a kyslíku (0,25) a proudovou zátěží 100–500 A, odpovídající rozsahu výkonů přibližně 25 až 105 kW.



Obrázek 5.1: Teplota článku v ustáleném stavu jako funkce proudu a využití vzduchu s vyznačenou oblastí nadkritické teploty (při stupni využití paliva 0,85)



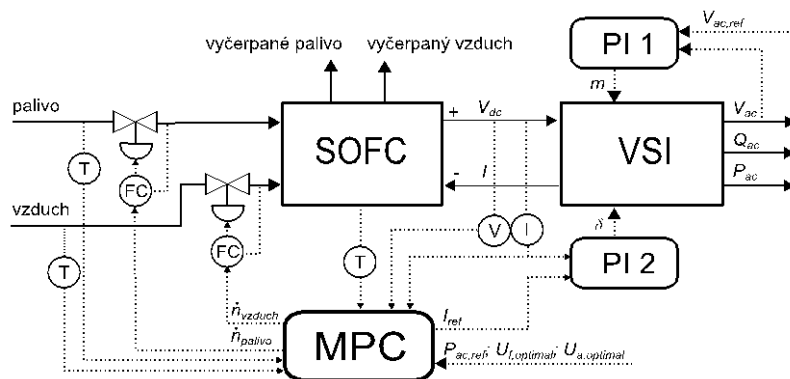
Obrázek 5.2: Hodnoty výkonu pro různou proudovou zátěž a různý průtok vzduchu v ustáleném stavu při stupni využití paliva 0,85.

5.1.4 Návrh řídicího systému

Celý regulovaný systém je složený ze souboru palivových článků a měniče, který převádí stejnosměrný výkon dodávaný palivovým článkem na střídavý výkon o vhodné hodnotě napětí a umožňuje připojení k elektrické síti. Z hlediska návrhu řídicího systému je možné celý systém rozdělit na dva subsystémy se zcela rozdílnými časovými konstantami: palivový článek a měnič. Akčními veličinami samotného palivového článku jsou průtok paliva, průtok vzduchu a proud odebíraný

z článku, hlavními výstupy stejnosměrný výkon a hodnota stejnosměrného napětí. Akčními veličinami DC/AC měniče jsou jeho modulační index a fázový úhel, hlavními výstupními veličinami měniče jsou výstupní činný výkon, střídavé napětí a stejnosměrný proud odebíraný z článku. Proud odebíraný z článku není tedy možné uvažovat jako přímou akční veličinu, ale je nutné ho řídit pomocí fázového úhlu měniče. Výstupní stejnosměrné napětí článku je poruchovou veličinou z hlediska měniče. Naopak střídavý výkon na výstupu měniče a stejnosměrný výkon článku je možné uvažovat stejný vzhledem k zanedbatelným energetickým ztrátám měniče a malým časovým konstantám měniče.

Přes vazby mezi oběma subsystemy není z důvodu zcela rozdílných časových konstant možné použít jeden MPC regulátor zajišťující řízení celého systému. Navíc k řízení měniče se běžně ukazuje jako zcela dostačující použití PI regulátorů. Proto pro soustavu SOFC článku s DC/AC měničem byla navržena struktura řízení, zahrnující multilineární MPC regulátor pro řízení samotného článku a dva PI regulátory zajišťující regulaci měniče. Schéma znázorňuje obrázek 5.3:



Obrázek 5.3: Regulační schéma palivového článku s měničem

Princip řídicího systému je následující: MPC regulátor pro palivový článek má za cíl regulovat výkon článku na základě měnících se požadavků při splnění všech omezujících podmínek. Protože navržený regulátor musí být schopen pracovat v širokém rozsahu výkonů a jeden lineární model nedokáže postihnout nelineární chování článku v celém uvažovaném provozním rozsahu, MPC regulátor pracuje s více lineárními modely (multilineární MPC). Realizace velikosti odebíraného proudu je zajištěna DC/AC měničem a příslušným podřazeným PI regulátorem, jak je patrné z obrázku 5.3 (PI 2). Dále je potřeba regulovat výstupní napětí měniče (V_{ac}) na konstantní žádanou hodnotu, což je opět zajištěno regulační smyčkou s PI regulátorem (PI 1).

Volba vhodných lineárních modelů

Pro návrh lineárního přepínaného MPC regulátoru je zásadní správná volba vhodných, tzn. dostatečně reprezentativních linearizovaných modelů spolu s pravidly pro jejich přepínání (tj. oblast platnosti). Tradičně, tato úloha dekompozice nelineárních systémů byla řešena rozložením na základě jednotlivých fyzikálních součástí systému, na základě fyzikálních a chemických jevů probíhajících v systému, či podle provozních podmínek (Murray-Smith and Johansen 1997). Všechny tyto přístupy ovšem silně závisejí na zkušenostech a znalostech daného systému. Navíc, tyto přístupy často vedou k výrazně většímu počtu jednotlivých lineárních modelů, než je nezbytné, což komplikuje návrh regulátoru. Proto byly publikovány práce, snažící se o odstranění těchto problémů a o vytvoření více obecných a systematických metod dekompozice nelineárních systémů pro potřeby návrhu řídicího systému. Tyto práce nabízejí různé algoritmy pro určení vhodné sady lineárních modelů, nicméně většina z nich je založena na určení gap metriky mezi dvěma lineárními systémy (viz např. (Du *et al.* 2009, Du *et al.* 2013, Galán *et al.* 2003)).

Gap metrika byla původně použita v teorii řízení v pracích (El-Sakkary 1985, Vidyasagar 1984) jako prostředek pro studium neurčitostí ve zpětnovazebních systémech při návrhu robustního řízení. Nicméně bylo také ukázáno (El-Sakkary 1985, Georgiou and Smith 1990), že se jedná o vhodný nástroj pro určení podobnosti chování dvou lineárních systémů z hlediska zpětnovazebního řízení. Hodnota gap metriky (δ) pro dva lineární systémy S_1 a S_2 je v rozsahu $0 \leq \delta(S_1, S_2) \leq 1$. Hodnota $\delta(S_1, S_2)$ blízká nule znamená možnost řízení systémů S_1 a S_2 jedním zpětnovazebním regulátorem. Naopak hodnota $\delta(S_1, S_2)$ blízká se jedné znamená velkou vzdálenost obou systémů v prostoru lineárních systémů a odlišné vlastnosti z hlediska zpětnovazebního řízení.

Gap metriky je využito při výběru vhodných reprezentativních lineárních modelů uvažovaného modelu SOFC článku i v této disertační práci. V případě regulace výkonu SOFC palivového článku je hlavním zdrojem nelineárního chování rozdílná proudová zátěž článku při různém výkonu, proto byla proudová zátěž uvažována jako základní veličina pro rozdělení jednotlivých lineárních modelů. Silný vliv na chování článku má i teplota článku, a proto bylo zkoumáno také možné rozdělení na základě teploty článku.

Pro relevantní mezní hodnoty teplot článku (tj. maximální odchylky teploty od teploty v ustáleném stavu při přechodových dějích během velkých rychlých změn výkonu až o 50 %) byly zjištěny hodnoty gap metrik menší než 0,5 při jednotlivých úrovních zátěže. Vedle toho se též během simulací ukázalo, že rozdělení modelů na základě teploty nevede ke zlepšení kvality regulace. Pro regulaci výkonu SOFC článků se tedy ukázalo jako vhodné a dostatečné rozdělení jednotlivých lineárních modelů pouze na základě úrovně proudové zátěže článku. To je mimo jiné způsobeno tím, že provozní ustálené stavy při různé zátěži jsou uvažovány při stejných hodnotách využití paliva a kyslíku.

V případě použitého modelu SOFC článku je uvažovaný proudový provozní rozsah 100 až 500 A. Hodnoty gap metrik pro vybrané modely linearizované na různých úrovních proudového zatížení jsou znázorněny v tabulce 5.1 (linearizace při hodnotách $U_f = 0,85$ a $U_a = 0,25$). Je vidět, že gap metrika mezi modely, reprezentujícími ustálené stavy při mezních zvažovaných proudových odběrech 100 a 500 A, je přibližně 0,63, což již není vyhovující pro použití jednoho regulátoru. Byly proto použity dva lineární modely pro návrh regulátoru. Jako dostatečně reprezentativní byly zvoleny dva linearizované modely na úrovních 170 a 355 A s rozsahy platnosti 100 až 250 A, resp. 250 až 500 A. V tom případě je maximální gap metrika dvou lineárních modelů v každém použitém proudovém intervalu 0,33 a gap metrika mezi zvolenými reprezentativními lineárními modely a krajními modely zvolených intervalů je vždy stejná, tj. přibližně 0,17.

Tabulka 5.1: Gap metriky linearizovaných modelů

I [A]	100	170	250	355	500
100	0	0,17	0,33	0,49	0,63
170	0,17	0	0,17	0,33	0,48
250	0,33	0,17	0	0,17	0,33
355	0,49	0,33	0,17	0	0,17
500	0,63	0,48	0,33	0,17	0

Zavedení výpočetního zpoždění

Většina prací publikovaných v oblasti MPC pracuje se idealizovaným předpokladem, že změna akční veličiny je realizována ve stejném okamžiku, ve kterém dojde ke změření výstupů ze systému (tj. nulové zpoždění vlivem délky výpočtu). Tento předpoklad nebývá v reálném nasazení vždy akceptovatelný a to i z toho důvodu, že výpočetní výkon průmyslového regulátoru je kvůli nárokům kladeným na průmyslová zařízení (včetně ceny) často i násobně nižší, než výpočetní výkon počítačů používaných k simulacím. Proto je v této práci uvažováno zpoždění v realizaci akčních zásahů, což přináší nutnost příslušným způsobem upravit matice stavových modelů získaných linearizací

nelineárního modelu článku. Princip zavedení výpočetního zpoždění do stavového modelu je popisuje Maciejowsky ((Maciejowski 2002), kapitola 2.5) a jeho výsledkem je stavová rovnice ve tvaru (5.6):

$$x(k+1) = Ax(k) + B_1u(k-1) + B_2u(k) \quad (5.6)$$

Toto řešení obsahuje závislost $x(k+1)$ na $u(k-1)$. Z důvodu implementace v MPC je potřeba ho převést do standardního tvaru diskrétního lineárního stavového modelu, což lze provést zavedením rozšířeného stavového vektoru $\xi(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix}$, v důsledku čehož nabývá stavová rovnice standardního tvaru:

$$\xi(k+1) = \tilde{A}\xi(k) + \tilde{B}u(k), \quad \text{kde } \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & B_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B_2 \\ I \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

a výstupní rovnice:

$$y(k) = C_c x(k) = \tilde{C}\xi(k), \quad \text{kde } \tilde{C} = [C_c, 0] \quad (5.8)$$

Omezení rychlosti změny teploty

Jedním z úkolů navrhované strategie řízení je prodloužení životnosti SOFC článků. Bylo ukázáno, že tohoto cíle může být dosaženo omezením rychlosti změny teploty článku, vedoucí ke snížení tepelného namáhání článku. Aby byl navrhovaný prediktivní regulátor schopen omezit rychlost změny teploty článku, je zapotřebí uvažovat rychlost změny teploty článku jako výstup predikčního modelu regulátoru a na ten je pak možné aplikovat standardní omezující podmínky MPC regulátoru.

Pro zavedení rychlosti změny teploty článku jako výstupu predikčního modelu byl diskrétní lineární model rozšířen o výstup ΔT_s [K/s], představující změnu teploty článku za sekundu. Pro tento účel byl rozšířen stavový vektor o stav $T_s(k-1)$ a výstup ΔT_s je ve výstupní rovnici lineárního stavového modelu $\Delta T_s = (T_s(k) - T_s(k-1))/T_v$, kde T_v [s] je vzorkovací perioda, která je ve výstupní rovnici přítomna pouze z důvodu odstranění závislosti ΔT_s na délce vzorkovací periody. Na základě toho jsou příslušným způsobem upraveny i matice stavového modelu.

Návrh regulátoru

Výše popsané metody pro volbu vhodných lineárních modelů, zavedení výpočetního zpoždění a omezení rychlosti změny teploty článku je vhodné použít při návrhu multilineárního MPC regulátoru palivového článku. V konkrétním případě palivového článku uvažovaného v této práci (viz kapitola 4) byly na základě výsledků analýzy gap metrik pro regulátor použity dva lineární modely získané linearizací při různém proudovém zatížení článku a současně byly stanoveny proudové rozsahy pro platnost každého modelu (viz tabulka 5.1). Oba lineární modely byly diskretizovány a upraveny tak, aby zohledňovaly výpočetní zpoždění, které je uvažováno o délce $\tau = 50$ ms. Poté byly tyto diskrétní lineární modely rozšířeny o výstup ΔT_s , představující rychlost změny teploty článku. Navržený MPC regulátor pracuje se standardním kvadratickým kritériem ve tvaru (5.9):

$$J(k) = \sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} (w_{y,j} (y_{j,ref}(k+p|k) - y_j(k+p|k)))^2 + \sum_{p=0}^{N_u-1} \sum_{j=1}^{n_u} (w_{\Delta u,j} \Delta u_j(k+p|k))^2 \quad (5.9)$$

kde N je horizont predikce, N_u horizont řízení, n_y počet regulovaných veličin, n_u počet akčních veličin, Δu změny akčních veličin, y a y_{ref} představují regulované veličiny, resp. jejich žádané hodnoty, $w_{y,j}$ představuje váhu odchylky j -tého regulovaného výstupu od jeho žádané hodnoty, $w_{\Delta u,j}$ váhu změny j -té akční veličiny.

Regulovanými výstupy MPC regulátoru jsou výkon, využití paliva a využití vzduchu. Vedle toho obsahuje predikční model další výstupy v podobě napětí a teploty článku a přidaný výstup charakterizující rychlost změn teploty článku ΔT_s . Teplota a napětí článku jsou měřené veličiny.

Výkon článku je definovaný jako $P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{fc}$ a lze ho proto uvažovat také jako měřený výstup, stejně jako využití paliva a využití vzduchu, které lze stanovit na základě proudu odebíraného z článku a známého složení paliva/vzduchu. Akčními veličinami MPC regulátoru jsou průtoky paliva a vzduchu a proud odebíraný z článku, teploty vstupních proudů jsou uvažovány jako měřené poruchy.

Pro bezpečný provoz článku (prevence poškození elektrod vyhladováním) byla použita provozní omezení maximálních přípustných hodnot využití paliva a vzduchu $U_{f,max} = 0,9$ a $U_{a,max} = 0,8$ (viz kapitoly 2.1 a 3). Rovněž bylo použito omezení maximální přípustné absolutní teploty článku $T_{s,max} = 1500$ K. Maximální teplota je daná typem a konstrukcí článku, použita byla hodnota uváděná pro použitý model SOFC článku v (Huang *et al.* 2012). S cílem snížit tepelné namáhání článku při změnách zátěže a zvýšit tak jeho životnost byla omezena rychlostí změny teploty článku. Protože maximální a minimální hodnota ΔT_s je závislá na typu a konstrukci palivového článku, byla zvolena základní hodnota tohoto omezení $\pm 0,2$ K/s a dále bylo zkoumáno chování regulátoru při hodnotách tohoto omezení $\pm 0,1$ a $\pm 0,3$ K/s. Nicméně navržený řídicí systém umožňuje volbu tohoto omezujícího parametru na základě konstrukčních parametrů konkrétního zařízení.

