

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ



Modelování a simulace

2014/2015

Plynová krize v Evropě

Obsah

1	Úvod	3
1.1	Autoři a hlavní zdroje informací	3
1.1.1	Autoři	3
1.1.2	Hlavní zdroje informací	3
1.2	Validace modelu	3
1.3	Zadání projektu	3
1.4	Zkoumané scénáře	4
2	Rozbor tématu a použitých metod/technologií	4
2.1	Popis použitých metod a technologií	4
2.2	Popis původu použitých metod/technologií	4
2.3	Rozbor tématu	4
2.3.1	Import, export, produkce a spotřeba	5
2.3.2	Zásobníky zemního plynu	5
2.3.3	Přepravní trasy	5
2.3.4	Lodní terminály na LNG	7
3	Koncepce - modelářská témata	7
3.0.5	Způsob vyjádření konceptuálního modelu	8
3.0.6	Formy konceptuálního modelu	8
4	Koncepce - implementační témata	8
5	Architektura simulačního modelu/simulátoru	8
6	Podstata simulačních experimentů a jejich průběh	8
7	Shrnutí simulačních experimentů a závěr	9

1 Úvod

Tato práce popisuje řešení implementace diskrétního modelu produkce, spotřeby a přepravy plynu v zemích Česká republika, Polsko, Slovensko, Maďarsko a Ukrajina.

Na základě vytvořeného modelu a simulačních experimentů bude ukázána závislost jednotlivých zemí na dovozu zemního plynu z Ruska, užitečnost možného dovážení zkapalněného zemního plynu (*LNG*) z USA a míra připravenosti výše zmiňovaných zemí na možnou plynou krizi.

Smyslem experimentů je demonstrovat odolnost daných států vůči embargu na zemní plyn ze strany Ruska a jejich schopnost udržet normální běh státu v tomto stavu. Dalším smyslem je hledání nového zdroje zemního plynu, kterým by se zmírnila závislost na zemním plynem dováženém z Ruska.

1.1 Autoři a hlavní zdroje informací

1.1.1 Autoři

- Marek Fiala, xfiala46@stud.fit.vutbr.cz
- Martin Janoušek, xjanou14@stud.fit.vutbr.cz

1.1.2 Hlavní zdroje informací

Za hlavní zdroj informací byl použit elektronický sborník Natural Gas Information [1]¹, který je každoročně vydáván Mezinárodní energetickou agenturou². Tento elektronický sborník se zabývá požadavky a zásobami plynu v zemích po celém světě.

Dalším důležitým zdrojem informací byla webová stránka asociace *Gas Infrastructure Europe (GIE)*³.

1.2 Validace modelu

Ověřování modelu probíhalo experimentování s modelem a to v rámci různých testů. Výsledky těchto testů byly srovnávány s dostupnými informacemi a také s výsledky, které byly dosaženy analitickými metodami. Jako kontrolní informace byla využita studie na téma *Embargo ruského plynu*.⁴ Výsledky testů byly také srovnávány napříč mezi soubou, což neověřilo správnost celého modelu, ale shodnosti jednotlivých komponent.

1.3 Zadání projektu

Oficiální zadání projektu je k dispozici na stránkách <http://perchta.fit.vutbr.cz:8000/vyuka-ims/34>.

„Navrhněte diskrétní model produkce, spotřeby a přepravy plynu v zemích okolo České republiky (Polsko, ČR, Slovensko, Maďarsko, Ukrajina). Za místa produkce považujte místa aktuálních (a uvažovaných) přístavních terminálů na LNG v Evropě, podzemní zásobníky v daných zemích (včetně jejich kapacity) a Rusko. Každou zemi považujte v modelu za jeden uzel produkce a spotřeby (neuvažují se místní rozvody plynu). Modelujte současnou přepravní síť mezi uzly. Síť dle potřeb rozšiřte o další uzly a země. Navrhněte a zdůvodněte přepravní doby mezi uzly v jednotce množství za hodinu (př. uzel Rusko produkuje do přepravního kanálu na Ukrajinu X množství každou hodinu. Přepravní doba z uzlu Rusko do uzlu Ukrajina je Y hodin.). Zkoumejte dostupnost plynu v uzlech v různých obdobích roku (zimní spotřeba, letní spotřeba) v různých scénářích (zprovoznění terminálu LNG pro dovoz z USA, Ukrajina přeruší transportní cestu, Rusko přestane dodávat apod.).“

