

Téma 6: Plynová krize v Evropě

Simulační studie k projektu do předmětu IMS

21. ledna 2015

Autor: Vojtěch Havlena (xhavle03)
Karel Březina (xbrezi13)
Fakulta Informačních Technologií
Vysoké Učení Technické v Brně

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Autoři a zdroje informací	2
1.2	Experimentální ověření validity	2
2	Rozbor tématu a použitých metod/technologií	3
2.1	Použité postupy	4
3	Koncepce	4
3.1	Způsob vyjádření konceptuálního modelu	6
3.2	Forma konceptuálního modelu	6
4	Architektura simulačního modelu/simulátoru	7
4.1	Mapování konceptuálního modelu na simulační	7
5	Podstata simulačních experimentů a jejich průběh	7
5.1	Postup experimentování	7
5.2	Konkrétní experimenty	8
5.2.1	Experiment 1	8
5.2.2	Experiment 2	8
5.2.3	Experiment 3	9
5.2.4	Experiment 4	10
5.3	Závěry experimentů	11
6	Shrnutí simulačních experimentů a závěr	11

1 Úvod

Tato práce vznikla v rámci projektu do předmětu Modelování a simulace. V práci je řešena simulace ([8], slide 8) modelu ([8], slide 7) spotřeby a produkce plynu ve vybraných Evropských státech. Na základě modelu a simulačních experimentů je zjišťována dostupnost plynu v jednotlivých státech za daných krizových situací. Smyslem dílčích experimentů je ukázat různé alternativy řešení dané krizové situace.

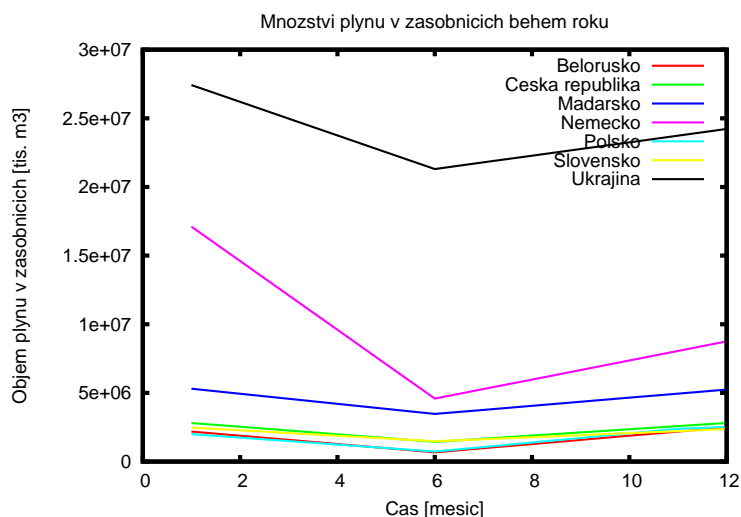
1.1 Autoři a zdroje informací

Autory práce jsou Vojtěch Havlena a Karel Březina. Mezi hlavní zdroj informací lze zařadit mapy a další data z webových stránek Gas Infrastructure Europe (<http://transparency.gie.eu/>). Další potřebné informace byly zjišťovány z webových stránek národních dodavatelů plynu v jednotlivých zemích.

1.2 Experimentální ověření validity

Experimentální ověření validity modelu ([8], slide 37) probíhalo na základě porovnávání zjištěných reálných hodnot stavu zásobníků plynu v jednotlivých státech s výsledky experimentu, ve kterém se simulovalo dodávání plynu podle reality.

Pokud porovnáme výsledek experimentu s grafy, které jsou volně dostupné na <http://transparency.gie.eu/>, lze zjistit, že průběhy grafů jsou mezi sebou korelovány.



Obrázek 1: Výsledek experimentu zjišťující množství plynu v zásobnících jednotlivých států během roku. Nejsou uvažovány plánované LNG terminály. Z důvodu čitelnosti grafu zde není zobrazeno Rusko.

Rozdíly mezi maximálními a minimálními hodnotami plynu v zásobnících jednotlivých států ¹ lze shrnout následující tabulkou:

¹Jsou uvedeny pouze státy, jejichž hodnota kapacity zásobníků během časového období se po-

Stát	Výsledek experimentu [mil. m ³]	Zjištěná hodnota [mil. m ³]
Česká republika	1371	1440
Polsko	1267	1088
Maďarsko	1839	1712
Německo	12520	14877
Slovensko	997	1284

Tabulka 1: Rozdíly mezi maximálním a minimálním objemem plynu v zásobnících jednotlivých států během roku.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Každý stát obsahuje několik zásobníků pro uložení plynu. Spotřeba plynu každého státu se liší podle ročního období. Poměr letní a zimní spotřeby se nepodařilo zjistit pro Bělorusko a Rusko, avšak podle polohy těchto států a hodnot zjištěných u ostatních států jsme tento poměr odhadli (tabulka 2) [3].