Protože jednotlivé akční a regulované veličiny vykazují značně rozdílná měřítka (např. využití paliva či vzduchu se pohybuje v rozsahu několika desetín a teplota v rozsahu stovek kelvinů), bylo z důvodu snazšího ladění vah jednotlivých regulovaných veličin a lepší numerické podmíněnosti kvadratického problému využito úpravy měřítka jednotlivých akčních a regulovaných veličin na základě předpokládaného provozního rozsahu dané veličiny.

Další parametry regulátoru byly nastaveny a optimalizovány na základě simulací následujícím způsobem: Vzorkovací perioda $T_v = 1$ s, horizont predikce $N = 100$ (tj. 100 s), horizont řízení $N_u = 20$. Váhy: Z důvodu příliš agresivních akčních zásahů pozorovaných během simulací byly nastaveny váhy na změny akčních veličin. Váha na změnu průtoku paliva $w_{\Delta \dot{n}_{palivo}} = 0,1$, váha na změnu průtoku vzduchu $w_{\Delta \dot{n}_{vzduch}} = 0,1$ a nulovou váhu na změnu odebíraného proudu $w_{\Delta I_{ref}} = 0$. Protože hlavním úkolem regulátoru je dodat požadovaný výkon, váha na odchylku výstupního výkonu od žádané hodnoty byla nastavena na $w_{P_{ac}} = 10$. Stupeň využití paliva a kyslíku je žádoucí udržet kolem optimálních hodnot v ustáleném stavu, váhy na jejich odchylky od optimálních hodnot byly nastaveny na $w_{U_f} = 1$, $w_{U_a} = 1$. Ostatní výstupy musejí pouze splnit omezující podmínky, a proto jejich váhy byly nastaveny na nulu

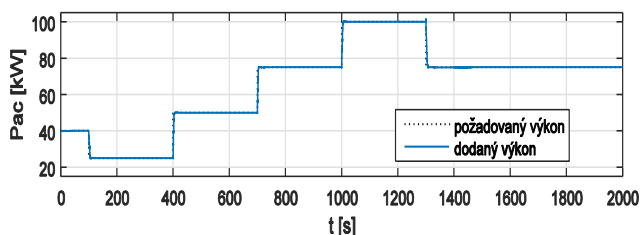
Vedle MPC regulátoru obsahuje navržený řídicí systém také dva pomocné PI regulátory. Úkolem prvního PI regulátoru (PI 1, obrázek 5.3) je udržet střídavé napětí na výstupu měniče na konstantní hodnotě a byl proto naladěn pro potlačení poruchy, kterou je stejnosměrné napětí palivového článku ($K_p = 1$, $T_i = 0,1$). Druhý PI regulátor (PI 2, obrázek 5.3) má za úkol regulovat množství proudu odebíraného z palivového článku na základě hodnoty vypočítané prediktivním regulátorem a byl proto naladěn pro rychlou odezvu na změnu žádané hodnoty ($K_p = 0,4$, $T_i = 1/15$).

5.1.5 Výsledky simulací

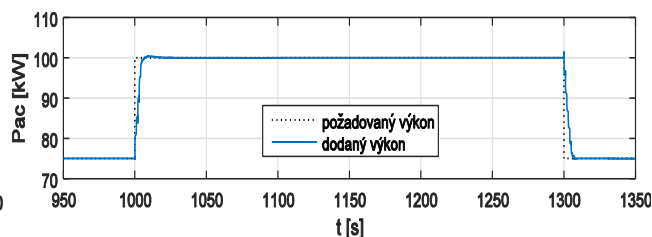
Simulace při změnách zátěže

Chování navrženého řídicího systému bylo ověřeno simulačně při skokových změnách požadovaného výkonu v provozním rozsahu od 25 do 100 kW. Simulace začíná z ustáleného stavu na výkonové hladině 40 kW. Následně jsou realizovány skokové změny požadovaného výkonu v časech 100 s (−15 kW), 400 s (+25 kW), 700 s (+25 kW), 1000 s (+25 kW) a 1300 s (−25 kW). Splnění výkonových požadavků v průběhu celé simulace je znázorněno na obrázku 5.4. Obrázek 5.5 pak zachycuje detailnější pohled na výkon pro skokové změny žádané hodnoty v časech 1000 s a 1300 s.

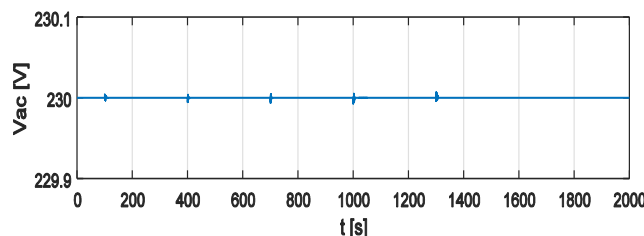
Střídavé napětí na výstupu měniče regulované PI regulátorem na konstantní hodnotu 230 V je zachyceno na obrázku 5.6. Maximální regulační odchylka je přibližně zanedbatelných 0,01 V. Průběh neregulovaného stejnosměrného napětí článku, které představuje poruchu z hlediska regulace střídavého napětí na výstupu měniče, zachycuje obrázek 5.7. Důležitými veličinami jsou stupeň využití paliva a stupeň využití vzduchu. Jejich průběhy zachycují obrázky 5.8 a 5.9. Tyto veličiny nesmí překročit maximální přípustnou hodnotu (0,9 pro U_f a 0,8 pro U_a), což je splněno, a dále je také vidět, že se jejich hodnoty po splnění výkonových požadavků rychle vrací ke svým optimálním úrovním 0,85 (U_f), resp. 0,25 (U_a). Hodnoty rychlosti změny teploty ΔT_s jsou na obrázku 5.10. V jejím průběhu je možné pozorovat krátkodobá (trvající cca 20 s) překročení stanoveného omezení $\pm 0,2$ K/s. Tato překročení jsou způsobena odlišným chováním lineárního predikčního modelu ve srovnání s nelineárním modelem (z hlediska řešení optimalizační úlohy regulátoru nedochází k porušení omezení). Tato překročení mají ale maximální velikost pouze 0,01 K/s a lze tak omezení považovat za úspěšně splněná. Na obrázku 5.11 je absolutní teplota článku během simulace. Zde je patrné, že v tomto režimu provozu se teplota pohybovala přibližně v rozsahu 1300 až 1355 K a nenastala tedy nutnost omezit teplotu z důvodu přiblížení či překročení maximální povolené hodnoty 1500 K. Průběh akčních veličin průtok paliva a průtok vzduchu je na obrázku 5.12. Akční veličina proud je na obrázku 5.13, kde je též patrná velmi dobrá shoda mezi referenční hodnotou proudu jakožto akční veličinou MPC regulátoru a skutečným proudovým odběrem, jak je realizován pomocným PI regulátorem.



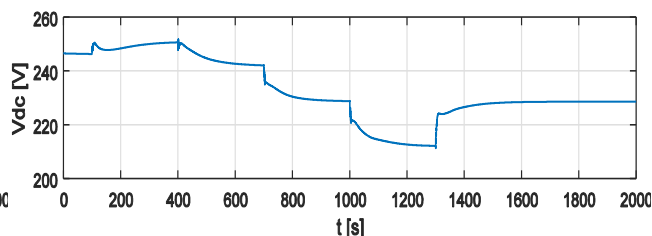
Obrázek 5.4: Průběh dodávaného výkonu a změny žádané hodnoty výkonu



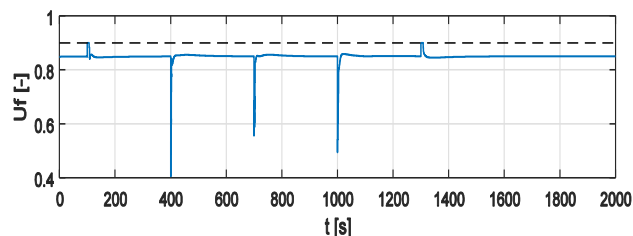
Obrázek 5.5: Průběh dodávaného výkonu a změny žádané hodnoty výkonu (detail)



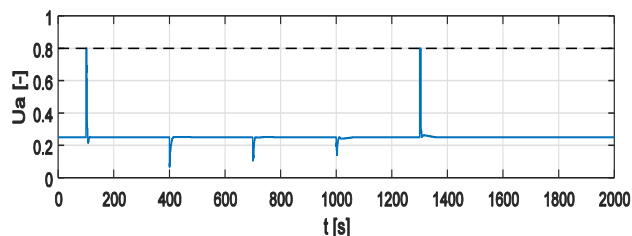
Obrázek 5.6: Průběh regulovaného střídavého napětí na výstupu měniče při změnách žádané hodnoty výkonu



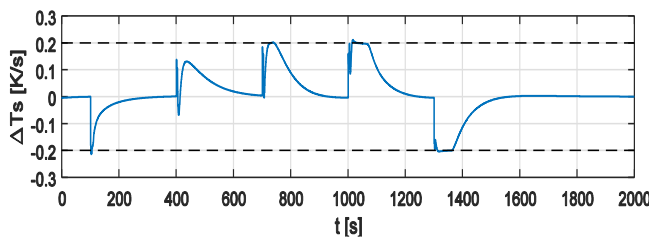
Obrázek 5.7: Průběh výstupního stejnosměrného napětí článku při změnách žádané hodnoty výkonu



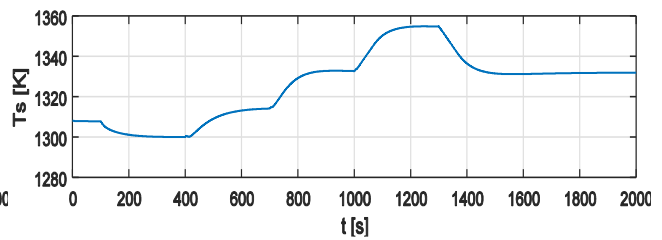
Obrázek 5.8: Průběh stupně využití paliva při změnách žádané hodnoty výkonu



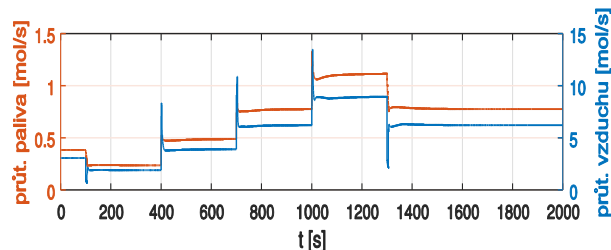
Obrázek 5.9: Průběh stupně využití vzduchu při změnách žádané hodnoty výkonu



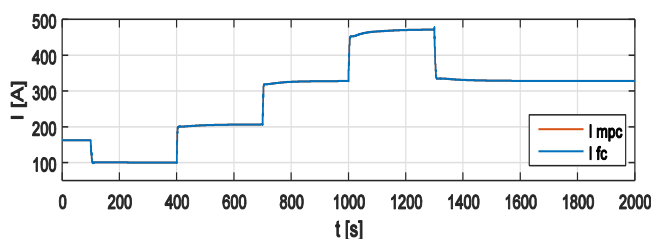
Obrázek 5.10: Průběh ΔT_s při změnách žádané hodnoty výkonu



Obrázek 5.11: Průběh teploty článku při změnách žádané hodnoty výkonu



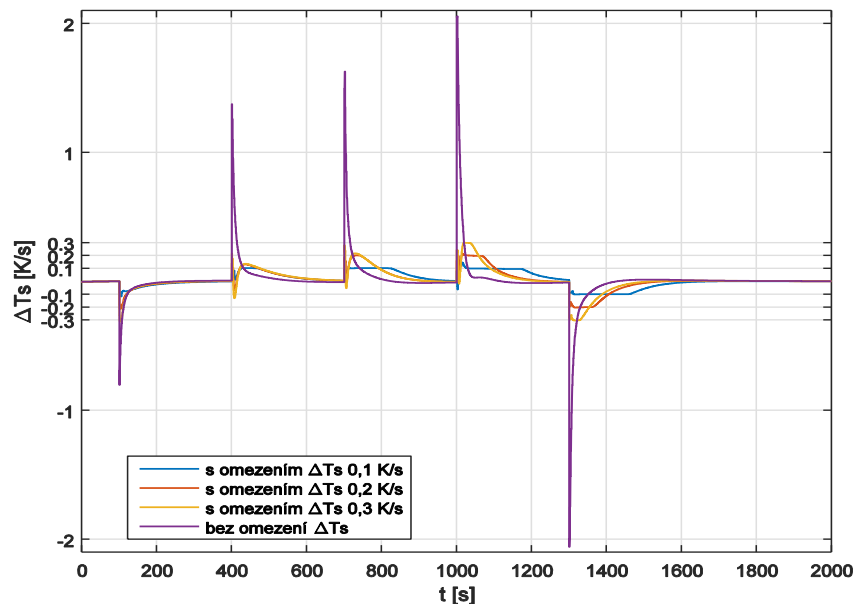
Obrázek 5.12: Průtok paliva a vzduchu při změnách žádané hodnoty výkonu



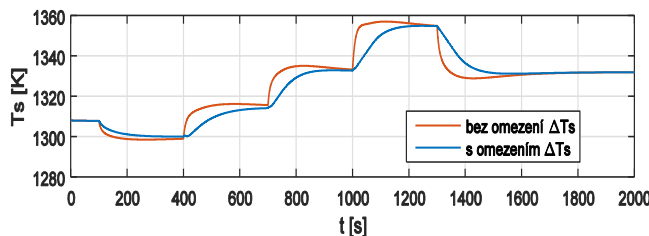
Obrázek 5.13: Skutečné proudové zatížení článku (I_{fc}) a hodnoty proudu požadované prediktivním regulátorem (I_{mpc}) při změnách žádané hodnoty výkonu.