¹konkrétně ten vydaný v roce 2014

²viz. <http://www.iea.org/>

³viz. <http://www.gie.eu.com/>

⁴viz. <http://www.regjeringen.no/upload/OED/pdf%20filer/Brussel/Hoeffler.Gas.Embargo.pdf>

1.4 Zkoumané scénáře

1. Současná situace

Zkoumání současného stavu včetně dodávek z Ruska. Scénář je v hodný z důvodu následného ověřování modelu.

2. Zastavení dodávek z ruska

Zjištění doby, která uplyne od zastavení dodávek z Ruska do vyčerpání zásob u jednotlivých zemí.

3. Dodávání plynu z USA po celý rok

Simulace stavu, kdy Rusko omezí dodávky plynu, ale začne se dovážet plyn z USA.

4. Dovoz plynu z USA pouze v létě

Variantu předchozího stavu s dodávkami plynu z USA pouze v létě.

5. Dosatečné zásoby na jeden rok

Zjišťování dostatečné kapacity zásobníků plynu v jednotlivých zemích, tak aby vystačili po dobu 1 roku.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Shrnutí všech podstatných faktů, které se týkají zkoumaného systému (co možná nejvěcnějším a technickým (ideálně formálně matematickým) přístupem, žádné literární příběhy). Podstatná fakta o systému musí být zdůvodněna a podepřena důvěryhodným zdrojem (vědecký článek, kniha, osobní měření a zjišťování). Pokud budete tvrdit, že ovce na pastvě sežere dvě kila trávy za den, musí existovat jiný (důvěryhodný) zdroj, který to potvrdí. Toto shrnutí určuje míru důvěryhodnosti vašeho modelu (nikdo nechce výsledky z nedůvěryhodného modelu). Pokud nebudou uvedeny zdroje faktů o vašem systému, hrozí ztráta bodů.

2.1 Popis použitých metod a technologií

Pro implementaci byl zvolen jazyk C++ a to ve variantě bez knihoven podporujících simulaci. Důvodem tohoto rozhodnutí byla rychlost spustitelného programu a také to, že veškeré události v modelu se vykonávají diskrétně v intervalech po jedné hodině. **Modelového času** pro účeli tohoto modelu lze tedy docílit jednoduše vykonáním všech událostí se stejným počátečním časem v jedné iteraci cyklu.

2.2 Popis původu použitých metod/technologií

Pro získání přenosové doby plynu mezi jednotlivými zeměmi a přístavními terminály, bylo nutné vypočítat tyto hodnoty z délky jednotlivých plynovodů a rychlosti plynu, který v nich proudí. Stejně tak množství plynu, se kterým se pracuje za dobu jedné hodnoty, bylo nutné vypočítat z hodnot, které jsou udány v množství za hodinu. Všechny vzorce a zdroje jsou uvedeny v kapitole 2.3.

2.3 Rozbor tématu

Zemní plyn je přírodní hořlavý plyn využívaný jako významné fosilní palivo. Pro přepravu se používá potrubí (kratší vzdálenosti) a nebo je přepravován loděmi přes moře (velké vzdálenosti).

Pro přepravu přes moře je plyn převeden do formy CNG (stlačený zemní plyn) nebo LNG (zkapalněný zemní plyn) tímto je docíleno zmenšení objemu zemního plynu ⁵. V cílovém terminálu přečerpán do zásobníků, postupně je plyn odpařován a dodáván do plynovodního systému.