Kvůli maximální živostnosti plynovodů se objem dodávek plynu během roku mění jen minimálně. Plynové zásobníky jednotlivých států slouží právě k vyrovnání tohoto rozdílu mezi dodávkou a spotřebou. Některé státy disponují také vlastní produkcí plynu. Některé státy taktéž exportují plyn do okolních států. Mezi jednotlivými státy je plyn rozváděn pomocí plynovodů. Každý plynovod je určen maximální průtokovou kapacitou v jednotce množství za hodinu. Rychlost plynu se pohybuje až kolem 40 km/h [1].

Mezi hlavní dodavatele plynu v Evropě patří Rusko a Norsko. Plyn z Ruska proudí do centrální Evropy přes plynovod Yamal (přes Bělorusko do Polska), Nordstream (podmořský plynovod do Německa) a plynovod Družba (přes Ukrajinu, Slovensko do České republiky). Plyn z Norska proudí přes plynovody Europipe I a Europipe II z přístavních LNG terminálů Kollsnes 1+2 [10] a Snurrevarden do Německa. Souhrn zjištěných informací o plynovodech spojující jednotlivé státy lze nalézt v tabulce 4. Mezi další LNG terminály, které dodávají plyn do uvažovaných zemí patří Belgické Zeebrugge [5] a Nizozemský Rotterdam [4]. Posledně zmiňované dodávají plyn do Německa (kapacita LNG terminálů – tabulka 3).

Nicméně v budoucnu by se měli otevřít další LNG terminály, které mohou ovlivnit závislost na ruském plynu. Mezi nejdůležitější patří pravděpodobně budovaný polský terminál Swinoujscie a chorvatský terminál Adria [9]. Tyto terminály by měli být spojeny Severojižním koridorem, přes Polsko, ČR, Slovensko, Maďarsko a Chorvatsko. Je plánována také výstavba LNG terminálu pro dovoz z USA, ale o něm neexistuje zatím moc konkrétních informací. Proto jsme kapacitu a umístění terminálu zvolili podle našeho uvážení a podle útržkovitých nalezených informací [7].

Zjištěné informace jsou shrnuty v následující tabulce.

dařila zjistit.

Stát	Spotřeba [tis. m ³ /h]	Produkce [tis. m ³ /h]	Kapacita zás. [tis. m ³]	Koef. letní spotřeby
Česká republika	968	29	3436000	0.639
Polsko	2081	709	2524000	0.805
Maďarsko	1041	222	6330000	0.557
Německo	10096	1345	22027000	0.78
Slovensko	664	0	3020000	0.637
Ukrajina	5875	2288	31950000	0.798
Bělorusko	2338	27	2832000	0.820
Rusko	53289	76584	70400000	0.812

Tabulka 2: Spotřeba, produkce a kapacita zásobníků sledovaných států z roku 2013 (zdroj: [6]). Sloupec koeficient letní spotřeby udává hodnotu p , kterou se násobí průměrná spotřeba v létě. V zimním období se průměrná spotřeba násobí hodnotou $2 - p$. (zdroj: spočítáno z [3])

LNG terminál	Kapacita [tis. m ³ /h]
Kollsnes	5958
Snurrevarden	3208
Rotterdam	1369
Zeebrugge	1027
Swinoujscie	854
Adria	1708
USA	6500

Tabulka 3: Kapacita LNG terminálů (zdroje: [9], [7], [4], [5])

2.1 Použité postupy

Pro implementaci byl zvolen jazyk C++, taktéž kvůli podpoře objektově orientovaného programování, které se pro řešení hodí. Nakonec jsme se rozhodli nepoužít knihovnu SIMLIB, protože v projektu simulujeme pohyb velkého množství plynu a to by použití této knihovny komplikovalo. Pro vykreslení grafů je použit volně dostupný nástroj gnuplot, který je dostupný na <http://www.gnuplot.info/>.