Srovnání výsledků s omezením ΔT_s a bez omezení ΔT_s

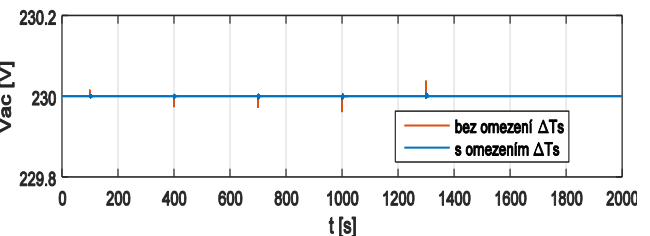
Pro posouzení, jaký vliv na chování regulátoru má zavedení omezení rychlosti změny teploty článku, byly provedeny také simulace bez omezení ΔT_s . Průběh změn požadovaného výkonu zde byl stejný jako během simulace s omezením ΔT_s (viz obrázek 5.4). V tomto případě byly navíc provedeny simulace s různým nastavením velikosti omezení ΔT_s (0,1, 0,2, 0,3 K/s) a průběhy jsou zachyceny na obrázku 5.14. Je patrné, že při regulačním průběhu bez omezení ΔT_s dosahují rychlé teplotní změny přesahující $\pm 0,2$ K/s jak výrazně větší maximální hodnoty, tak i doby, po kterou rychlost teplotní změny přesahuje stanovená omezení. Další obrázek 5.15 pak zachycuje absolutní teploty článku během simulací s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a zcela bez omezení. Hodnoty regulovaného střídavého napětí na výstupu měniče srovnává obrázek 5.16. Ačkoliv maximální regulační odchylky napětí při regulaci bez omezení ΔT_s jsou o něco větší, stále dosahují maximální hodnoty přibližně 0,04 V, což je možné považovat za zanedbatelné. Dodaný výkon je možné porovnat na obrázku 5.17. Protože v tomto časovém měřítku je požadovaný výkon téměř nerozlišitelný od dodaného výkonu jak regulátoru pracujícím s omezením ΔT_s , tak i bez tohoto omezení, je znázorněna část simulace v detailnějším časovém měřítku na obrázku 5.18. Na něm jsou vykresleny odezvy dodaného výkonu na skoky žádané hodnoty výkonu v časech 1000 s (ze 75 na 100 kW, 5.18a) a 1300 s (ze 100 na 75 kW, 5.18b). Zde již je patrný rozdíl v rychlosti odezvy výkonu regulátoru s omezením ΔT_s a bez omezení ΔT_s . Doba dosažení žádané hodnoty výkonu je přibližně 7–9 s pro regulátor s omezením $\pm 0,2$ K/s a 2–4 s pro regulátor bez omezení ΔT_s . Tomu odpovídají i pomalejší změny proudu po skokových změnách žádané hodnoty výkonu, jak je patrné z obrázků 5.19 a 5.20. Obrázky 5.21 a 5.22 zachycují důležité parametry stupeň využití paliva a stupeň využití vzduchu. V obou případech jsou dodržena provozní omezení (maximální povolená hodnota pro využití paliva 0,9 a pro využití vzduchu 0,8) a je zjevný rychlý návrat k optimálním hodnotám po dosažení žádaného výkonu.



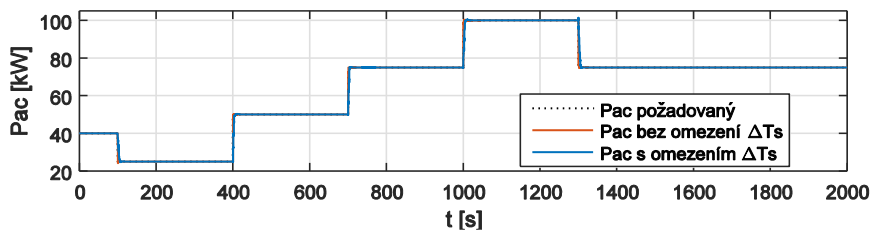
Obrázek 5.14: Srovnání ΔT_s při použití regulátoru s různou hodnotou omezení ΔT_s a bez omezení ΔT_s během změn žádané hodnoty výkonu



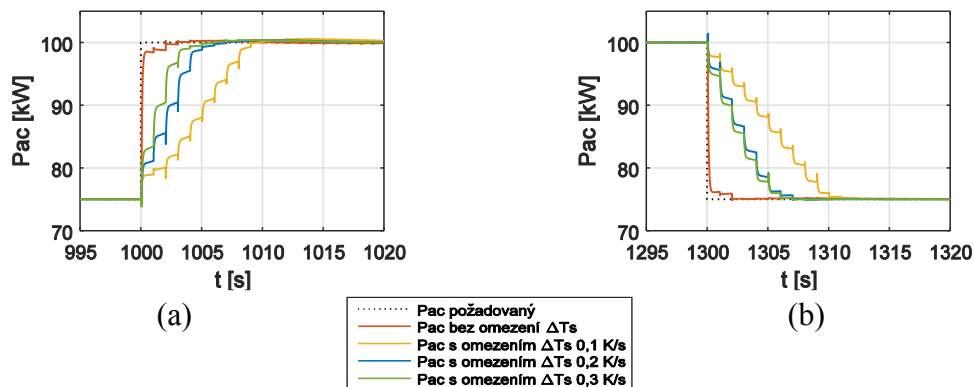
Obrázek 5.15: Srovnání absolutních teplot při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s během změn žádané hodnoty výkonu



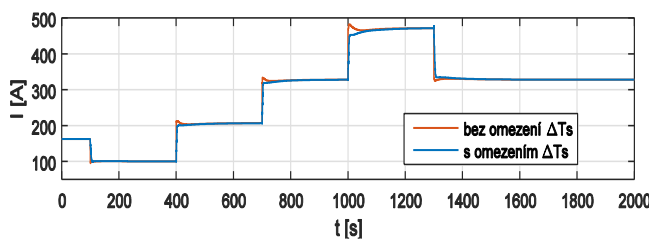
Obrázek 5.16: Regulované napětí na výstupu měniče během změn výkonu při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s



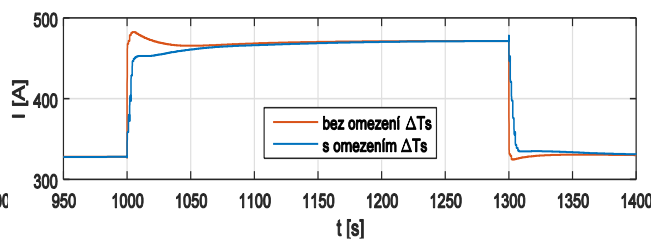
Obrázek 5.17: Dodávaný a požadovaný výkon při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s



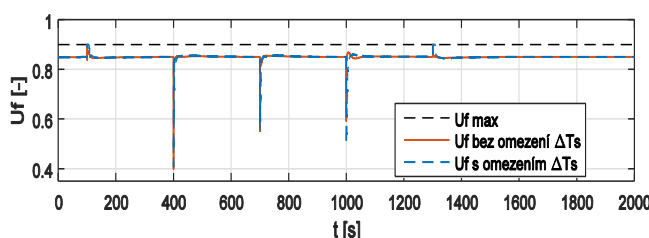
Obrázek 5.18: Dodávaný a požadovaný výkon při použití regulátoru s omezením ΔT_s a bez omezení ΔT_s – detailní srovnání



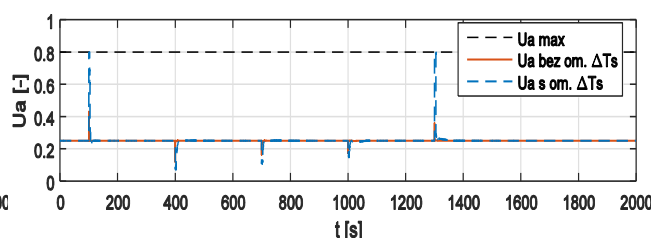
Obrázek 5.19: Odebíraný proud při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s



Obrázek 5.20: Odebíraný proud při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s – detail



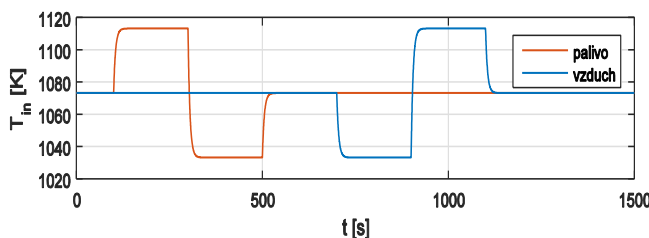
Obrázek 5.21: Využití paliva při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s



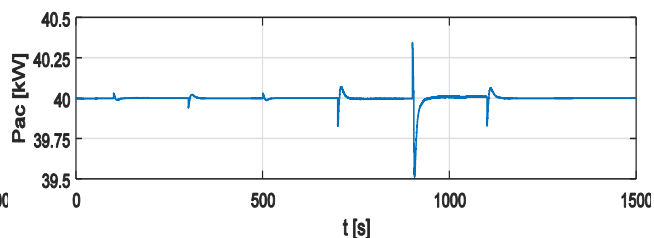
Obrázek 5.22: Využití vzduchu při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s

Reakce na měřené poruchy teplot vstupních proudů

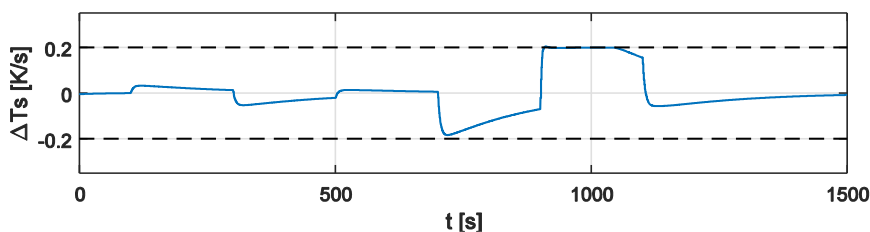
Vedle změn žádané hodnoty výkonu bylo také testováno chování regulátoru při změnách teploty vstupních proudů (tj. teplota paliva a vzduchu), které jsou uvažovány jako měřené poruchy. Skokové změny teplot vstupních proudů mají spíše teoretický charakter a v praxi se projeví dynamika těchto poruch např. vlivem dynamiky tepelných výměníků. Z toho důvodu byly provedeny simulace, kdy změny teploty nejsou skokové, ale mají charakter přenosu prvního řádu s časovou konstantou 5 s (obrázek 5.23). Simulace probíhá při konstantní žádané hodnotě výkonu 40 kW. Výchozí teploty paliva i vzduchu jsou 800 °C. Následně jsou realizovány změny teploty paliva v časech 100, 300 a 500 s (+40 °C, -80 °C, +40 °C) a změny teploty vzduchu v časech 700, 900 a 1100 s (-40 °C, +80 °C, -40 °C). Z průběhu dodaného výkonu (obrázek 5.24) je zřejmý větší vliv změny teploty vzduchu ve srovnání se změnou teploty paliva. To je dáno obecně podstatně větším průtokem vzduchu v porovnání s průtokem paliva a tudíž větším vlivem změny teploty na celkovou tepelnou bilanci článku. Maximální odchylka výkonu je zde pouze méně než 0,5 kW. Obrázek 5.25 pak ukazuje splnění omezující podmínky na rychlost změny teploty.



Obrázek 5.23: Změny teplot vstupních proudů (měřená porucha) s dynamikou prvního řádu



Obrázek 5.24: Výkon při změnách teploty vstupních proudů s dynamikou prvního řádu



Obrázek 5.25: ΔT_s v reakci na změny teploty vstupních proudů s dynamikou prvního řádu

5.1.6 Zhodnocení výsledků

Pro soustavu tvořenou planárním SOFC palivovým článkem a DC/AC měničem byla navržena struktura řídicího systému tvořeného multilineárním MPC regulátorem a dvěma pomocnými PI regulátory. Úkolem MPC regulátoru je splnění výkonových požadavků při splnění omezení, která zajišťují ekonomický provoz článku, brání jeho poškození a prodlužují jeho životnost. Pro splnění těchto nároků bylo implementováno omezení využití paliva a vzduchu a maximální provozní teploty článku zabraňující poškození článku. Snížení tepelného namáhání bylo dosaženo omezením maximální rychlosti změny teploty článku. Volba vhodných lineárních modelů pro multilineární MPC regulátor byla provedena s využitím metody gap metriky. Při návrhu MPC regulátoru bylo uvažováno výpočetní zpoždění, přítomné v reálných aplikacích. Funkcí pomocných PI regulátorů je konvertovat neregulované stejnosměrné výstupní článku na střídavé napětí s konstantní hodnotou a realizovat množství proudu odebíraného z článku stanovené MPC regulátorem. Akčními veličinami z hlediska celého řídicího systému jsou průtok paliva, průtok vzduchu, proud odebíraný z článku, fázový úhel měniče a modulační index měniče. Vstupní teploty paliva a vzduchu jsou uvažovány jako měřené poruchy, měřenými výstupy jsou teplota článku, výstupní stejnosměrné napětí článku, proud procházející článkem a střídavé napětí na výstupu měniče.

Chování navrženého řídicího systému bylo ověřeno simulačně. Nejprve byly provedeny simulace změny žádané hodnoty výkonu. Byly realizovány skokové změny žádané hodnoty výkonu o velikosti 15–25 kW v širokém pracovním rozsahu 25–100 kW. Bylo porovnáno dosažení požadovaného výkonu při různých hodnotách omezení rychlosti změny teploty. Při skokové změně požadovaného výkonu o 25 kW (ze 75 kW) bylo pozorováno dosažení žádané hodnoty výkonu ± 1 kW za přibližně 2 s (bez omezení ΔT_s), 4–5 s (omezení $\Delta T_s = \pm 0,3$ K/s), 5–5,5 s (omezení $\Delta T_s = \pm 0,2$ K/s) a 9 s (omezení $\Delta T_s = \pm 0,1$ K/s). Vedle změn žádané hodnoty výkonu byla testována reakce na měřené poruchy, kterými jsou teploty vstupních proudů paliva a vzduchu. Bylo ukázáno, že změna teploty paliva má ve srovnání se změnou teploty vzduchu výrazně slabší vliv jak na výkon, tak i teplotu, což je dáno nižším hmotnostním průtokem paliva ve srovnání s průtokem vzduchu, a tedy menším vlivem na celkovou energetickou bilanci článku. I při velké změně teploty vzduchu o 80 °C realizované přenosem prvního řádu tak, aby se charakter poruchy blížil reálným podmínkám, byla zaznamenána maximální odchylka výkonu 0,5 kW od žádané hodnoty 40 kW, trvání odchylky bylo 10 s (dosažení výkonu $40 \pm 0,1$ kW). Střídavé napětí na výstupu měniče bylo během všech simulací bez problémů regulováno PI regulátorem na požadovanou hodnotu 230 V se zanedbatelnými maximálními překmity $\pm 0,04$ V.

Provedené simulace potvrdily, že metody popsané v této práci jsou vhodné pro návrh multilineárního MPC regulátoru, který je schopen regulovat výkon SOFC palivového článku připojeného k elektrické síti v širokém rozsahu výkonů a při splnění požadovaných provozních omezení zabraňujících poškození článku. Současně bylo také ověřeno, že multilineární MPC regulátor a celý navržený řídicí systém umožňují omezit tepelné namáhání a zvýšit tak životnost článku omezením rychlosti změny teploty. Přestože byl ukázán negativní vliv tohoto omezení na

rychlost dosažení požadovaného výkonu při změně žádané hodnoty výkonu, je možné dosáhnout velmi dobrého kompromisu mezi výkonem regulátoru a životností článku.