Práce je zacílena na produkci, spotřebu a přepravu zemního plynu v zemích okolo České republiky (Polsko, ČR, Slovensko, Maďarsko, Ukrajina) a proto bylo nejprve potřeba nalézt tyto hodnoty pro každou

⁵V případě LNG cca 600x

z těchto zemí (2.3.1). Důležitou informací byly rovněž kapacity zásobníků v jednotlivých zemích (2.3.2). Další stěžejní informací byla vzdálenost mezi jednotlivými zeměmi a také vlastnosti plynovodů (rychlost toku, délka, maximální propustnost...) mezi místem těžby zemního plynu a jednotlivými zeměmi (2.3.3). Poslední důležitou informací je umístění a kapacita vznikajících terminálů na LNG, které jsou v plánu v těchto zemích postavit případně, které by mohli některou z daných zemí zásobovat (2.3.4).

2.3.1 Import, export, produkce a spotřeba

Stát	import	export	produkce	spotřeba
Česká republika	8 479	8	252	8 477
Slovensko	5 579	15	124	5 820
Maďarsko	8 176	1 443	1 949	9 221
Polsko	12 473	94	6 206	18 229
Ukrajina	27 495	-	20 046	51 528

Tabulka 1: Import, export produkce a spotřeba jednotlivých zkoumaných zemí za jeden rok.
Jednotky mcm ($m^3 * 10^6$). Zdroj [1]

Tyto hodnoty nebyly vhodné do modelu jelikož odpovídaly zvolenému modelovému času jedna hodina. Vzhledem k tomuto nedostatku bylo potřeba hodnoty převést na jednotky přepravené na hodiny. Přepočítané hodnoty viz tabulka 2.

Stát	import	export	produkce	spotřeba
Česká republika	968	1	29	968
Slovensko	637	2	14	664
Maďarsko	933	165	222	1 053
Polsko	1 424	11	708	2 081
Ukrajina	3 139	-	2288	5 882

Tabulka 2: Import, export produkce a spotřeba jednotlivých zkoumaných zemí za jednu hodinu.
Veškeré hodnoty jsou uvedeny v jednotkách tcm ($m^3 * 10^3$)⁶.

Po tomto kroku byly téměř všechny hodnoty připraveny na vložení do modelu. Poslední hodnotou, kterou bylo potřeba modifikovat byla spotřeba a to tak aby odpovídala spotřebě za letní a za zimní období. Vzhledem ke skutečnosti, že se v primárním zdroji informací tyto hodnoty nenacházely a z jiného zdroje přesně neodpovídaly nalezeným hodnotám z primárního zdroje (viz tabulka 1), byl poměr zimní a letní spotřeby získán z hodnot vypsáných v mapě [3] a posléze aplikován na hodnoty v tabulce 1.

Výsledný poměr a hodnoty jsou společně se získaným poměrem vypsány v tabulce 3.

2.3.2 Zásobníky zemního plynu

Hodnoty jsou opět získány z [1], rovněž zajímavým zdrojem je stránka <http://transparency.gie.eu/> kde jsou každý den aktualizovány statistiky zásobníků (zaplnění, odběr, kapacita,...)

2.3.3 Přepavní trasy

Jako přepravní síť plynu z místa těžby do místa spotřeby byly zvoleny existující plynovody, které jsou vypsány v tabulce 5. Vzhledem k abstrakci jednotlivých států na jeden uzel produkce a spotřeby a neuvážování místních rozvodů plynu byla pro účely modelu použita vzdálenost hlavních měst zkoumaných států (viz tabulka 6).

⁶Převod z hodnot uvedených v tabulce výše tabulce. Převod: původní hodnota/365/24.

Stát	spotřeba celý rok	získaný poměr	spotřeba duben-září	spotřeba říjen-březen
Česká republika	968	28,6 %	553	1382
Slovensko	664	29,0 %	385	942
Maďarsko	1 053	27,5 %	578	1526
Polsko	2 081	39,4 %	1637	2524
Ukrajina	5 882	27,5 %	3229	8535

Tabulka 3: Průměrná spotřeba jednotlivých zemí za jeden rok, za letní a zimní období za rok.
Veškeré hodnoty jsou uvedeny v jednotkách tcm ($m^3 * 10^3$).

Stát	celková kapacita zásobníků
Česká republika	3 497
Slovensko	3 155
Maďarsko	6 330
Polsko	2 474
Ukrajina	31 950

Tabulka 4: Maximální kapacity zásobníků v jednotlivých zemích.
Veškeré hodnoty jsou uvedeny v jednotkách mcm ($m^3 * 10^6$).