3 Koncepce

V systému, jak již bylo zmíněno dříve, se vyskytují státy. Oproti zadání jsme si seznam sledovaných států rozšířili o Bělorusko a Německo. Každý stát obsahuje zásobník plynu s určitou kapacitou. Zásobníky lze chápat jako sklady s danou kapacitou. Odtud se bere plyn pro pokrytí spotřeby daného státu. Uvažujeme, že spotřeba se pohybuje v náhodném rozmezí $\pm 10\%$ od průměrné spotřeby v ročním období daného státu. Roční období léto a zima se střídá vždy po 6 měsících. Státy mohou být připojeny k výstupním plynovodům, kudy posílají plyn jednotlivým státům. O tom,

Plynovod	Kapacita [tis. m ³ /h]	Délka [km]	Přepr. doba [h]
Rusko – Ukrajina	8542	775	19
Ukrajina – Slovensko	8542	1010	24
Bělorusko – Polsko	3843	480	12
Rusko – Bělorusko	3843	695	17
Ukrajina – Maďarsko	2232	905	22
Ukrajina – Polsko	509	691	17
Rusko – Německo	6539	1222	30
Slovensko – ČR	1978	300	7
Maďarsko – Slovensko	1640	165	4
ČR – Polsko	104	525	13
Německo – Polsko	1942	517	12
Německo – ČR	1197	285	7
Kollsnes 1+2 – Německo	1916	670	16
Snurrevarden – Německo	2958	670	16
Zeebrugge – Německo	1655	590	14
Rotterdam – Německo	1655	609	15
Swinoujscie – Polsko	1640	100	2
Adria – Maďarsko	1640	359	8
USA – Polsko	3000	100	2

Tabulka 4: Maximální kapacita plynovodů (zdroj: [2], spočítáno pomocí nástroje dostupného na: <http://www.interconnector.com/units-converter>). Přepravní doba byla spočítána jako podíl délky plynovodu a rychlosti plynu (40 km/h).

jaké množství plynu státy pošlou rozhoduje použitá strategie. V našem případě se jedná o „hladovou“ strategii. Množství exportovaného plynu je dáno následujícím vzorcem:

$$p_{exp} = \max\{p_{imp} - p_{cons} + p_{prod}, 0\},$$

kde p_{exp} je množství exportovaného plynu, p_{imp} je mn. importovaného plynu a p_{cons} resp. p_{prod} je spotřeba plynu resp. produkce daného státu. Uvedená strategie znamená, že státy se v první řadě snaží pokrýt svoji spotřebu a exportují až zbytek. Exportovaný plyn se posléze rozdělí podle poměru kapacit výsledných plynovodů. Pro účely validace modelu byla vytvořena i „smluvní“ strategie. V ní je odesílané množství plynu předem známo, tato strategie se však příliš nehodí pro simulaci krizových situací, proto nebude dále uvažována.

LNG terminály jsou modelovány jako zásobníky plynu. V modelu předpokládáme, že po každé hodině dojde k doplnění až do maximální kapacity plynu (o způsobu doplňování plynu nebylo nalezeno dostatečné množství relevantních informací).

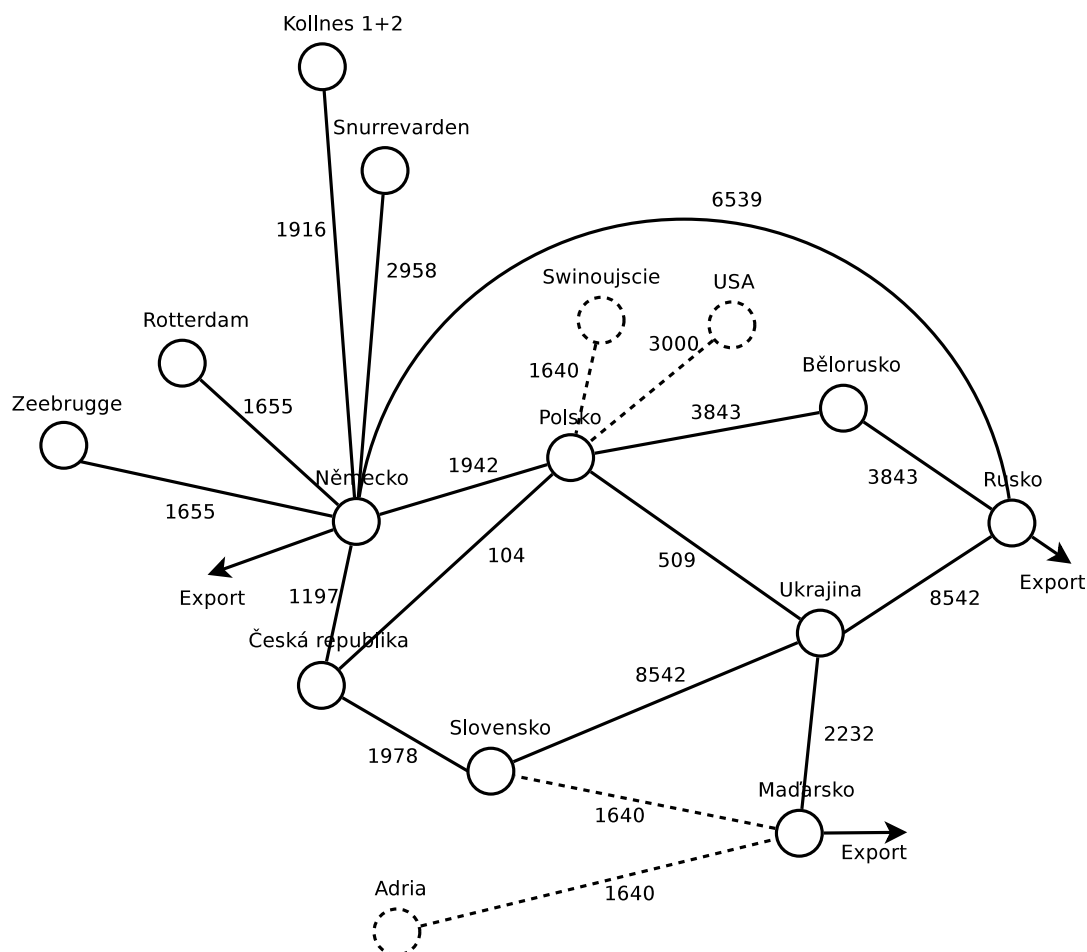
Posledním modelovaným prvkem systému jsou plynovody. Charakteristikou plynovodu je maximální množství plynu za hodinu, které je možné přes něj přenést (pouze v jednom daném směru). V případě, že se nějaký stát rozhodne poslat určité

