



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA PODNIKATELSKÁ

FACULTY OF BUSINESS AND MANAGEMENT

ÚSTAV MANAGEMENTU

INSTITUTE OF MANAGEMENT

EKONOMETRICKÉ MODELOVÁNÍ SPOTŘEBY ZEMNÍHO PLYNU V SEKTORU ELEKTROENERGETIKY V REGIONU STŘEDOZÁPADNÍ EVROPY

ECONOMETRIC MODELLING OF NATURAL GAS CONSUMPTION IN THE ELECTRICITY SECTOR IN THE
MIDWEST EUROPE REGION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kunc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Doubravský, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav managementu
Student:	Bc. Tomáš Kunc
Vedoucí práce:	Ing. Karel Doubravský, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	Strategický rozvoj podniku

Garant studijního programu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně zadává diplomovou práci s názvem:

Ekonometrické modelování spotřeby zemního plynu v sektoru elektroenergetiky v regionu středozápadní Evropy

Charakteristika problematiky úkolu:

Úvod do problematiky práce
Cíle práce, metody a postupy jejího zpracování
Teoretická východiska práce
Analytická část práce
Vlastní návrhy a řešení
Závěrečné shrnutí práce
Seznam použité literatury
Přílohy

Cíle, kterých má být dosaženo:

Cílem práce je vytvoření ekonometrického modelu spotřeby zemního plynu v rámci produkce elektrické energie.

Základní literární prameny:

EU Emissions Trading System (EU ETS). European Commission [online]. [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en.

HINDLS, Richard, Stanislava HRONOVÁ a Jan SEGER. Statistika pro ekonomy. 5. vyd. Praha: Professional Publishing, 2004. 415 s. ISBN 80-864-1959-2.

HOŠEK, Jan. Trh s uhlím a jeho budoucnost. Česká národní banka [online]. 8. 9. 2020 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/o_cnb/cnblog/Trh-s-uhlim-a-jeho-budoucnost/.

HOŠEK, Jan. Vývoj na evropském trhu se zemním plynem. Česká národní banka [online]. 19. 4. 2022 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/o_cnb/cnblog/Vyvoj-na-evropskem-trhu-se-zemnim-plynem/.

HUŠEK, Roman. Ekonometrická analýza. 1. vyd. Praha: Oeconomica, 2007. 367 s. ISBN:978-80-245-1300-3.

LEJNAROVÁ, Šárka, Adéla RÁČKOVÁ a Jan ZOUHAR. Základy ekonometrie v příkladech. 2. přeprac. vyd. Praha: Nakladatelství Oeconomica, 2009. 276 s. ISBN 978-80-245-1564-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně dne 5.2.2023

L. S.

doc. Ing. Vít Chlebovský, Ph.D.
garant

doc. Ing. Vojtěch Bartoš, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá ekonometrickým modelováním spotřeby zemního plynu v rámci elektroenergetiky za účelem produkce elektrické energie. První část práce je zaměřena na teoretická východiska, v níž je popsán elektroenergetický trh a ekonometrické modelování, zaměřené především na regresní analýzu. V analytické části jsou aplikovány poznatky na selekci a úpravu potenciálních faktorů. V rámci vlastních návrhů je sestaveno řešení regresního modelu, které popisuje spotřebu zemního plynu v rámci tvorby elektrické energie v závislosti na vybraných faktorech. Predikční schopnost modelu je ověřena na datech z testovacího období.

ABSTRACT

The thesis deals with econometric modeling of natural gas consumption within the electricity industry for the purpose of electricity production. The first part of the thesis focuses on theoretical foundations, describing the electricity market and econometric modeling, with a particular focus on regression analysis. In the analytical part, this knowledge is applied to the selection and adjustment of potential factors. As part of the proposed solution, a regression model is constructed that describes natural gas consumption in electricity production as a function of selected factors. The predictive ability of the model is verified using data from a testing period.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ekonometrické modelování, regresní model, korelační analýza, spotřeba elektrické energie, německý energetický trh, predikce, produkce elektráren

KEYWORDS

Econometric modeling, regression model, correlation analysis, electricity consumption, German energy market, prediction, power plant production

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Citace tištěné práce – listinná verze:

KUNC, Tomáš. *Ekonometrické modelování spotřeby zemního plynu v sektoru elektroenergetiky v regionu středozápadní Evropy*. Brno, 2023. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/151380>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, Ústav managementu. Vedoucí práce Ing. Karel Doubravský, Ph.D

Citace elektronického zdroje – elektronická verze:

KUNC, Tomáš. *Ekonometrické modelování spotřeby zemního plynu v sektoru elektroenergetiky v regionu středozápadní Evropy* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/151380>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, Ústav managementu. Vedoucí práce Ing. Karel Doubravský, Ph.D

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 15. května 2023

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Karlu Doubravskému, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce. Dále děkuji panu Eduardu Majlingovi za cennou pomoc a odborné rady při výběru dat a sestavování modelu.