Název	Začátek (místo těžby)	Konec (cílové státy)	Vzdálenost
Jamal	poloostrov Jamal, Rusko	Polsko	3177 km
North stream ⁷	poloostrov Jamal, Rusko	Německo	4341 km
Europipe I.	Severní moře, Norsko	Německo	642 km
Soyuz	poloostrov Jamal, Rusko	Ukrajina	3640 km
		Slovensko	4500 km

Tabulka 5: Délka uvažovaných plynovodů.

Stát	Česko	Slovensko	Maďarsko	Polsko	Ukrajina
Česko	0	290 km	445	520	1150
Slovensko	290	0	160	540	1010
Maďarsko	445	160	0	545	900
Polsko	520	540	545	0	695
Ukrajina	1150	1010	900	695	0

Tabulka 6: Vzdálenosti hlavních měst států.
Veškeré hodnoty jsou uvedeny v jednotkách km.
Hodnoty změřené za pomoci webové stránky *Mapy.cz*⁸

Přepavní rychlost zemního plynu byla zvolena hodnota 20 m/s získaná ze zdroje [4]. Tato hodnota je v uvedeném zdroji označena jako doporučená proto, že se jedná o nejvyšší rychlost toku zemního plynu, která nezvyšuje riziko koroze na potrubí v němž je zemní plyn přepravován. V modelu je tato rychlost převedena na km/h, tedy na **72 km/h**, a je použita pro odhadované zpoždění plynu z místa těžby na místa spotřeby.

Hodnoty získané kombinací hodnot z tabulky 5 a výše zmiňované doporučené rychlosti 72 km/h lze získat

⁷Název North stream je označení pouze pro plynovod vedoucí po dně Baltského moře jehož délka je 1 224 km, ale pro účely práce bylo vhodnější k délce North streamu přičíst délkou plynovodu vedoucího do místa těžby.

⁸<http://www.mapy.cz/>

přepavní čas zemního plynu pro jednotlivé plynovody (viz tabulka 7).

Obdobně lze získat přepavní čas mezi uzly reprezentujícími jednotlivé země. V tomto případě jsou použity hodnoty z tabulky 6. Výsledné hodnoty jsou vypsány v tabulce 8.

Název	Začátek (místo těžby)	Konec (cílové státy)	Doba přepravy
Yamal	SZ Ruska	Polsko	47 hodin
North stream	SZ Ruska	Německo	60 hodin
Europipe I.	Severní moře, Norsko	Německo	9 hodin
Soyuz	SZ Ruska	Ukrajina	51 hodin
		Slovensko	74 hodin

Tabulka 7: Čas potřebný k překonání uvažovaných plynovodů

Stát	Česko	Slovensko	Maďarsko	Polsko	Ukrajina
Česko	0	4	6	7	16
Slovensko	4	0	2	8	14
Maďarsko	6	2	0	8	13
Polsko	7	8	8	0	10
Ukrajina	16	14	13	10	0

Tabulka 8: Čas potřebný k překonání vzdálenosti hlavních měst států. Veškeré hodnoty jsou uvedeny v jednotkách hodina.

2.3.4 Lodní terminály na LNG

Jedním z důvodů vzniku celé této práce je simulace možnosti převozu zkapalněného zemního plynu do Evropy z USA. Za tímto účelem bylo třeba nalézt plánované lodní terminály, které by byly vhodné pro přepravu LNG do zemí zkoumaných v těchto experimentech (Polsko, ČR, Slovensko, Maďarsko, Ukrajina).

Kritéria pro výběr nejvhodnějších lodních terminálů byla existence potrubní sítě s dostatečnou přepravní kapacitou, dále také vzdálenost od místa spotřeby a v neposlední řadě také plánovaný roční odběr.