množství plynu přes plynovod, do druhého státu množství plynu dorazí za dobu danou podílem délky plynovodu a rychlostí plynu. Délku u plynovodů ležících na pevnině uvažujeme jako vzdálenost mezi hlavními městy států, které plynovod spojuje. Opět z důvodu nedostatku relevantních informací, rychlost přenášeného plynu uvažujeme jako konstantu. Toto zjednodušení má za následek pouze větší prodlevu při doručení plynu.

3.1 Způsob vyjádření konceptuálního modelu

Pro účely vyjádření konceptuálního modelu je zvolena kombinace slovního popisu uvedeného výše a grafického popisu sítě plynovodů mezi jednotlivými uzly (obrázek 2). Částečný popis pomocí petriho sítě je sice možný, ale ne úplně smysluplný.

3.2 Forma konceptuálního modelu



Obrázek 2: Popis sítě plynovodů s uvažovanými státy a LNG terminály. Tečkované jsou uvedeny plánované plynovody a LNG terminály. Ohodnocení hran udává maximální přenosovou kapacitu plynovodu v m^3/h .

4 Architektura simulačního modelu/simulátoru

Jak již bylo zmíněno v podkapitole „Použité postupy“, byl pro implementaci zvolen jazyk C++. Ve velké míře je také využíváno datových struktur z knihovny STL. Pro implementaci jednoduchého kalendáře byla použita prioritní fronta právě z této knihovny. Do kalendáře jsou ukládány dodávky plynu od jednotlivých států. Po uběhnutí doby, po kterou dodávka plynu proudí přes plynovod je dodávka vyjmuta z fronty a doručena cílovému státu. Samotná simulace pak probíhá po celých hodinách (každou hodinu dojde ke spotřebování, produkci a poslání plynu každého státu).

4.1 Mapování konceptuálního modelu na simulační

V implementaci jsou využity následující třídy:

- State – reprezentuje stát s určitou produkcí, spotřebou a kapacitou zásobníku.
- GasPipeline – plynovod, kterým je možné přenést určitý objem plynu za hodinu.
- LngTerminal – třída reprezentující LNG terminál.

5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Cílem simulačních experimentů je zjistit množství plynu v jednotlivých státech za krizových podmínek. Jedním z dílčích cílů je také zjistit, do jaké míry jsou vybrané státy závislé na dodávkách plynu z Ruska a jaké úpravy by bylo třeba udělat, aby se nezávislost zvýšila.