5.2 Regulace konstantního výstupního napětí článku

Jedním z možných provozních režimů palivových článků s pevným oxidickým elektrolytem je provoz při regulaci na konstantní stejnosměrné výstupní napětí článku. V praxi se jedná především o aplikace, kdy je zátěž primárně stejnosměrného typu, ale také případy použití výkonové jednotky se starším typem měniče bez možnosti regulace napětí („six-step“ měnič). Tato kapitola je proto zaměřena na návrh řídicího systému, který bude schopen regulovat výstupní napětí článku na konstantní žádanou hodnotu při změnách zátěže v širokém provozním rozsahu. Hlavní dosažené výsledky jsou rovněž publikovány v odborné literatuře (Horalek and Hlava 2015a).

5.2.1 Cíle řízení

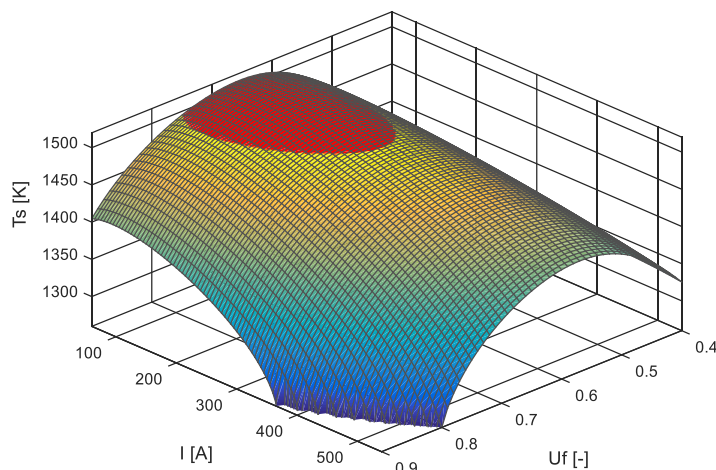
V případě, kdy je zátěž primárně stejnosměrného typu, je základním cílem při provozu palivového článku udržet konstantní stejnosměrné výstupní napětí článku při změnách zátěže, která způsobuje změny množství proudu odebíraného z článku. Současně je nezbytné splnit provozní omezení, bránící poškození či dokonce zničení palivového článku. To znamená nepřesáhnout maximální přípustné hodnoty využití paliva, využití vzduchu a absolutní teploty článku (viz kapitoly 2 a 3). Také je z důvodu udržení vysoké efektivity provozu snahou udržet stupeň využití paliva okolo optimální hodnoty v ustáleném stavu. Naproti tomu stupeň využití vzduchu není v případě regulace na konstantní výstupní napětí možné držet kolem jedné optimální hodnoty při různé zátěži, protože pomocí průtoku vzduchu je kompenzováno výstupní napětí při změnách zátěže. Cílem naopak zůstává omezit tepelné namáhání článku při změnách zátěže a zabránit tak zhoršení životnosti článku. Prostředkem k dosažení tohoto cíle je snížení maximální rychlosti změny teploty při změnách zátěže.

5.2.2 Stanovení provozních stavů článku

Provoz palivového článku při konstantním výstupním napětí vyžaduje správnou volbu hodnoty výstupního napětí tak, aby toto napětí bylo dosažitelné v širokém provozním rozsahu a současně byly splněny další provozní požadavky. Před návrhem samotného regulátoru je tedy nejdříve nutné provést analýzu ustálených stavů uvažovaného palivového článku a na jejím základě zvolit výkonovou hladinu a její provozní rozsah spolu s žádanou hodnotou výstupního napětí. Tyto hodnoty navíc musí splňovat provozní omezení, kterými jsou maximální přípustná teplota článku, optimální hodnota stupně využití paliva zajišťující efektivitu provozu a maximální a minimální hodnotou stupně využití vzduchu. Jak již bylo zmíněno, v režimu regulace na konstantní výstupní napětí článku není možné dosáhnout jedné optimální hodnoty stupně využití vzduchu pro různé hodnoty zátěže v ustáleném stavu. Nicméně je zapotřebí stejně jako v případě regulace výkonu zabránit překročení maximální hodnoty stupně využití vzduchu z důvodu předejití poškození elektrody. Současně příliš nízká hodnota stupně využití vzduchu znamená příliš velký průtok vzduchu, který není energeticky výhodný.

Z těchto důvodů byly spočítány hodnoty vstupních a výstupních veličin pro ustálené stavy při různých hodnotách zátěže. Obecně lze říci, že při stanoveném konstantním optimálním stupni využití paliva je nutné při různé zátěži kompenzovat napětí na zvolenou hodnotu změnou průtoku vzduchu. To je ovšem možné pouze do určité míry. Při velké zátěži je nutné zvyšovat průtok vzduchu a toto zvyšování je omezeno maximálním průtokem, který je možný jak z hlediska konstrukčního, tak i ekonomického (velmi vysoké tlaky snižují celkovou efektivitu systému). Kromě toho působí vzduch

jako chladicí médium, tudíž při vysokém průtoku klesá teplota článku a zvolené napětí již není vůbec dosažitelné. Naopak při nízké zátěži může dojít k problému s příliš vysokou teplotou článku. Tato omezení jsou patrná na obrázku 5.26, který znázorňuje závislost teploty článku na proudovém zatížení a stupni využití paliva pro hodnoty $V_{dc} = 220$ V. V obrázku je patrná oblast nedosažitelných stavů pro vysoké hodnoty využití paliva a při vysoké zátěži. Navíc je zde červeně znázorněna oblast, kdy ustálený stav vede k teplotě vyšší než maximální přípustná hodnota 1500 K (daná konstrukčními parametry uvažovaného článku) a tento stav je tedy také nepřijatelný.

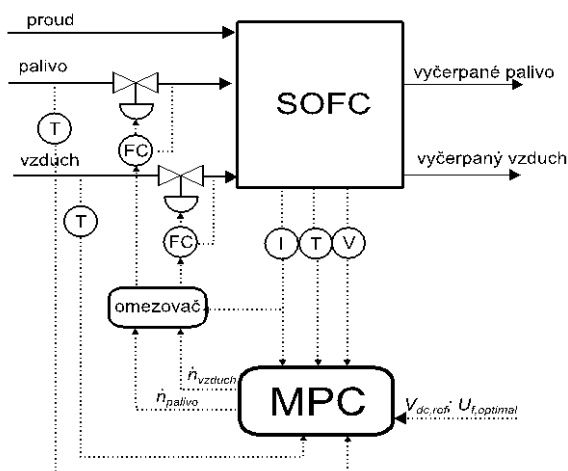


Obrázek 5.26: Dosažitelnost ustálených stavů pro různé hodnoty proudu a využití paliva při výstupním napětí článku 220 V

Na základě analýzy ustálených stavů byl určen vhodný rozsah zátěže pro uvažovaný model palivového článku 100–500 A, stupeň využití paliva v ustáleném stavu 0,80 a hodnota výstupního napětí článku 220 V.

5.2.3 Návrh řídicího systému

Pro regulaci SOFC článku na konstantní výstupní napětí pomocí multilineárního MPC regulátoru jsou uvažovány akční veličiny průtok vzduchu a průtok paliva. Změny zátěže jsou představovány proudem odebíraným z článku, který je uvažován jako měřená porucha. Rovněž vstupní teploty paliva a vzduchu jsou uvažovány jako měřené poruchy. Měřenými výstupy jsou teplota a napětí článku. Celé navržené regulační schéma zachycuje obrázek 5.27:



Obrázek 5.27: Schéma regulace napětí při změnách zátěže

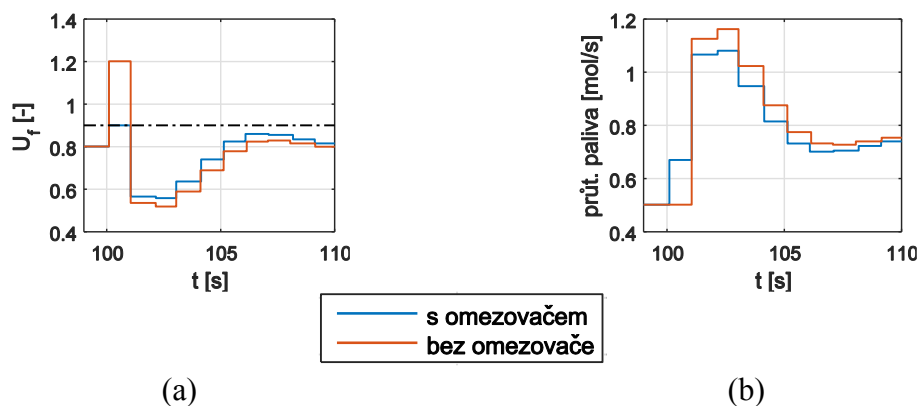
Omezovací blok na výstupu regulátoru

Jak je z obrázku 5.27 patrné, vedle samotného palivového článku a MPC regulátoru je do řídicího systému přidán také blok tzv. omezovače. Jeho účel a princip bude nyní popsán podrobněji. Na rozdíl od řídicího systému pro regulaci výkonu (viz kapitola 5.1) nemůže být odebíraný proud uvažován jako akční veličina, ale má charakter měřené poruchy. Ke změně odebíraného proudu tedy může dojít i během vzorkovací periody MPC regulátoru. Kromě toho je uvažováno výpočetní zpoždění regulátoru přítomné v reálných aplikacích a reakce regulátoru na hodnotu zátěže v okamžiku vzorkování je tedy navíc zpožděna o čas odpovídající uvažovanému výpočetnímu zpoždění regulátoru. Důsledkem těchto skutečností je nemožnost zabránit krátkým výkyvům stupně využití paliva a stupně využití vzduchu mimo omezující podmínky $U_{f,max}$, $U_{a,max}$ bezprostředně po velkých rychlých nárůstech odebíraného proudu (tj. zátěže).

Tento problém je řešen doplněním regulátoru o omezovací blok, který na základě přímé vazby na odebíraný proud omezuje minimální hodnoty akčních veličin průtoku paliva a vzduchu na základě vztahů pro stupeň využití paliva a vzduchu:

$$\dot{n}_{fuel,min} = \frac{2K_r I}{U_{f,max}(x_{H_2} + x_{CO} + 4x_{CH_4})} \quad (5.10), \quad \dot{n}_{air,min} = \frac{K_r I}{U_{a,max}x_{O_2}} \quad (5.11)$$

Funkce omezovacího členu je demonstrována na obrázku 5.28, který zachycuje průběh simulace se zapojeným regulátorem, ve které změna zátěže nastává během vzorkovací periody regulátoru. Během této simulace nastává skoková změna zátěže z 200 na 300 A v čase $t = 100,1$ s. Obrázek znázorňuje průběh využití paliva (5.28a) a průtok paliva (5.28b) pro regulátor s omezovačem (modrá brava) a bez omezovače (červená barva). Je zřejmé splnění omezujících podmínek pro využití paliva při použití omezovače.



Obrázek 5.28: Reakce na změnu zátěže s omezovačem akčních veličin a bez omezovače

Volba vhodných lineárních modelů

V případě regulace na konstantní výstupní napětí článku jsou (za předpokladu konstantních teplot vstupních proudů paliva a vzduchu) ustálené stavy článku dané požadovanou konstantní hodnotou výstupního napětí, optimální provozní hodnotou stupně využití paliva a úrovní proudové zátěže. Hodnota stupně využití vzduchu (tj. i průtoku vzduchu) je na těchto veličinách závislá, stejně jako absolutní teplota článku. Pro získání lineárních modelů je tedy vhodné linearizovat nelineární model při různých úrovních zátěže a vybrat vhodnou sadu lineárních modelů tak, aby dostatečně reprezentovala chování regulovaného systému v celém předpokládaném rozsahu zátěže. Současně je žádoucí aby sada lineárních modelů zahrnovala pouze nezbytné množství jednotlivých lineárních modelů. Jak již bylo ukázáno v kapitole 5.1.4, k tomuto účelu je vhodným nástrojem metoda gap metriky.

V případě konkrétního uvažovaného modelu SOFC článku je na základě výsledků analýzy ustálených stavů uvažovaný rozsah zátěže 100–500 A, optimální stupeň využití paliva v ustáleném stavu 0,80 a hodnota výstupního napětí článku 220 V. Vstupními veličinami jsou průtok paliva a vzduchu, odebíraný proud a teploty vstupních proudů (palivo, vzduch), výstupními veličinami pak teplota a napětí článku, stupeň využití paliva a vzduchu. Získané lineární modely mají 8 stavů (teplota článku a parciální tlaky jednotlivých složek, viz stavové rovnice 4.17 až 4.24).

Při aplikaci metody gap metriky byly spočítány hodnoty gap metrik mezi jednotlivými lineárními modely na různých úrovních zátěže v uvažovaném provozním rozsahu (s krokem 5 A) a následně bylo vybráno 5 modelů tak, že gap metrika mezi sousedními modely je přibližně 0,32 (lineární modely jsou na úrovních zátěže 100, 170, 270, 390 a 500 A). Hranice použití jednotlivých modelů byly nastaveny tak, že modely v krajních mezích intervalu platnosti mají hodnotu gap metriky přibližně 0,16 od daného reprezentativního lineárního modelu. Rozsahy platnosti jednotlivých lineárních modelů tedy jsou <130, 130–215, 215–325, 325–450 a >450 A. Vybrané hodnoty gap metriky jsou uvedeny v tabulce 5.2:

Tabulka 5.2: Gap metriky linearizovaných modelů na různých úrovních zátěže

I [A]	100	130	170	215	270	325	390	450	500
100	0	0,16	0,32	0,45	0,57	0,66	0,74	0,80	0,83
130	0,16	0	0,17	0,32	0,46	0,57	0,67	0,74	0,78
170	0,32	0,17	0	0,16	0,32	0,45	0,57	0,66	0,72
215	0,45	0,32	0,16	0	0,17	0,31	0,46	0,57	0,64
270	0,57	0,46	0,32	0,17	0	0,15	0,32	0,45	0,55
325	0,66	0,57	0,45	0,31	0,15	0	0,17	0,32	0,44
390	0,74	0,67	0,57	0,46	0,32	0,17	0	0,16	0,30
450	0,80	0,74	0,66	0,57	0,45	0,32	0,16	0	0,16
500	0,83	0,78	0,72	0,64	0,55	0,44	0,30	0,16	0

Při srovnání hodnot gap metrik v tabulce 5.2 s hodnotami v tabulce 5.1 (regulace výkonu) jsou zřejmé větší hodnoty. To je způsobené skutečností, že v případě regulace výkonu je možné uvažovat všechny ustálené stavy na stejných hodnotách využití vzduchu. Naproti tomu v případě regulace napětí je stejného napětí při různé zátěži dosaženo různým průtokem vzduchu, což navíc dále vede k výrazně větším teplotním rozdílům. Z těchto důvodů vykazují linearizované modely pro regulaci výkonu menší vzdálenosti v prostoru lineárních systémů a tedy menší hodnoty gap metrik.