Z těchto kritérií nejvíce vyhovují terminály vypsány v tabulce

Stát	Místo	Kapacita	Očekávaná kapacita ročního odběru	Rok dokončení
Polsko	Swinouscije	320 000 m^3	$7,5 m^3 * 10^9$	2014
Chorvatsko	Krk	250,000 m^3	$10 m^3 * 10^9$	2017
Ukrajina	Odessa	540 000 m^3	$10 m^3 * 10^9$	2018

Tabulka 9: Terminály LNG, které nejlépe odpovídají kritériům. Zdroje [5],[6] a [7]

Zdroje <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/ukraine-lng-terminal/> <http://www.adria-lng.hr/>

3 Koncepce - modelářská témata

Konceptuální model je abstrakce reality a redukce reality na soubor relevantních faktů pro sestavení simulačního modelu. Předpokládáme, že model bude obsahovat fakta z "Rozboru tématu". Pokud jsou některá vyřazena nebo modifikována, je nuto to zde zdůvodnit (například: zkoumaný subjekt vykazuje v jednom procentu případů toto chování, ovšem pro potřeby modelu je to naprosto marginální a smíme to zanedbat, neboť ...). Pokud některé partie reality zanedbáváte nebo zjednodušujete, musí to být zdůvodněno a v

ideálním případě musí být prokázáno, že to neovlivní validitu modelu. Cílem konceptuálního (abstraktního) modelu je formalizovat relevantní fakta o modelovaném systému a jejich vazby. Podle koncept. modelu by měl být každý schopen sestavit simulační model.

3.0.5 Způsob vyjádření konceptuálního modelu

kapitola 3.1: Způsob vyjádření konceptuálního modelu musí být zdůvodněn (na obrázku xxx je uvedeno schéma systému, v rovnicích xx-yy jsou popsány vazby mezi ..., způsob synchronizace procesů je na obrázku xxx s Petriho sítí).

3.0.6 Formy konceptuálního modelu

kapitola 3.2: Formy konceptuálního modelu (důraz je kladen na srozumitelnost sdělení). Podle potřeby uveďte konkrétní relevantní: obrázek/náčrt/schéma/mapa (možno čitelně rukou) matematické rovnice - u některých témat (např. se spojitými prvky, optimalizace, ...) naprosto nezbytné. Dobré je chápat, že veličiny (fyzikální, technické, ekonomické) mají jednotky, bez kterých údaj nedává smysl. stavový diagram (konečný automat) nebo Petriho síť - spíše na abstraktní úrovni. Petriho síť nemá zobrazovat výpočty a přílišné detaily. Pokud se pohodlně nevejde na obrazovku, je nepoužitelná. Možno rozdělit na bloky se zajímavými detaily a prezentovat odděleně abstraktní celek a podrobně specifikované bloky (hierarchický přístup).

4 Koncepce - implementační témata

Popište abstraktně architekturu vašeho programu, princip jeho činnosti, významné datové struktury a podobně. Smyslem této kapitoly je podat informaci o programu bez použití názvů tříd, funkcí a podobně. Tuto kapitolu by měl pochopit každý technik i bez inženýrského vzdělání. Vyjadřovacími prostředky jsou vývojové diagramy, schémata, vzorce, algoritmy v pseudokódu a podobně. Musí zde být vysvětlena nosná myšlenka vašeho přístupu.

5 Architektura simulačního modelu/simulátoru

Tato kapitola má různou důležitost pro různé typy zadání. U implementačních témat lze tady očekávat jádro dokumentace. Zde můžete využít zajímavého prvku ve vašem simulačním modelu a tady ho "prodat". kapitola 4.1: Minimálně je nutno ukázat mapování abstraktního (koncept.) modelu do simulačního (resp. simulátoru). Např. které třídy odpovídají kterým procesům/veličinám a podobně.