OBSAH

ÚVOD	7
1 CÍLE PRÁCE, METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ	8
1.1 Cíle práce	8
1.2 Metody a postupy zpracování	8
2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA	10
2.1 Trh s elektrickou energií	10
2.1.1 Výroba elektrické energie	10
2.1.2 Účastníci a rozdělení trhu s elektrickou energií.....	12
2.2 Energetický trh	15
2.2.1 Vývoj trhu se zemním plynem	15
2.2.2 Trh s uhlím.....	17
2.2.3 Trh s emisními povolenkami	19
2.3 Německý trh	20
2.4 Ekonometrický model	22
2.5 Ekonometrické prognózování	32
3 ANALÝZA SOUČASNÉ SITUACE	37
3.1 Představení firmy	37
3.2 Popis proměnných regresního modelu	39
3.3 Korelační analýza a popisná statistika	54
4 VLASTNÍ NÁVRHY	58
4.1 Ekonometrický regresní model	58
4.2 Ověření prognostické schopnosti modelu	64
4.3 Vyhodnocení návrhové části práce	70
ZÁVĚR	74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	75

SEZNAM ROVNIC.....	78
SEZNAM TABULEK	79
SEZNAM GRAFŮ	80

ÚVOD

V posledních letech se výrazně mění evropská skladba elektráren, stejně jako se mění celkové energetické prostředí v Evropě. Diplomová práce je tvořena ve spolupráci se společností E.ON, pro kterou je pochopení vývoje a směřování evropského energetického trhu klíčové. Jedním ze způsobů výroby elektrické energie, která prochází velkými změnami, je výroba v plynových elektrárnách použitím zemního plynu jako paliva. V rámci diplomové práce je navrhnout model, který popisuje vliv vybraných faktorů na produkci elektrické energie plynových elektráren v prostředí německého energetického trhu. Tento model může představovat cenný nástroj sloužící k analýze velkoobchodních trhů zejména s ohledem na očekávanou spotřebu plynu v sektoru elektroenergetiky v budoucích letech.

Práce je rozdělena do několika částí. V první části je popsána metodika a samotné cíle diplomové práce. Po ní následuje druhá část, a to teoretická východiska práce, ve kterých je představeno prostředí evropského a německého energetického trhu, včetně jeho členění, historie a vazeb mezi různými způsoby produkce elektrické energie. Druhá polovina teoretických východisek práce je představení základních pojmů a východisek v rámci ekonometrického modelování, zejména regresních modelů. Po teoretických východiscích práce následuje analytická část, ve které jsou představeny potenciální faktory ovlivňující množství produkované elektrické energie v plynových elektrárnách. Spolu s určením potenciálních faktorů a shromážděním dat faktorům odpovídajícím za vytyčené období let 2017 až 2019 je sestaven vícenásobný lineární regresní model predikující množství produkované elektřiny s použitím zemního plynu jako paliva. Ve čtvrté části je diskuse výsledků a shrnutí získaných poznatků.

1 CÍLE PRÁCE, METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

1.1 Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je sestavení ekonometrického modelu, který popisuje vztah množství produkované elektrické energie v plynových elektrárnách a faktorů jeho ovlivňujících. Ekonometrický model bude sestaven na základě dat německého energetického trhu. Pro úspěšné splnění hlavního cíle je třeba definovat a dosáhnout dílčích cílů. Prvním dílčím cílem je vymezení základních pojmů ekonometrického modelování a energetického trhu v části teoretických východisek práce. Dalším cílem je výběr potenciálních faktorů mající vliv na zkoumaný jev a sestavení datové sady odpovídající daným faktorům. Následujícím dílčím cílem je sestavení řešení regresního modelu a ověření jeho schopnosti predikce aplikací na novou sadu dat pro testovací období. Poslední dílčí cíl je interpretace získaných poznatků a popis možných slabých a silných stránek vypracovaného řešení.