Úpravy lineárních modelů

Vybrané lineární modely je pro návrh MPC regulátoru nutné diskretizovat a upravit tak, aby zohledňovaly výpočetní zpoždění, přítomné při použití regulátoru v reálných podmínkách. Úpravy mající za cíl zavedení výpočetního zpoždění jsou založeny na postupu uvedeném v (Maciejowski 2002). Dále je nezbytné upravit lineární modely tak, aby bylo možné omezit rychlost změny teploty článku. To je vhodné provést rozšířením lineárního modelu o výstup ΔT_s představující změnu teploty za jednu vzorkovací periodu. Za tímto účelem je rozšířen stavový vektor o stav $T_s(k-1)$ a změna teploty za jednu periodu je tak rovna $\Delta T_s = (T_s(k) - T_s(k-1))/T_v$, kde T_v [s] je vzorkovací perioda. Na základě toho jsou příslušným způsobem upraveny i matice stavového modelu.

Návrh MPC regulátoru

Takto vybrané a upravené lineární modely jsou již vhodné pro návrh multilineárního MPC regulátoru pro regulaci na konstantní výstupní napětí článku v širokém pracovním rozsahu, který bude schopen nejen dodržovat omezení zabraňující poškození článku, ale i omezit tepelné namáhání během změn zátěže. Regulovanými veličinami jsou výstupní napětí článku (V_s) a stupeň využití paliva (U_f). Dalšími měřenými výstupy jsou absolutní teplota článku (T_s) a rychlost změny teploty článku (ΔT_s), které nejsou regulované, ale musí splňovat stanovená provozní omezení. Proud odebíraný z článku,

stejně jako vstupní teploty paliva a vzduchu, jsou uvažovány jako měřené poruchy. Je použito standardní kvadratické kritérium (5.9).

Provozní omezení, zajišťující bezpečný a spolehlivý provoz článku, jsou maximální přípustné hodnoty stupně využití paliva a vzduchu ($U_{f,max} = 0,8$, $U_{a,max} = 0,9$) a maximální teplota článku ($T_{s,max} = 1500$ K). Pro omezení tepelného namáhání během změn zátěže použito omezení rychlostí změny teploty článku (ΔT_s). Zde je ovšem nutné zmínit rozdíl oproti situaci, kdy je odebírán proud uvažován jako akční veličina. V případě proudu jako měřené poruchy a velkých rychlých změn odebíraného proudu může dojít k situaci, že kvadratický problém regulátoru nemá řešení. Proto z důvodu řešitelnosti kvadratického problému řešeného regulátorem je nutné omezení ΔT_s uvažovat jako „měkké“ ovšem s vysokou penalizací při jeho překročení.

Dalším problémem je způsob omezení stupně využití vzduchu. V případě, že stupeň využití vzduchu není uvažován jako výstupní veličina predikčního modelu, není možné omezení stupně využití vzduchu realizovat jako standardní omezení výstupu. To je možné vyřešit zavedením omezení na lineární kombinaci vstupních a výstupních veličin na základě vztahu pro stupeň využití vzduchu (2.2), místo standardního omezení výstupu:

$$-U_{a,max}x_{O_2}\dot{n}_{vzduch} \leq K_{er}I \quad (5.12)$$

kde $U_{a,max}$ je maximální přípustná hodnota využití vzduchu, x_{O_2} je molární zlomek kyslíku ve vzduchu, \dot{n}_{vzduch} molární průtok vzduchu, K_{er} konstanta charakterizující množství vodíku spotřebovaného elektrochemickou reakcí a I proud odebíraný z článku.

Protože jednotlivé akční a regulované veličiny vykazují značně rozdílná měřítka (např. využití paliva či vzduchu se pohybuje v rozsahu několika desetin a teplota v rozsahu stovek kelvinů), je též vhodné z důvodu snazšího ladění vah jednotlivých regulovaných veličin a lepší numerické podmíněnosti kvadratického problému upravit měřítka jednotlivých akčních a regulovaných veličin. Při realizaci regulátoru SOFC uvažovaného palivového článku, byla nastavena měřítka jednotlivých akčních a regulovaných veličin na základě přibližného předpokládaného provozního rozsahu dané veličiny. Délka výpočetního zpoždění byla $\tau = 50$ ms, omezení rychlostí změny teploty článku ΔT_s bylo nastaveno na $\pm 0,2$ K/s.

Další parametry regulátoru byly optimalizovány a nastaveny na základě simulací následujícím způsobem:

Vzorkovací perioda: $T_v = 1$ s, horizont predikce: $N = 50$, horizont řízení: $N_u = 10$.

Váhy: Z důvodu příliš agresivních akčních zásahů pozorovaných během simulací byly nastaveny váhy na změnu akčních veličin. Váha na změnu průtoku paliva $w_{\Delta\dot{n}_{palivo}} = 5$ a váha na změnu průtoku vzduchu $w_{\Delta\dot{n}_{vzduch}} = 5$. Jelikož hlavním úkolem regulátoru je udržet konstantní výstupní napětí při změnách zátěže, váha na výstupní napětí byla nastavena na $w_{V_s} = 10$. Stupeň využití paliva je žádoucí udržet kolem optimální hodnoty v ustáleném stavu, příslušná váha byla nastavena na $w_{U_f} = 1$. Ostatní výstupy musejí pouze splnit omezující podmínky, a proto jejich váhy byly nastaveny na nulu.

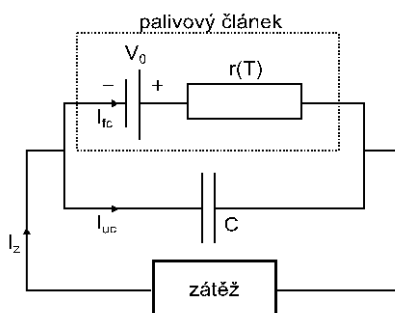
5.2.4 Palivový článek s kondenzátorem

Napětí SOFC palivového článku je popsáno výstupní rovnicí (viz kapitola 4.1.3):

$$V_s = V_0 - \eta_{ohm} - \eta_{act} - \eta_{con} = V_0(T_s, p_{H_2}, p_{H_2O}, p_{O_2}) - r(T_s)I - (a + b \log I) + \frac{RT_s}{2F} \ln \left(1 - \frac{I}{I_L} \right) \quad (5.13)$$

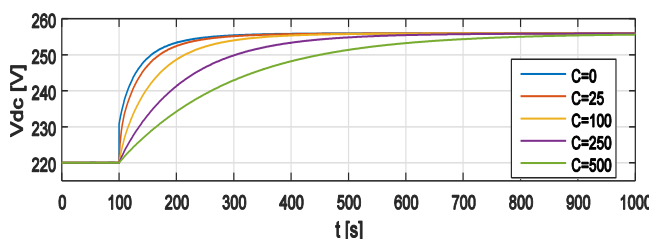
Z této výstupní rovnice je evidentní, že skoková změna odebíraného proudu vede ke skokové změně napětí v důsledku přímé závislosti ohmických ztrát na proudové hustotě.

To znamená velké výkyvy napětí v případě velmi rychlých změn zátěže, což je problémem při požadavku na udržení konstantního napětí. Tuto nevýhodu je možné řešit různými technickými prostředky. Především se jedná o rozšíření systému o další prvky, jako jsou měniče či zařízení na ukládání energie (akumulátory, superkondenzátory). Možných konfigurací je řada, ovšem potenciálně nejlevnějším i nejefektivnějším řešením je přímé připojení kondenzátoru k palivovému článku (Zhao and Burke 2010). Kondenzátor o dostatečné kapacitě je v tomto případě zapojen paralelně s palivovým článkem přímo k zátěži a odpadá tak nutnost použití měniče nebo drahého akumulátoru (obrázek 5.29). V této disertační práci jsou proto též zkoumány možnosti dosažení stanovených cílů řízení při použití tohoto technického řešení. Model palivového článku je rozšířen o model superkondenzátoru a je navržen MPC regulátor pro soustavu palivového článku s kondenzátorem.

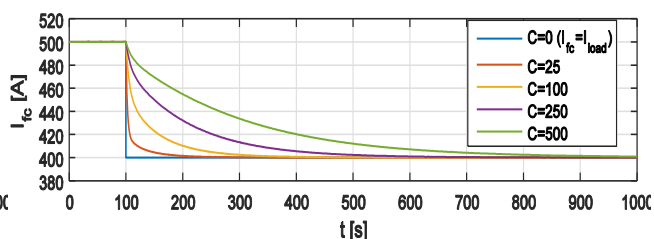


Obrázek 5.29: Zapojení palivového článku se superkondenzátorem

Při paralelním zapojení kondenzátor sdílí zátěž při prudkých změnách celkového odebraného proudu a pomáhá kompenzovat negativní efekt rychlých změn zátěže u samotného článku. Změna napětí při skokové změně zátěže tak nemá skokový charakter, což umožňuje regulátoru lépe omezit maximální regulační odchylku napětí během rychlých změn zátěže. Na druhou stranu kondenzátor také prodlužuje reakční dobu soustavy SOFC/kondenzátor na změny průtoku paliva a vzduchu. Z toho plyne, že čím je větší kapacita kondenzátoru, tím je pomalejší dynamika integrovaného systému. Další vlastností soustavy je zachování hodnoty proudu procházejícího článkem v ustáleném stavu, neboli proud procházející superkondenzátorem v ustáleném stavu je nulový. Odezva soustavy palivového článku s kondenzátorem o různé kapacitě (0–500 F) na skokovou změnu zátěže z 500 A na 400 A v čase $t = 100$ s je znázorněna na obrázcích 5.30 (napětí) a 5.31 (proud procházející článkem). Je evidentní, že rychlost odezvy klesá se vzrůstající kapacitou kondenzátoru.



Obrázek 5.30: Napětí jako odezva na skokovou změnu zátěže pro různé hodnoty kapacity kondenzátoru [F]



Obrázek 5.31: Proud odebraný z článku jako odezva na skokovou změnu zátěže pro různé hodnoty kapacity kondenzátoru [F]

Pro potřeby simulací a návrhu regulátoru bylo zapotřebí použít vhodný matematický popis chování integrovaného systému článek/kondenzátor. Pro tyto účely byl použit jednoduchý popis chování superkondenzátoru založený na ideálním kondenzátoru. Na základě definice kapacity lze

vztah pro proud procházející kondenzátorem zapojeným paralelně ke stejnosměrnému zdroji vyjádřit jako

$$I_{uc} = -C \frac{dV_s}{dt} \quad (5.14)$$

kde I_{uc} [A] je proud procházející kondenzátorem, C [F] je kapacita kondenzátoru a V_s [V] je napětí zdroje, v tomto případě SOFC palivového článku. Z tohoto vztahu je zřejmé, že v ustáleném stavu, tj. při konstantním napětí, je proud procházející superkondenzátorem nulový a hodnoty ustáleného stavu pro soustavu článku s kondenzátorem jsou tedy stejné jako pro samotný článek.

Dále z Kirchhoffova zákona plyne, že proud zátěže je algebraickým součtem proudů procházejících článkem a kondenzátorem:

$$I_{fc} = I_z - I_{uc} \quad (5.15)$$

kde I_{fc} [A] je proud procházející článkem a I_z [A] celková proudová zátěž.

Kombinací rovnic 5.13, 5.14 a 5.15 je možné získat diferenciální rovnici pro napětí článku, ovšem v implicitní formě, nevhodné jak pro simulace, tak pro návrh regulátoru. Tento problém je v literatuře běžně řešen zanedbáním aktivačních a koncentračních ztrát v rovnici pro výpočet napětí (Murshed *et al.* 2007, Murshed *et al.* 2010, Tiejun and Gang 2009), které jsou velmi malé v porovnání s ohmickými ztrátami. Pak lze ze zjednodušené rovnice pro napětí $V_s = V_0 - r(T_s)I$ snadno vyjádřit proud procházející článkem a výsledný vztah pro napětí má podobu obyčejné diferenciální rovnice prvního řádu namísto statické nelineární výstupní rovnice v případě samotného palivového článku bez kondenzátoru.

Alternativním postupem k úplnému zanedbání aktivačních a koncentračních ztrát je jejich lineární aproximace, která umožňuje následné explicitní vyjádření derivace napětí. Toto řešení vedoucí ke zpřesnění výsledků je použito v této disertační práci. Aktivační a koncentrační ztráty jsou vyjádřeny ve tvaru rovnic 5.16, 5.17:

$$\eta_{act} = a + b \log I = k_1 I + k_2 \quad (5.16)$$

$$\eta_{con} = \frac{RT_s}{2F} \ln \left(1 - \frac{I}{I_L} \right) = T_s (k_3 I + k_4) \quad (5.17)$$

Při návrhu regulátoru pro soustavu palivového článku s superkondenzátorem je opět vhodné použít stejné postupy a metody, jako v případě samotného palivového článku. To znamená linearizaci modelu soustavy palivového článku s kondenzátorem při různých úrovních zátěže, volbu sady vhodných lineárních modelů, jejich úpravu (diskretizace, zavedení výpočetního zpoždění a výstupu ΔT_s) a použití pro predikční model regulátoru.

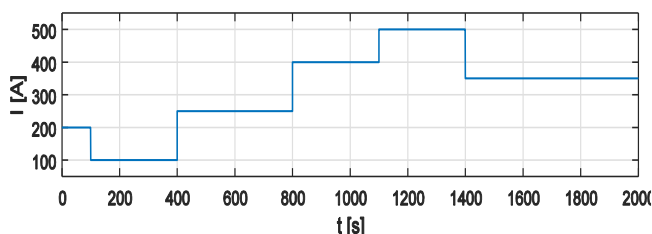
Vzhledem k odlišnému chování soustavy při různé kapacitě superkondenzátoru je linearizaci třeba provést pro uvažovanou hodnotu kapacity kondenzátoru, případně všechny zvažované kapacity. Oproti situaci bez kondenzátoru je model rozšířen o jeden stav, neboť napětí celé soustavy je místo statické nelineární výstupní rovnice dáno diferenciální rovnicí prvního řádu. Proud procházející článkem je uvažován jako měřený výstup (celková proudová zátěž zůstává měřenou poruchou).

5.2.5 Výsledky simulací

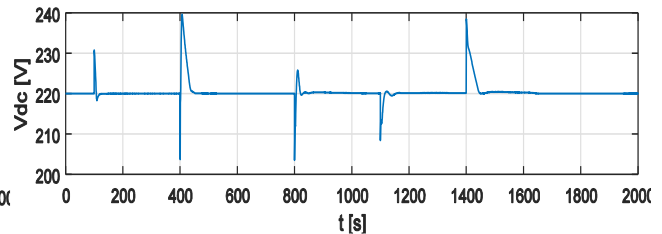
Chování prediktivního regulátoru pro regulaci napětí navrženého v předchozích kapitolách bylo testováno simulačně spolu s modelem SOFC článku popsaným v kapitole 4.2., případně s využitím modelu superkondenzátoru (kapitola 5.2.4). Stejně jako při regulaci výkonu bylo testováno chování v širokém pracovním rozsahu při skokových změnách odebíraného proudu.