6 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Nezaměňujte pojmy testování a experimentování (důvod pro bodovou ztrátu)!!! Zopakovat/shrnout co přesně chcete zjistit experimentováním a proč k tomu potřebujete model. Pokud experimentování nemá cíl, je celý projekt špatně. Je celkem přípustné u experimentu odhalit chybu v modelu, kterou na základě experimentu opravíte. Pokud se v některém experimentu nechová model podle očekávání, je nutné tento experiment důkladně prověřit a chování modelu zdůvodnit (je to součást simulačnické profese). Pokud model pro některé vstupy nemá důvěryhodné výsledky, je nutné to zdokumentovat. Pochopitelně model musí mít důvěryhodné výsledky pro většinu myslitelných vstupů. kapitola 5.1: Naznačit postup experimentování – jakým způsobem hodláte prostřednictvím experimentů dojít ke svému cíli (v některých situacích je přípustné "to zkoušet tak dlouho až to vyjde", ale i ty musí mít nějaký organizovaný postup). kapitola 5.2: Dokumentace jednotlivých experimentů - souhrn vstupních podmínek a podmínek běhu simulace, komentovaný výpis výsledků, závěr experimentu a plán pro další experiment (např. v experimentu 341. jsem nastavil vstup x na hodnotu X, která je typická pro ... a vstup y na Y, protože chci zjistit chování systému v prostředí ... Po skončení běhu simulace byly získány tyto výsledky ..., kde je nejzajímavější hodnota sledovaných veličin a,b,c které se chovaly podle předpokladu a veličin d,e,f které ne. Lze z toho usoudit, že v modelu není správně implementováno chování v podmínkách ... a proto v následujících experimentech budu vycházet z modifikovaného modelu verze

... Nebo výsledky ukazují, že systém v těchto podmínkách vykazuje značnou citlivost na parametr x ... a proto bude dobré v dalších experimentech přesně prověřit chování systému na parametr x v intervalu hodnot ... až ...) kapitola 5.3: Závěry experimentů – bylo provedeno N experimentů v těchto situacích ... V průběhu experimentování byla odstraněna ... chyba v modelu. Z experimentů lze odvodit chování systémů s dostatečnou věrohodností a experimentální prověřování těchto ... situací již nepřinese další výsledky, neboť ...

7 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Závěrem dokumentace se rozumí zhodnocení simulační studie a zhodnocení experimentů (např. Z výsledků experimentů vyplývá, že ... při předpokladu, že ... Validita modelu byla ověřena ... V rámci projektu vznikl nástroj ..., který vychází z ... a byl implementován v ...). do závěru se nehodí psát poznámky osobního charakteru (např. práce na projektu mě bavila/nebavila, ...). Technická zpráva není osobní příběh autora. absolutně nikoho nezajímá, kolik úsilí jste projektu věnovali, důležitá je pouze kvalita zpracování simulátoru/modelu a obsažnost simulační studie (rozhodně ne např.: projekt jsem dělal ... hodin, což je víc než zadání předpokládalo. Program má ... řádků kódu). Pokud zdůrazňujete, že jste práci dělali významně déle než se čekalo, pak tím pouze demonstujete vlastní neschopnost (to platí zejména v profesním životě). do závěru se velmi nehodí psát "auto-zhodnocení" kvality práce, to je výhradně na recenzentovi/hodnotiteli (např. v projektu jsem zcela splnil zadání a domnívám se, že můj model je bezchybný a výsledky taktéž). Statisticky častý je pravý opak autorova auto-zhodnocení. Pokud přesto chcete vyzdvihnout kvalitu svého díla (což je dobře), tak vaše výroky musí být naprosto nepopíratelně zdůvodněny a prokázány (např. pomocí jiného referenčního přístupu, matematického důkazu, analýzy, ...).

Literatura a použité zdroje

- [1] IEA natural gas information [online]. [cit. 2014-12-03]. ISBN 1683-4267. Dostupné z: http://www.oecd-ilibrary.org/energy/natural-gas-information_16834267
- [2] Gas Infrastructure Europe [online]. [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://www.gie.eu.com/>
- [3] http://www.gie.eu.com/download/maps/ENTSO-GIE_SYSDEV_MAP2013.pdf
- [4] Natural gas engineering and safety challenges. pages cm. ISBN 978-331-9089-478.
- [5] Gas LNG Europe. [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: http://www.gie.eu/download/maps/2014/GLE_LNG_JUNE2014.pdf
- [6] O PROJEKTU. ADRIA LNG [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.adria-lng.hr/index.php?f=&m=2&s=0>
- [7] Ukraine LNG Terminal, Ukraine. [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/ukraine-lng-terminal/>