5.1 Postup experimentování

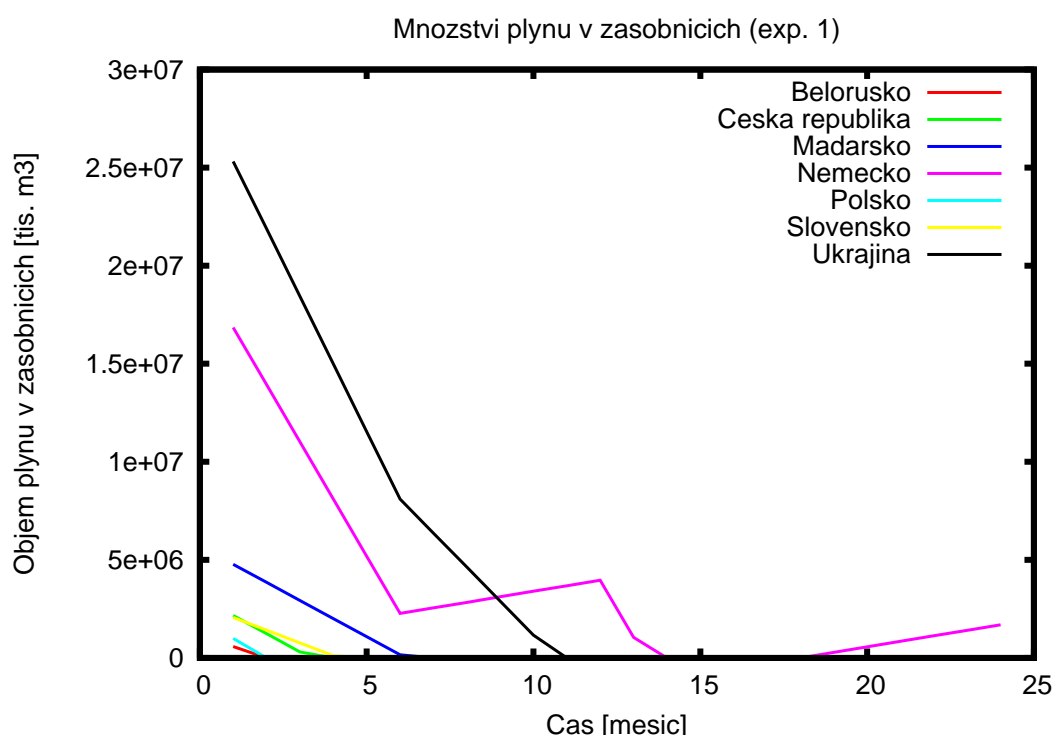
Experimentování probíhalo na časovém intervalu 2 let a kroky experimentování byly následující:

- Nastavení parametrů rozvodné sítě
 - Použití vybraných LNG terminálů
 - Nastavení kapacity plynovodů a jejich připojení k uzlům
- Spuštění simulace
- Analýza výsledků

5.2 Konkrétní experimenty

5.2.1 Experiment 1

Prvním experimentem je situace, kdy Rusko přestane dodávat plyn do ostatních zemí. Rusko tedy nebudeme vůbec v modelu uvažovat. V tomto experimentu budeme uvažovat rozvodnou síť s výchozími parametry, které byly uvedeny v předchozích kapitolách. LNG terminály uvažujeme pouze ty, které jsou aktuálně v provozu (Kollsnes, Snurrevarden, Zeebrugge, Rotterdam). Státy při exportu plynu používají „hladovou“ strategii. V tomto, ale i ve všech následujících experimentech budeme předpokládat počáteční naplnění zásobníků jednotlivých států na 90% své kapacity. Po skončení simulace byly získány výsledky, které jsou zobrazeny na obrázku 3.



Obrázek 3: Výsledek experimentu č. 1, kdy Rusko přestane dodávat plyn do okolních zemí.

Z grafu lze vyčíst, že do 12 měsíců budou všechny státy kromě Německa bez plynu v zásobnících. Avšak i množství plynu Německa má v čase jasně klesající tendenci a od 14. měsíce po vypuknutí krize bude již bez plynu.