Výsledky simulace při změnách zátěže

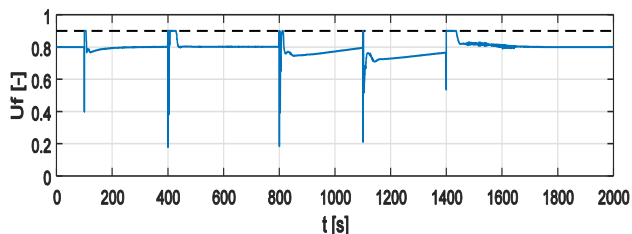
Výsledky simulací, které jsou zobrazeny na obrázcích 5.33 až 5.38, zachycují reakce na skokové změny zátěže v celém uvažovaném pracovním rozsahu 100–500 A. Simulace začíná při zatížení 200 A a postupně jsou realizovány skokové změny zátěže o -100 A ($t = 100$ s), $+150$ A ($t = 400$ s), $+150$ A ($t = 800$ s), $+100$ A ($t = 1100$ s) a -150 A ($t = 1400$ s) (viz obrázek 5.32). Průběh výstupního napětí, které je regulováno na konstantní žádanou hodnotu 220 V, je na obrázku 5.33. Maximální regulační odchylka je cca 19 V, maximální doba opětovného dosažení žádané hodnoty cca 50 s. Následující obrázek 5.34 zachycuje využití paliva. Je z něj patrný nejenom postupný úspěšný návrat stupně využití paliva k ideální hodnotě 0,8 po potlačení odchylek napětí, ale současně je patrné, že delší doba opětovného dosažení žádané hodnoty napětí souvisí se stavy, kdy je dosaženo maximální přípustné hodnoty využití paliva, a tedy hodnota průtoku paliva je na své minimální přípustné hodnotě. Omezení maximální přípustné hodnoty využití vzduchu zachycuje obrázek 5.35. Důležitý parametr rychlost změny teploty článku (ΔT_s) je na obrázku 5.36. Je zde též znázorněno „měkké“ omezení ΔT_s v rozsahu $\pm 0,2$ K/s. Je patrné, že regulátor nedokáže udržet hodnoty ΔT_s bezprostředně po velkých skokových změnách zátěže ve stanovených mezích. Následující obrázky zachycují průběh teploty článku (obrázek 5.37) a hodnoty akčních veličin průtok paliva a průtok vzduchu (5.38).



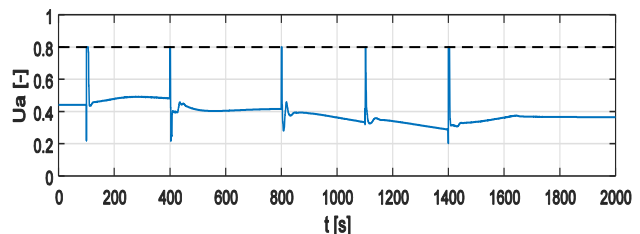
Obrázek 5.32: Proudové zatížení článku



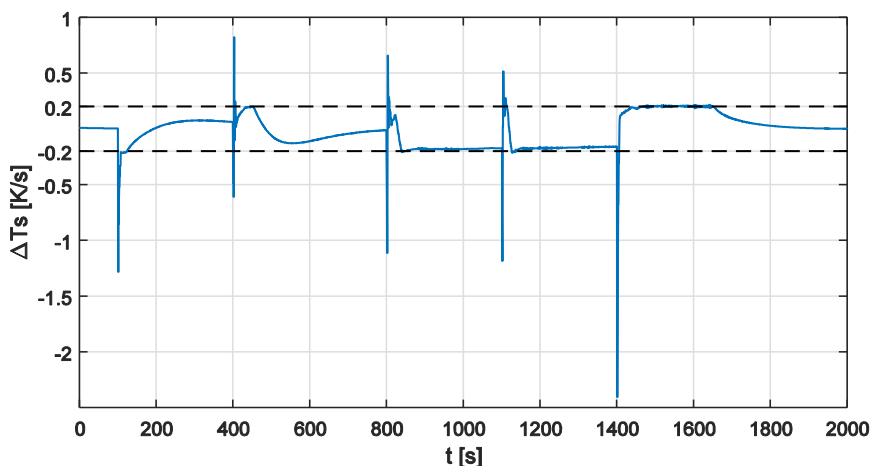
Obrázek 5.33: Průběh výstupního napětí při změnách zátěže



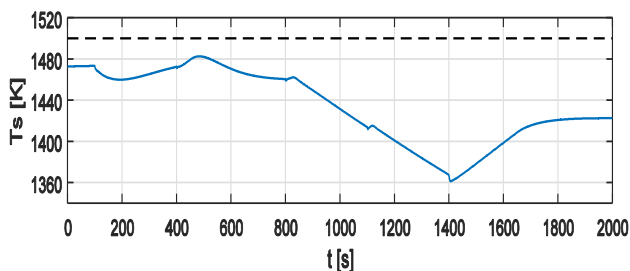
Obrázek 5.34: Průběh využití paliva při změnách zátěže



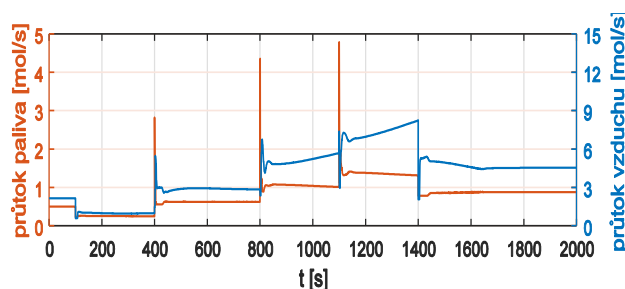
Obrázek 5.35: Průběh využití vzduchu při změnách zátěže



Obrázek 5.36: Průběh ΔT_s při změnách zátěže



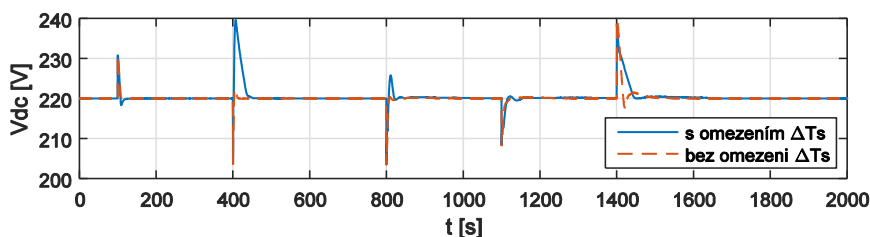
Obrázek 5.37: Průběh teploty článku při změnách zátěže



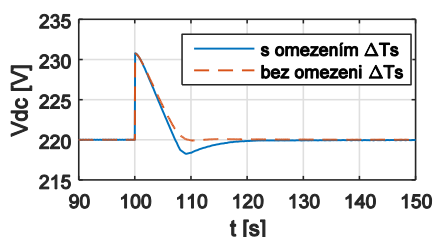
Obrázek 5.38: Průtok paliva a vzduchu při změnách zátěže

Srovnání výsledků simulace při omezení ΔT_s a bez omezení ΔT_s

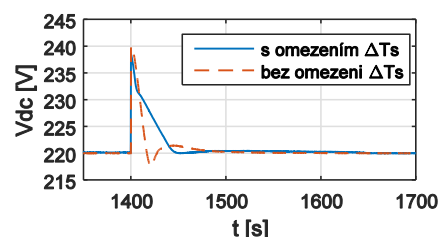
Pro zhodnocení přínosu omezení rychlosti změny teploty článku byly provedeny též simulace bez omezení rychlosti změny teploty pro stejný průběh zátěže, jako v předchozím případě (viz obrázek 5.32). Na obrázku 5.39 je srovnán průběh napětí při regulačním pochodu se zapnutým a vypnutým omezením ΔT_s . Obecně je patrné, že omezení rychlosti změny teploty způsobuje delší čas nutný k opětovnému dosažení žádané hodnoty napětí v reakci na skokové změny zátěže. Naproti tomu maximální odchylka napětí je v obou případech podobná, jak je patrné též z detailnějšího znázornění napětí ve vybraných úsecích simulace (obr. 5.40). Přesto, že skokové změny zátěže neumožňují zcela potlačit rychlé teplotní změny, zásadní snížení namáhání článku rychlými změnami teplot vynikne při srovnání s průběhem bez omezení těchto změn (obr. 5.41).



Obrázek 5.39: Srovnání výstupního napětí článku při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s při změnách zátěže

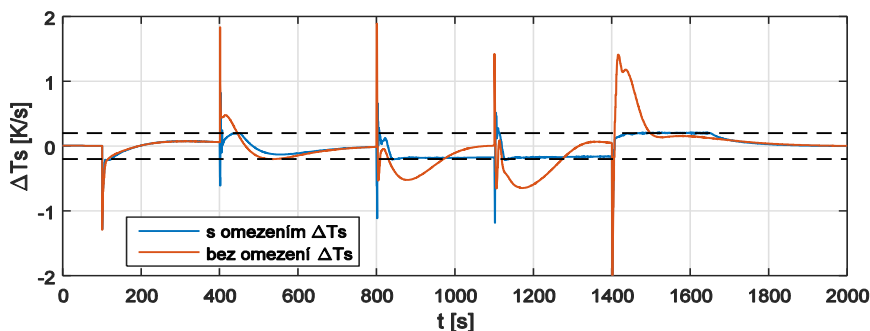


(a)



(b)

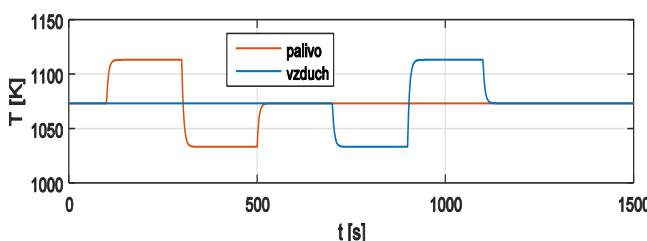
Obrázek 5.40: Detailní srovnání výstupního napětí článku při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s při změnách zátěže



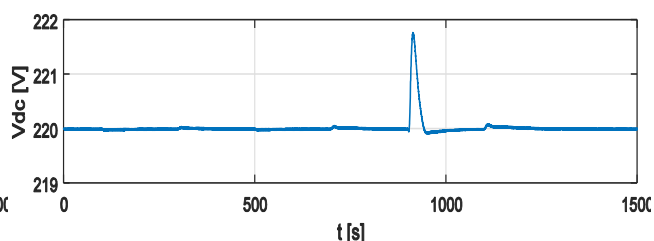
Obrázek 5.41: Srovnání hodnot ΔT_s při použití regulátoru s omezením ΔT_s ($\pm 0,2$ K/s) a bez omezení ΔT_s při změnách zátěže

Reakce na měřené poruchy teplot vstupních proudů

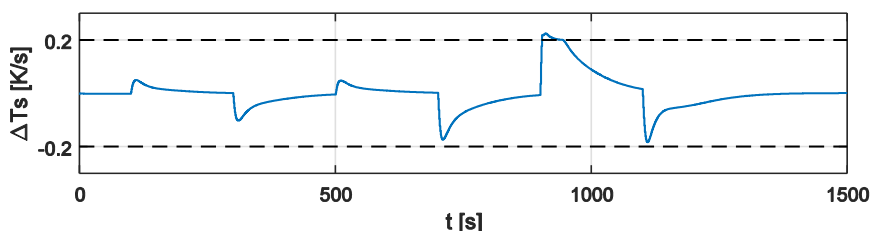
Vedle změn žádané hodnoty výkonu bylo také testováno chování regulátoru při změnách teploty vstupních proudů (tj. teplota paliva a vzduchu), které jsou uvažovány jako měřené poruchy. Skokové změny teplot vstupních proudů mají spíše teoretický charakter a v praxi se projeví dynamika těchto poruch např. vlivem dynamiky tepelných výměníků. Z toho důvodu byly provedeny simulace, kdy změny teploty nejsou skokové, ale mají charakter přenosu prvního řádu s časovou konstantou 5 s (obrázek 5.42). Během simulace se teplota paliva změní o $+40\text{ °C}$ ($t = 100\text{ s}$), -80 °C ($t = 300\text{ s}$), $+40\text{ °C}$ ($t = 500\text{ s}$) a následně se změní teplota vzduchu o -40 °C ($t = 800\text{ s}$), $+80\text{ °C}$ ($t = 1300\text{ s}$) a zpět na původní hodnotu skokem o -40 °C ($t = 1100\text{ s}$). Test probíhá při zatížení 300 A a výchozí vstupní teploty paliva i vzduchu jsou 800 °C . Na dalších obrázcích je pak zachyceno výstupní napětí (obrázek 5.43) a ΔT_s (obrázek 5.44) při těchto poruchách. Maximální odchylka napětí je v tomto případě 1,8 V a je splněno omezení ΔT_s až na drobné překročení přibližně o 0,01 K/s, způsobené lineárním predikčním modelem. Je vidět, že vliv změny teploty paliva je menší než vliv změny teploty vzduchu, což je důsledkem nižších hodnot průtoku paliva ve srovnání se vzduchem a z toho plynoucího většího dopadu průtoku vzduchu na tepelnou bilanci článku.



Obrázek 5.42: Reálný průběh teplot vstupních proudů (1. řád s časovou konstantou 5 s namísto skokových změn)



Obrázek 5.43: Průběh výstupního napětí článku při reálných změnách teplot vstupních proudů

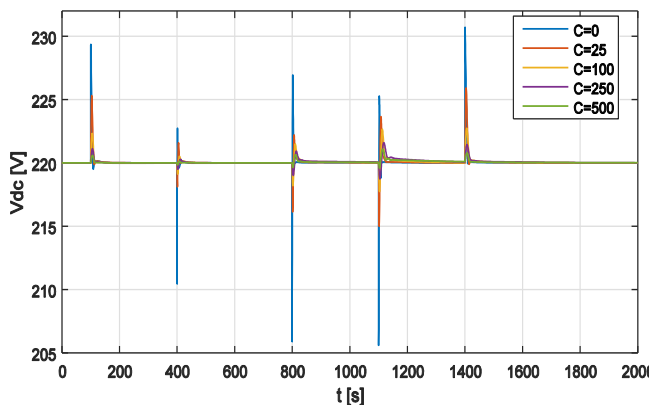


Obrázek 5.44: Průběh ΔT_s při reálných změnách teplot vstupních proudů

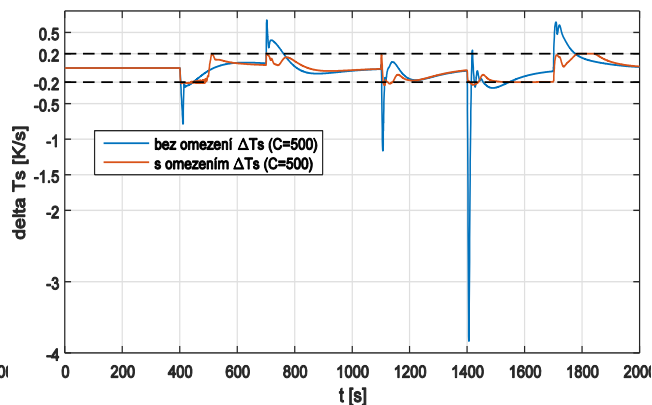
Článek s kondenzátorem

Následují výsledky simulací palivového článku s kondenzátorem. Celková proudová zátěž soustavy palivový článek/kondenzátor byla postupně měněna z počáteční hodnoty 200 A na 100 A ($t = 100\text{ s}$), 200 A ($t = 400\text{ s}$), 350 A ($t = 800\text{ s}$), 500 A ($t = 1100\text{ s}$) a 400 A ($t = 1400\text{ s}$), tj. stejným způsobem jako při simulacích bez kondenzátoru (viz obrázek 5.32). Chování soustavy z hlediska regulace napětí při různých hodnotách kapacity superkondenzátoru zachycuje obrázek 5.45, ze kterého je zřejmé zásadní omezení regulační odchylky se vzrůstající kapacitou superkondenzátoru.

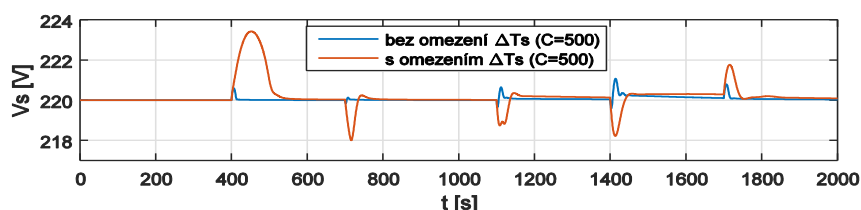
Následně byly ověřovány možnosti omezení rychlých změn teploty simulací s aktivním omezením ΔT_s ($\pm 0,2\text{ K/s}$). V tomto případě byl použit kondenzátor o kapacitě 500 F výsledky na obrázku 5.46 ukazují, že překmity ΔT_s nad stanovenou mez bezprostředně po rychlých změnách zátěže, které byly pozorovány při regulaci samotného článku, byly při použití kondenzátoru eliminovány. Současně ovšem obrázek 5.47 zachycující napětí soustavy článek/kondenzátor dokumentuje, že omezení ΔT_s bylo dosaženo za cenu výrazného zvýšení maximální regulační odchylky napětí i prodloužení doby potřebné k opětovnému dosažení žádané hodnoty.



Obrázek 5.45: Výstupní napětí soustavy článku/kondenzátor při změnách zátěže při různé kapacitě kondenzátoru C [F]



Obrázek 5.46: Rychlost změny teploty (ΔT_s) článku při zapojení článku s kondenzátorem pro regulátor s omezením ΔT_s a bez omezení ΔT_s ($C = 500$ F)



Obrázek 5.47: Napětí soustavy článku/kondenzátor při použití regulátoru s omezením ΔT_s a bez omezení ΔT_s ($C = 500$ F)

5.2.6 Zhodnocení výsledků

Pro regulaci výstupního napětí SOFC palivových článků na konstantní žádanou hodnotu při změnách zátěže v širokém pracovním rozsahu byl navržen řídicí systém založený na lineárním přepínaném MPC regulátoru. Cílem regulátoru je vedle udržení konstantního výstupního napětí při změnách proudové zátěže článku také splnění provozních omezení, která zabraňují poškození článku a umožňují udržet vysokou životnost článku i při častých změnách zátěže. Těmito omezeními jsou maximální přípustné hodnoty teploty článku, stupně využití paliva a stupně využití vzduchu. Vedle toho byly omezeny rychlé teplotní změny, ke kterým dochází během změn zátěže a které mají za důsledek zvýšené tepelné namáhání článku během změn zátěže vedoucí ke snížení jeho životnosti. K dosažení cílů regulace jsou použity jako akční veličiny MPC regulátoru průtoky paliva a vzduchu. Teploty paliva a vzduchu jsou stejně jako proud odebíraný z článku uvažovány jako měřené poruchy, měřenými výstupy jsou absolutní teplota článku, výstupní napětí článku a stupeň využití paliva.

Pro výběr sady reprezentativních lineárních modelů vhodných pro použití multilineárním prediktivním regulátorem bylo využito linearizace na základě různé úrovně proudové zátěže článku a metody gap metriky. Bylo ukázáno, že modely pro regulaci napětí linearizované na různých úrovních zátěže vykazují větší vzdálenosti v prostoru lineárních systémů (tj. větší hodnoty gap metrik) než v případě regulace výkonu. To je způsobené skutečností, že v případě regulace výkonu je možné uvažovat všechny ustálené stavy na stejných hodnotách využití vzduchu. Důsledkem je nutnost použití většího množství lineárních modelů pro provoz při regulaci na konstantní výstupní napětí než v režimu regulace výkonu při srovnatelném rozsahu výkonů. Dále bylo ukázáno, že při rychlých změnách odebíraného proudu může dojít k situaci, že MPC regulátor není schopen zabránit krátkodobému překročení přípustných maximálních hodnot stupně využití paliva a vzduchu. To může nastat buď v důsledku velkého rychlého zvýšení zátěže během vzorkovací periody či v důsledku výpočetního zpoždění regulátoru. Tento problém byl úspěšně vyřešen rozšířením řídicího systému o omezovací blok, který na základě přímé vazby na odebíraný proud omezuje hodnoty akčních

veličin tak, aby bylo zabráněno překročení maximálních přípustných hodnot. Dalším řešeným problémem, který je důsledkem rychlých a velkých změn odebíraného proudu v kombinaci s omezením rychlosti změny teploty článku, je možná neřešitelnost kvadratického problému řešeného regulátorem. K tomu může v některých případech dojít bezprostředně po skokové změně zátěže. Proto je nutné uvažovat omezení rychlosti změny teploty článku jako měkké omezení s vhodně nastavenou penalizací pro překročení tohoto omezení.

Pro ověření navržených postupů byl navržen multilineární MPC regulátor pro regulaci napětí SOFC článku popsaného dynamickým modelem, uvedeným v kapitole 4. Jeho chování bylo simulačně testováno při skokových změnách zátěže. Protože při skokové změně proudu odebíraného z článku dochází ke skokové změně napětí v důsledku ohmických ztrát přímo závislých na proudové hustotě, byly pozorovány překmity napětí o maximální velikosti 20 V. Důsledkem těchto skokových změn zátěže bylo i krátkodobé překročení omezení rychlosti změny teploty v délce trvání přibližně 5–6 s. Při srovnání simulací s omezením rychlosti změny teploty článku a bez tohoto omezení bylo ukázáno, že omezení rychlosti změny teploty způsobuje prodloužení doby návratu napětí k žádané hodnotě, avšak nemá vliv na velikost maximální odchylky napětí od žádané hodnoty bezprostředně po skokových změnách zátěže. Současně, přes již zmíněná krátkodobá překročení stanoveného omezení rychlosti změny teploty článku, bylo v přímém srovnání snížení tepelného namáhání článku v důsledku rychlých změn teploty zásadní.

Vedle změn zátěže bylo testováno též chování při změnách teplot vstupních proudů. Teploty paliva a vzduchu byly měněny způsobem blízcím se předpokládanému reálnému chování systému s tepelnými výměníky. Bylo ukázáno, že změna teploty paliva má ve srovnání se změnou teploty vzduchu výrazně slabší vliv jak na průběh napětí, tak i teplotu článku, což je dáno nižším hmotnostním průtokem paliva ve srovnání s průtokem vzduchu.

V případě požadavku menší maximální regulační odchylky napětí, než jaké lze dosáhnout při přímém připojení palivového článku ke stejnosměrné zátěži, je nutné volit některé technické řešení, které umožní splnění tohoto požadavku. Pro zhodnocení možností takovýchto řešení z hlediska regulace proto byla tato práce rozšířena o jednoduchý systém spočívající v paralelním zapojení superkondenzátoru a článku a přímému připojení této soustavy k zátěži. Chování palivového článku se superkondenzátorem a navrženým MPC regulátorem bylo opět ověřeno simulačně v širokém rozsahu zátěže. Byla potvrzena možnost zásadního snížení maximální regulační odchylky napětí při dostatečné kapacitě superkondenzátoru ve srovnání s použitím samotného článku (odchylka méně než 1 V místo 20 V). V případě omezení rychlých změn teploty bylo také dosaženo eliminace krátkodobých překmitů mimo stanovenou mez bezprostředně po skokových změnách zátěže, ovšem za výrazného zvětšení maximální regulační odchylky napětí na přibližně 4 V.

Celkově lze tedy říci, že přestože v režimu regulace na konstantní výstupní napětí vykazuje palivový článek více nelineární chování než v režimu regulace výkonu, je i v tomto případě multilineární MPC regulátor vhodný pro regulaci takového systému při správné volbě jednotlivých lineárních modelů. Bylo také ukázáno, že takovýto řídicí systém je schopen výrazně omezit tepelné namáhání článku během změn zátěže. Na druhou stranu se potvrdilo, že vliv rychlých změn zátěže na výstupní napětí článku i jeho tepelnou bilanci není možné zcela eliminovat. Záleží tudíž na konkrétní aplikaci, zda je možné použít přímé připojení palivového článku k zátěži nebo je nutné použít dalších technických prvků ke zlepšení celkových vlastností regulované soustavy. Z těchto možností bylo simulačně testováno řešení v podobě paralelního zapojení superkondenzátoru o dostatečné kapacitě k palivovému článku. U tohoto řešení byla potvrzena možnost zásadního snížení maximální regulační odchylky napětí. V případě požadavku na omezení maximální rychlosti změny teploty ale splnění tohoto omezení vede ke zvětšení maximální regulační odchylky napětí i částečnému prodloužení doby trvání regulační odchylky. Přesto maximální regulační odchylka napětí byla i tak zásadně nižší než při řešení bez kondenzátoru.

6 ZÁVĚR

6.1 Shrnutí dosažených výsledků

Cílem této práce bylo vytvořit vhodný postup pro návrh řízení palivových článků s pevným oxidickým elektrolytem. Z pohledu řízení představují tyto články nelineární soustavu s několika akčními a regulovanými veličinami s významnými vzájemnými interakcemi. Zároveň je při jejich provozu nutné dodržet řadu omezujících podmínek, při jejichž porušení dochází k rychlé degradaci a výraznému zkrácení životnosti článku. Palivové články SOFC mohou být poškozeny při dosažení příliš vysokého stupně využití paliva či stupně využití vzduchu. Dále dochází zejména při výraznějších změnách zatížení k rychlým změnám teploty článku a tyto rychlé změny mají za následek zvýšené tepelné namáhání článku a snížení jeho životnosti. Omezení těchto negativních důsledků změn zátěže je možné omezením rychlosti změny teploty článku.

Potřeba splnit řadu omezujících podmínek proto přirozeně vede k myšlence použít prediktivní řízení. Již v rámci předběžných úvah a přípravy koncepce práce byl jako potenciálně nejvhodnější zvolen přístup založený na prediktivním řízení používajícím sadu lineárních přepínaných modelů neboli na multilineárním prediktivním řízení. Jak bylo podrobněji probráno ve druhé kapitole, byly metody založené na tomto přístupu v kontextu řízení palivových článků používány dosud jen zcela okrajově.

V této práci však byla provedena podrobnější analýza nelinearity palivových článků s pevným oxidickým elektrolytem s využitím aparátu gap metriky. V ní bylo ukázáno, že nelinearita článků je příliš výrazná na to, aby bylo vhodné k řízení článku, jehož výkonové zatížení může být v širokých mezích proměnné, používat prediktivní řízení s jedním lineárním modelem. Zároveň však bylo také ukázáno, že pro účely řízení je postačující přepínat jednotlivé lineární modely pouze v závislosti na proudovém odběru z článku. Tato skutečnost umožňuje formulovat jednoduchá přepínací pravidla a vystačit s nevelkým počtem dílčích modelů. Multilineární přístup si tak podržuje výhodu relativní jednoduchosti, výpočetní efektivity a konvexnosti dílčích lineárních problémů bez toho, že by tyto výhody byly znehodnoceny složitými pravidly pro přepínání modelů v závislosti na několika veličinách. Z tohoto důvodu byla multilineárnímu řízení v této práci byla dána přednost jak před čistě lineárním, tak nelineárním prediktivním řízením.

Návrh řízení provedený v práci bere v úvahu skutečnost, že cíle řízení se mohou významně lišit podle použití článku. Návrh řízení a odpovídající struktura řídicího systému byly proto vypracovány pro dva odlišné provozní režimy. V prvním režimu byl uvažován článek, na jehož výstupu je připojen elektronický měnič napětí. V tomto případě je hlavním cílem řízení dodat potřebný činný výkon na střídavém výstupu měniče, při udržení střídavého výstupního napětí na konstantní hodnotě. Stejnoseměrné napětí článku může v širokých mezích kolísat, protože toto kolísání lze kompenzovat změnou modulačního indexu měniče. Zároveň se ovšem součástí řízené soustavy stává i měnič, jehož dynamika je oproti dynamice samotného článku o několik řádů rychlejší a vyžaduje proto úměrně kratší periody vzorkování (max. jednotky milisekund). Pokud by s těmito periodami měl pracovat prediktivní regulátor, zvýšilo by to zcela zbytečně požadavky na výkon použitých výpočetních prostředků a komplikovalo implementaci regulátoru. Z tohoto důvodu bylo prediktivní řízení doplněno o dva pomocné PI regulátory, které zabezpečují řízení měniče.

V druhém provozním režimu pracujeme s uspořádáním, které by bylo použito zejména u mobilních aplikací palivových článků. Článek je provozován bez měniče a cílem řízení je udržet konstantní stejnosměrné napětí na výstupu článku i při změnách zátěže, tj. odběru proudu z článku.

V tomto režimu byly uvažovány dvě varianty: samotný článek a kombinace článku se superkondenzátorem, který slouží k pokrytí proudových špiček a zlepšení regulace napětí.

Pro ověření chování navrženého řídicího systému byl implementován dynamický model planárního SOFC článku publikovaný v literatuře, který byl dále rozšířen o vnitřní reformování paliva a uvažovaným palivem se tak stala předreformovaná směs metanu a vodní páry namísto čistého vodíku, který má v reálných aplikacích omezené využití.

Navržené varianty multilineárního prediktivního regulátoru byly ověřeny simulací v prostředí Matlab/Simulink. Výsledky v případě regulace výkonu dodávaného do elektrické sítě ukázaly velmi dobrou schopnost řídicího systému reagovat na skokové změny požadovaného výkonu v širokém pracovním rozsahu 25–100% jmenovitého výkonu. Bylo ukázáno, že omezení rychlosti změny teploty článku způsobuje prodloužení doby, potřebné k dosažení požadovaného výkonu při velmi rychlých změnách požadovaného výkonu. Nicméně je možný dobrý kompromis mezi výkonem regulátoru a snížením tepelného namáhání článku (např. prodloužení doby opětovného dosažení žádané hodnoty výkonu z 2 s na 5,5 s při omezení $\Delta T_s = \pm 0,2$ K/s a změně výkonu o 25% jmenovité hodnoty). Také schopnost regulátoru vyrovnat se se změnami teploty paliva či vzduchu byla velmi dobrá, např. při výkonu 40 kW (40% jmenovité hodnoty) byla pozorována zratelná odchylka výkonu 0,5 kW až při velké změně teploty vzduchu o 80 °C. Lze tudíž říci, že lineární přepínaný MPC regulátor lze použít pro regulaci výkonu SOFC palivových článků v širokém pracovním rozsahu a pro snížení tepelného namáhání článku omezením rychlosti změny teploty.