5.2.2 Experiment 2

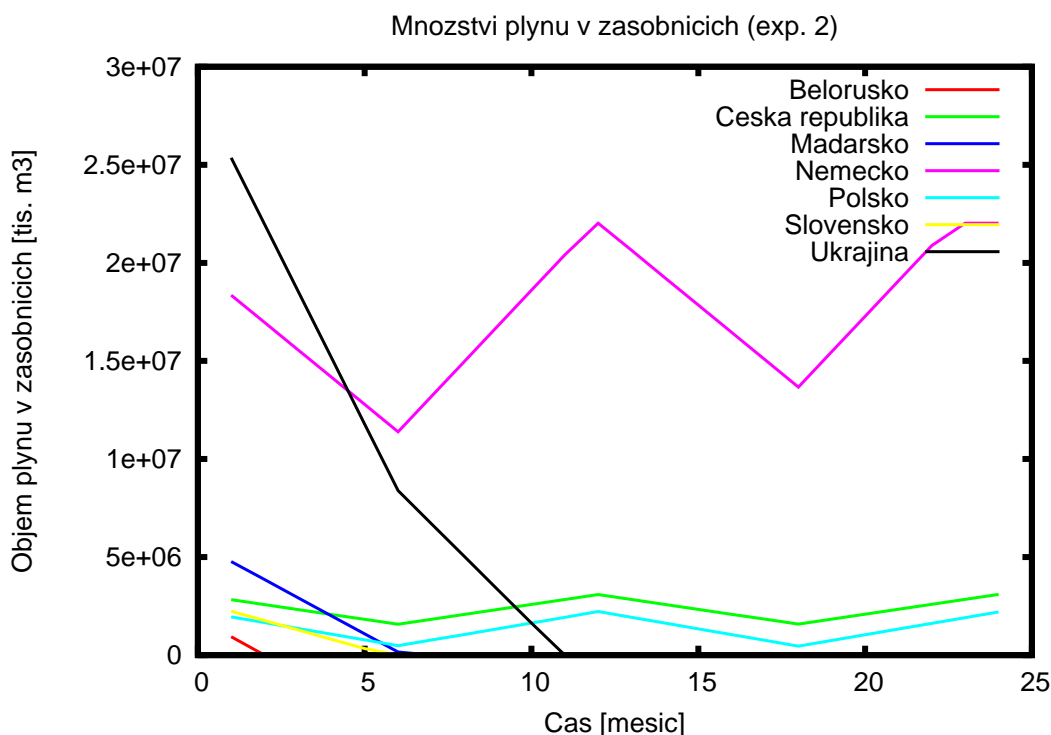
V tomto experimentu vyjdeme z modelu použitého v experimentu 1. Opět budeme uvažovat situaci, kdy Rusko přestane dodávat plyn okolním státům. Provedeme ale úpravu parametrů některých plynovodů, aby bylo možné využít celou kapacitu LNG terminálů. Provedeme také zvýšení kapacity LNG terminálů Zeebrugge a Rotterdam

na dvojnásobnou hodnotu. Změněné hodnoty kapacity plynovodů jsou uvedeny v tabulce 5.

Plynovod	Kapacita [tis. m ³ /h]
Kollsnes 1+2 – Německo	6000
Snurrevarden – Německo	3500
Zeebrugge – Německo	3162
Rotterdam – Německo	3162

Tabulka 5: Upravené kapacity plynovodů pro maximální využití LNG terminálů

Výsledek experimentu je uveden na obrázku 4.



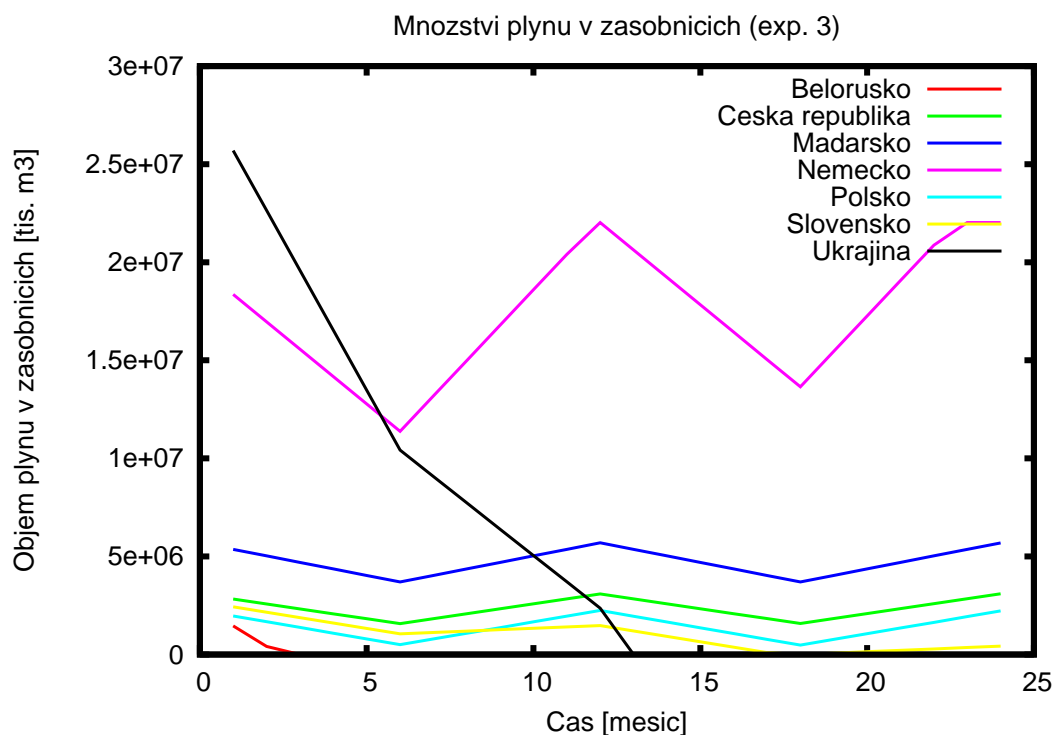
Obrázek 4: Výsledek experimentu č. 2, kdy dojde k posílení vybraných částí rozvodné sítě a zvýšení kapacity Nizozemského a Belgického LNG terminálu.