Komplikovanější situace se ukázala při regulaci napětí článku přímo připojeného k zátěži. Zde skoková změna zátěže (tj. odebíraného proudu) má několik důsledků. Zpožděná reakce regulátoru v důsledku výpočetního zpoždění může obecně vést k překmitům využití paliva a vzduchu mimo přípustná maxima. Přestože toto překročení je krátkodobé a nebyl pozorován významný pokles celkového parciálního tlaku vodíku či kyslíku, přesto může toto krátkodobé překročení způsobit negativní efekt v podobě lokálního poklesu parciálního tlaku. Tento problém byl úspěšně vyřešen jednoduchým omezovacím blokem v řídicím systému. Větším problémem je odchýlení stejnosměrného napětí od žádané hodnoty při změně proudu způsobené ohmickými ztrátami napětí v článku. Tato odchylka vzniká v důsledku toho, že napětí je s odebíraným proudem spjato mj. i přímou statickou vazbou, zatímco jeho reakce na akční veličiny je popsána dynamickým systémem. Tuto odchylku proto nelze zcela eliminovat jakýmkoliv návrhem řízení, ale pouze změnou konstrukčního uspořádání a doplněním měniče o další prvky.

Z těchto prvků byly v této práci ověřeny možnosti superkondenzátoru paralelně připojeného k článku. Toto řešení umožnilo zásadní snížení maximální regulační odchylky napětí, ovšem současné omezení rychlosti změny teploty vedlo k jejímu částečnému nárůstu v důsledku zpomalené dynamiky celé soustavy. Vedle dalších možností (akumulátory, měniče) ovšem řešení pouze s kondenzátorem vykazuje nejvyšší efektivitu a nejnižší cenu. Maximální regulační odchylka i doba opětovného dosažení žádané hodnoty napětí (bez omezení ΔT_s) byly srovnatelné s průběhy dostupnými v literatuře pro nelineární MPC.

V rámci této práce tak byl vypracován vhodný postup návrhu řízení palivových článků s pevným oxidickým dielektrikem, který je schopen dosáhnout velmi dobrých výsledků zejména v tom prakticky nejvýznamnějším případě, kdy je článek použit ve spojení s měničem jako zdroj střídavého napětí. V tomto případě může výborně splnit požadavky a omezení, která jsou na provoz palivových článků kladena. Navíc vzhledem k řadě problémů souvisejících s nelineární optimalizací má podstatně lepší možnosti praktického využití ve srovnání s nelineárním prediktivním řízením.

6.2 Nástin možných směrů dalšího výzkumu

Cílem této disertační práce bylo vytvořit metody a postupy vhodné pro návrh multilineárního prediktivního regulátoru pro regulaci SOFC palivových článků jakožto zdroje elektrické energie ve dvou uvažovaných typech aplikací: SOFC palivový článek jako zdroj elektrické energie připojený k elektrické síti a SOFC článek připojený ke stejnosměrné zátěži s nutností regulace na konstantní stejnosměrné napětí článku. V obou těchto případech byly uvažovány technologické části a procesy, podstatné pro daný účel: samotný soubor SOFC palivových článků a reformování paliva. Jedním možným směrem dalšího pokračujícího výzkumu tedy je využití dosažených výsledků a znalostí pro další typy aplikací SOFC palivových článků a jejich specifika.

Jednou takovouto perspektivní aplikací je využití SOFC palivových článků pro kogenerační jednotky (tj. kombinovaná výroba elektřiny a tepla) s různým výkonem řádově od jednotek kilowatt. Další práce by tedy v tomto případě měla být zaměřena na využití multilineárního prediktivního regulátoru k řízení celé kogenerační jednotky, tj. palivového článku doplněného o systémy využití tepla, jako jsou tepelné výměníky či spalovací komora, případně plynová turbína, umožňující další zvýšení celkové efektivity. Dalším zajímavým typem aplikace je SOFC článek jakožto zdroj elektrické energie v ostrovním režimu. V tomto případě je žádoucí zahrnout do řídicího systému vhodnou technologii na ukládání elektrické energie.

Vedle implementace multilineárního MPC pro další konkrétní typy aplikací SOFC je možným směrem budoucího výzkumu také další snížení tepelného namáhání SOFC článků při změnách zátěže. Toho by mohlo být dosaženo použitím prediktivního regulátoru, který by byl schopen uvažovat vedle omezení rychlosti změny teploty článku též omezení teplotních gradientů. K tomuto účelu je ovšem nezbytné vytvořit a použít dvourozměrný model článku, který ovšem svojí složitostí neumožňuje přímé použití pro potřeby prediktivního řízení.

Některé současné vědecké práce však naznačují (viz např. (Thorud et al. 2004)), že možným řešením může být využití statických nelineárních funkcí, neboli výkonových map, které je možné vytvořit řešením ustálených stavů dvourozměrných modelů. Tyto výkonové mapy mohou poskytnout vedle dalších veličin (výkon, účinnost, teploty apod.) rovněž informace o teplotních gradientech v palivovém článku a lze je využít pro predikci hodnot teplotních gradientů a následně pro stanovení optimální strategie při požadavku na změnu zátěže. Realizaci stanovené strategie pak již zajišťuje MPC regulátor využívající jednodušší typ modelu.

CITOVANÁ LITERATURA

- Aguiar, P., Adjiman, C. S. and Brandon, N. P. (2005) Anode-supported intermediate-temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell: II. Model-based dynamic performance and control. *Journal of Power Sources*, 147(1–2), pp. 136-147.
- Ahmed, K. and Foger, K. (2000) Kinetics of internal steam reforming of methane on Ni/YSZ-based anodes for solid oxide fuel cells. *Catalysis Today*, 63(2–4), pp. 479-487.
- Bhuyan, K. C. and Mahapatra, K. K. (2011) An intelligent control of solid oxide fuel cell voltage. in *2011 International Conference on Power and Energy Systems (ICPS)*. pp. 1-6.
- Braun, R. J. (2002) *Optimal design and operation of solid oxide fuel cell systems for small-scale stationary applications*. Unpublished Ph.D. thesis, University of Wisconsin – Madison.
- Campanari, S. and Iora, P. (2004) Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry. *Journal of Power Sources*, 132(1–2), pp. 113-126.
- Du, J., Song, C. and Li, P. (2009) Application of gap metric to model bank determination in multilinear model approach. *Journal of Process Control*, 19(2), pp. 231-240.
- Du, J., Song, C., Yao, Y. and Li, P. (2013) Multilinear model decomposition of MIMO nonlinear systems and its implication for multilinear model-based control. *Journal of Process Control*, 23(3), pp. 271-281.
- EG&G Technical Services, I. (2004) *Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)*, Morgantown, West Virginia: U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory.
- El-Sakkary, A. (1985) The gap metric: Robustness of stabilization of feedback systems. *Ieee Transactions on Automatic Control*, 30(3), pp. 240-247.
- El-Sharkh, M. Y., Rahman, A., Alam, M. S., Sakla, A. A., Byrne, P. C. and Thomas, T. (2004) Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant. *Ieee Transactions on Power Systems*, 19(4), pp. 2022-2028.
- Felder, R. M. and Rousseau, R. W. (2004) *Elementary Principles of Chemical Processes, 3rd Update Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
- FuelCellToday (2013) *The Fuel Cell Industry Review 2013*.
- Galán, O., Romagnoli, J. A., Palazoğlu, A. and Arkun, Y. (2003) Gap metric concept and implications for multilinear model-based controller design. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42(10), pp. 2189-2197.
- Georgiou, T. T. and Smith, M. C. (1990) Optimal robustness in the gap metric. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(6), pp. 673-686.
- Hajimolana, S., Hussain, M. A., Soroush, M., Daud, W. A. W. and Chakrabarti, M. H. (2013) Multilinear-Model Predictive Control of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell System. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(1), pp. 430-441.
- Hatziaodoniu, C. J., Lobo, A. A., Pourboghrat, F. and Daneshdoost, M. (2002) A simplified dynamic model of grid-connected fuel-cell generators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(2), pp. 467-473.
- Horalek, R. and Hlava, J. (2015a) Multilinear model predictive control of solid oxide fuel cell output voltage. in *Accepted to 12th IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics*, Liberec, Czech Republic.
- Horalek, R. and Hlava, J. (2015b) Multiple model predictive control of grid connected solid oxide fuel cell for extending cell life time. in *Accepted to 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation*, Torremolinos, Spain.
- Huang, B., Qi, Y. and Murshed, A. M. (2012) *Dynamic modelling and predictive control in solid oxide fuel cells: First principle and data-based approaches*.
- Chatterjee, K., Shankar, R. and Kumar, A. (2014) Fuzzy logic based controller for a grid-connected solid oxide fuel cell power plant. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 11(5), pp. 051005-1-051005-9.
- Larminie, J. and Dicks, A. (2003) *Fuel Cell Systems Explained (Second Edition)*, John Wiley & Sons.

- Li, Y. H., Rajakaruna, S. and Choi, S. S. (2007) Control of a Solid Oxide Fuel Cell Power Plant in a Grid-Connected System. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 22(2), pp. 405-413.
- Luo, F. L., Ye, H. and Rashid, M. (2005) Chapter 6 - digitally controlled DC/AC inverters. in Luo, F. L., Ye, H. and Rashid, M., (eds.) *Digital power electronics and applications*, San Diego: Academic Press. pp. 162-177.
- Maciejowski, J. M. (2002) *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall.
- McPhail, S. J., Leto, L. and Boigues-Muñoz, C. (2013) *International status of SOFC deployment 2012-2013*. The yellow pages of SOFC technology: National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
- Murray-Smith, R. and Johansen, T. (1997) *Multiple model approaches to nonlinear modeling and control*, Taylor & Francis, London, UK.
- Murshed, A. M., Huang, B. and Nandakumar, K. (2007) Control relevant modeling of planer solid oxide fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 163(2), pp. 830-845.
- Murshed, A. M., Huang, B. and Nandakumar, K. (2010) Estimation and control of solid oxide fuel cell system. *Computers & Chemical Engineering*, 34(1), pp. 96-111.
- Padulles, J., Ault, G. W. and McDonald, J. R. (2000) An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation. *Journal of Power Sources*, 86(1-2), pp. 495-500.
- Porš, Z. (2002) *Palivové články: Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s., Divize jaderné bezpečnosti a energetiky*.
- Qi, Y., Huang, B. and Luo, J. (2006) Dynamic modeling of a finite volume of solid oxide fuel cell: The effect of transport dynamics. *Chemical Engineering Science*, 61(18), pp. 6057-6076.
- Saha, A. K., Chowdhury, S., Chowdhury, S. P. and Song, Y. H. (2007) Application of solid-oxide fuel cell in distributed power generation. *Renewable Power Generation, IET*, 1(4), pp. 193-202.
- Sedghisigarchi, K. and Feliachi, A. (2004) Dynamic and transient analysis of power distribution systems with fuel Cells-part I: fuel-cell dynamic model. *Ieee Transactions on Energy Conversion*, 19(2), pp. 423-428.
- Thorud, B., Stiller, C., Weydahl, T., Bolland, O. and Karoliussen, H. (2004) Part-load and load change simulation of tubular sofc systems. in *Sixth European Solid Oxide Fuel Cell Forum, Lucerne, Switzerland*.
- Tiejun, Z. and Gang, F. (2009) Rapid Load Following of an SOFC Power System via Stable Fuzzy Predictive Tracking Controller. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17(2), pp. 357-371.
- Vidyasagar, M. (1984) Graph metric for unstable plants and robustness estimates for feedback stability. *Ieee Transactions on Automatic Control*, AC-29(5), pp. 403-418.
- Zhao, H. and Burke, A. F. (2010) Fuel cell powered vehicles using supercapacitors—device characteristics, control strategies, and simulation results. *Fuel Cells*, 10(5), pp. 879-896.

SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ TÝKAJÍCÍCH SE TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlava, J. and Horalek, R. (2009) Hybrid systems in control-oriented power plant modelling. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. pp. 1649-1650.

Horalek, R. and Hlava, J. (2009) Piecewise affine approximation of nonlinear systems - A case study of a benchmark nonlinear boiler. In *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering, ICOSSSE '09*. pp. 273-277.

Horalek, R. and Hlava, J. (2011) Comparison of linear and nonlinear model predictive control of benchmark drum boiler. In *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*. pp. 603-604.

Horalek, R. and Hlava, J. (2015a) Multilinear model predictive control of solid oxide fuel cell output voltage. Presented on *12th IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics*, Liberec, Czech Republic.

Horalek, R. and Hlava, J. (2015b) Multiple model predictive control of grid connected solid oxide fuel cell for extending cell life time. Presented on *23rd Mediterranean Conference on Control and Automation*, Torremolinos, Spain.

Horalek, R. and Imsland, L. (2011) Nonlinear model predictive control of a benchmark nonlinear boiler. In *2011 23rd International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies, ICAT 2011*.

DALŠÍ VÝSLEDKY AUTORA

Beran L., Šrámek R., Vyšanská M., Horčíčka J., Koukolíková L., Horálek R., Jelínek I. (2009). Optical Evaluation of a Yarn Being Continuously Wound on the Surface. In *16th International Conference Structure and Structural Mechanics of Textiles, STRUTEX 2009*.

Beran L., Horčíčka J., Horálek R., Šrámek R. (2010). Hodnocení textilních meziproduktů. *Sborník technických zpráv VCT II, sekce C*, 2010, ISRN-VCT2/C-RMM/TZ-10/001/CZ.

Horčíčka J., Horálek R. (2009). Dynamické měření parametrů příze pomocí počítačového zpracování obrazu. *Sborník technických zpráv VCT II, sekce C*, 2009, ISRN-VCT2/C-RMM/TZ-09/001/CZ.

Horčíčka J., Horálek R. (2010). *Nástroj pro hodnocení nanovlákných obrazů (Nimet)*. Software, 2010, RIV/46747885:24220/10:#0001593.

Horčíčka J., Horálek R. (2013). *Modelování optických vlastností bižuterních kamenů*. Souhrnná výzkumná zpráva, 2013, RIV/46747885:24220/13:#0002512.

Horálek R., Horčíčka J. (2014a). *Modelování optických vlastností bižuterních kamenů 2014/1*. Souhrnná výzkumná zpráva, 2014, RIV/46747885:24220/14:00000438.

Horálek R., Horčíčka J. (2014b). *Modelování optických vlastností bižuterních kamenů 2014/2*. Souhrnná výzkumná zpráva, 2014, RIV/46747885:24220/14:00000419.

Horálek R., Horčíčka J. (2014c). *Modelování optických vlastností bižuterních kamenů 2014/3*. Souhrnná výzkumná zpráva, 2014, RIV/46747885:24220/14:00000462.