Z grafu lze zjistit, že Německo, Česká republika a Polsko má po celou dobu dostatečné množství plynu v zásobnících pro pokrytí vlastní potřeby. U těchto států není dokonce ani patrný výrazný úbytek plynu v čase. Situace se tedy od předchozího experimentu značně zlepšila. Nicméně stále Slovensko, Belorusko, Maďarsko a Ukrajina po určité době zůstanou bez plynu.

5.2.3 Experiment 3

Ve třetím experimentu vyjdeme z druhého provedeného experimentu. Uvažujeme stejnou situaci jako v předchozích experimentech, tedy, že Rusko přestane dodá-

vat plyn. Ponecháváme zvýšenou kapacitu Nizozemského a Belgického LNG terminálů a upravenou kapacitu některých plynovodů. Dále předpokládáme otevření LNG terminálů Swinoujscie a Adria a jejich připojení plynovody do rozvodné sítě. Po ukončení simulace byly získány výsledky, které jsou zobrazené na obrázku 5.

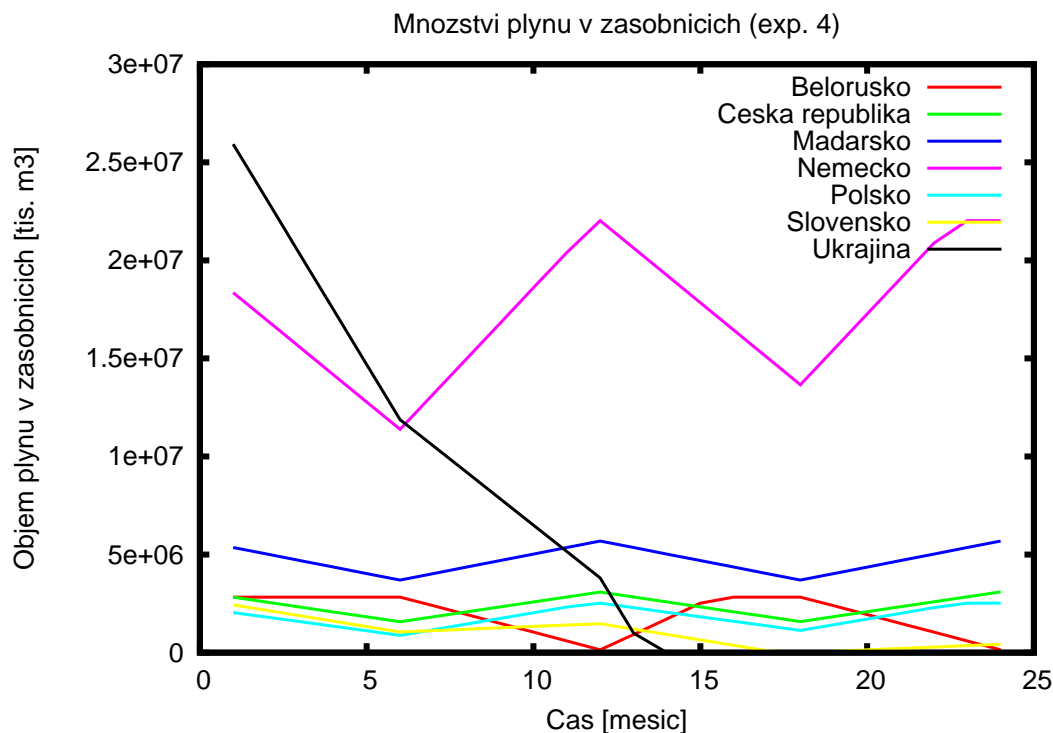


Obrázek 5: Výsledek experimentu č. 3, kdy dojde k otevření LNG terminálů Swinoujscie a Adria.

Z výsledků lze opět udělat několik závěrů. Oproti předchozímu experimentu Maďarsko díky otevření LNG terminálu Adria má dostatečné množství plynu pro pokrytí své spotřeby. Plynová situace Německa, České republiky a Polska zůstává prakticky stejná jako ve výsledku předchozího experimentu. Díky otevření terminálu Adria, má nyní i Slovensko po takřka celou dobu nenulové množství plynu v zásobnících. Drobná změna nastala u Běloruska, u které po dvou měsících dojde k úplnému vyčerpání obsahu zásobníků. Podobná situace nastává i pro Ukrajinu, která se bez plynu ocitne po 13 měsících od vypuknutí krize.

5.2.4 Experiment 4

V tomto experimentu opět vyjdeme z modelu představeného v experimentu 3. Uvažujeme ale hypotetickou situaci, kdy dojde k otevření LNG terminálu pro dovoz plynu z USA. Tento terminál je umístěn do Polska a uvažujeme, že plyn je do terminálu dodáván pouze v létě. Kapacita tohoto terminálu je $6500 \text{ m}^3/\text{h}$. Výsledek provedené simulace shrnuje obrázek 6.



Obrázek 6: Výsledek experimentu č. 4, kdy dojde k otevření plánovaného LNG terminálů pro příjem LNG z USA.

Z výsledku lze zjistit, že množství plynu v zásobnících u Německa, České republiky, Polska, Maďarska a Slovenska zůstává téměř stejná jako u výsledku předchozího experimentu. Podstatná změna však nastává u Běloruska. Během letních měsíců (kdy je dodáván plyn do terminálu USA) je v zásobnících Běloruska dostatečné množství plynu pro pokrytí potřeby. Avšak v zimě, kdy je spotřeba plynu vyšší než v létě a navíc do terminálu USA není dodáván plyn, dochází k postupnému úbytku plynu, až je nakonec úplně vyčerpán obsah zásobníků. V Ukrajině je však situace ještě horší, jelikož po 14 měsících od vypuknutí krize dojde k vyčerpání obsahu zásobníků.

5.3 Závěry experimentů

Celkem byly provedeny 4 experimenty ve výše zmíněných situacích. Experimenty byly zaměřeny na různé scénáře řešení plynové krize, kdy Rusko přestane dodávat plyn. Z provedených experimentů vyplývá, že plynová závislost na Rusku je značná.

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

V této simulační studii jsme se zabývali otázkou plynové krize v Evropě. Konkrétně se jednalo o situaci, kdy Rusko přestane dodávat plyn okolním státům. Z provedených experimentů vyplývá, že pro nezávislost na dodávkách plynu z Ruska je nutné

upravit stávající rozvodnou síť a postavit nové LNG terminály. Avšak i po těchto opatřeních některé státy bez dodávek ruského plynu nepokryjí úplně svoji potřebu (Bělorusko, Ukrajina, Slovensko).

Reference

- [1] FNB GAS. Facts and figures. 2014. [Online]. Dostupné na: <http://www.fnb-gas.de/en/transmission-systems/facts-and-figures/facts-and-figures.html>.
- [2] GAS INFRASTRUCTURE EUROPE, ENTSOG. Capacity map. 2013. [Online]. Dostupné na: http://www.entsog.eu/public/uploads/files/maps/transmissioncapacity/2014/ENTSOG_140612_CAP_JUNE2014.pdf.
- [3] GAS INFRASTRUCTURE EUROPE, ENTSOG. System development map. 2013. [Online]. Dostupné na: http://www.gie.eu/download/maps/ENTSOG-GIE_SYSDEV_MAP2013.pdf.
- [4] GATE TERMINAL. Gate terminal Rotterdam. 2014. [Online]. Dostupné na: <http://www.gate.nl/en/gate-terminal.html>.
- [5] HYDROCARBONS TECHNOLOGY. Zeebrugge LNG Terminal, Belgium. 2014. [Online]. Dostupné na: <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/zeebrugge-terminal/>.
- [6] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. NATURAL GAS INFORMATION 2014 edition. 2013. [Online]. Dostupné na: http://wds.iea.org/wds/pdf/Gas_documentation.pdf.
- [7] JASON BORDOFF, T. H. American Gas to the Rescue? 2014. [Online]. Dostupné na: http://energypolicy.columbia.edu/sites/default/files/energy/CG_EP_American%20Gas%20to%20the%20Rescue%3F.pdf.
- [8] PERINGER, P. Slidy k přednáškám předmětu Modelování a simulace (IMS). 2013. [Online]. Dostupné na: <https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>.
- [9] PROUZA, P. Česká republika a její připojení na nové LNG terminály – posílení plynové bezpečnosti. 2012. [Online]. Dostupné na: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/113848/>.
- [10] STATOIL. Kollsnes gas processing plant. 2013. [Online]. Dostupné na: <http://www.statoil.com/en/OurOperations/TerminalsRefining/ProcessComplexKollsnes/Pages/default.aspx>.