1.2 Metody a postupy zpracování

Práce používá kvantitativní výzkum, strategií práce je průzkum sekundárních dat. Technikou sběru dat je analýza archivních dat. Data pochází z několika zdrojů, všechny zdroje jsou veřejně dostupné. Historická cena zemního plynu pochází z EEX (European Energy Exchange), historická cena černého uhlí z ICE (Intercontinental Exchange). Z ICE pochází rovněž historická cena emisních povolenek, kurz EUR/USD pochází z Evropské centrální banky. Všechny historické hodnoty výroby a spotřeby elektřiny pochází z ENTSO-E Transparency Platform nebo německé Bundesnetzagentur.

Data byla zpracována, aby s nimi bylo možné efektivněji pracovat. Pro většinu faktorů byli ze zdrojových dat spočítány měsíční průměry, které následně sloužily k sestavení regresního modelu. Data, jejich podoba v rámci úprav a výsledky modelování jsou představeny pomocí grafů a tabulek. Analytická část také obsahuje popisnou statistiku, která slouží k lepšímu představení dat. Použitím korelační analýzy byla zkoumána korelace faktorů vystupujících v modelu jako proměnné. Regresní analýza nakonec zkoumá vztahy mezi vysvětlovanou proměnnou a proměnnými vysvětlujícími. Pro ověření správně funkce modelu byly provedeny testy autokorelace, testy

heteroskedasticity a další. Reálná použitelnost modelu byla ověřena na predikci vysvětlované proměnné na datech z jiného období. Ke konci práce je představeno možné použití modelu na smyšleném scénáři, kdy dosazením hodnot vysvětlujících proměnných model predikuje hodnotu vysvětlované proměnné.

2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

Teoretická východiska práce obsahují dvě hlavní části, první částí je popis trhu s elektrickou energií. Druhá část teoretických východisek práce přibližuje ekonometrické modelování, zejména regresní analýzu.

2.1 Trh s elektrickou energií

V části trhu s elektrickou energií je v první řadě představena technologie produkce elektrické energie a její členění. Poté následuje přiblížení účastníků trhu a jeho rozdělení.

2.1.1 Výroba elektrické energie

K výrobě elektrické energie se používají různé technologické postupy, které závisí na použitých zdrojích. Vždy se ale jedná o přeměnu primární energie na energii elektrickou. Primární energií lze rozumět všechny přirozeně se vyskytující formy energie v jejich původní nezměněné podobě, spadají sem obnovitelné zdroje energie jako například energie sluneční, větrná, vodní, geotermální, biomasa, ale i fosilní zdroje energie jako zemní plyn, uhlí a ropa. K využití primární energie je nezbytné její zpracování, po kterém vzniká energie sekundární. Sekundární energie, která je zpřístupněna koncovému uživateli, se nazývá energií užitečnou nebo konečnou. Při proměně energie, zejména v případě procesu přeměny primárních zdrojů na konečnou energii elektrickou je třeba počítat se ztrátami energie jak v procesu zpracování, tak i během převodu. (1)

V následujících odstavcích budou představeny druhy elektráren a způsob, jakým dochází k přeměně energie na energii elektrickou. V tepelné elektrárně dochází k ohřevu vody pomocí tepla, které je získáno spalováním. Z vody se uvolňuje vysokotlaká pára pohánějící turbínu, která je napojena na generátor elektrické energie. Tepelné elektrárny využívají různá paliva, může se jednat o černé uhlí, hnědé uhlí, zemní plyn, biomasu či bioplyn nebo ropné produkty. Pro spalování určitého druhu paliva musí být elektrárna přizpůsobena, proto jsou tepelné elektrárny dále členěny dle použitého zdroje energie na elektrárny uhelné, plynové, bioplynové či biomasu. Do tepelných elektráren lze zařadit i elektrárny jaderné, kde je zdrojem tepla jaderný reaktor. (2)

Největší podíl na světové produkci elektrické energie mají uhelné elektrárny, v nich bylo v roce 2021 vyprodukováno 36,5 % elektrické energie. Spalováním zemního plynu

vzniklo ve stejném roce 22,2 % světové elektřiny. Vodní elektrárny se podílely 15,3 % a jaderné 9,9 %. Díky větrným elektrárnám vzniklo 6,6 % a pomocí slunečních 3,7 %. Zdroje bioenergie byly použity k produkci 2,4 % elektrické energie. (3)

Uhelné elektrárny jsou v současnosti nejrozšířenějším druhem elektráren, v budoucnu se ale očekává snižování jejich použití. Jako palivo se využívá hnědé uhlí s výhřevností 10 MJ/kg až po uhlí černé s výhřevností 24 MJ/kg. Jejich velkou nevýhodou je poměrně velké množství emisí, které jsou uhelnou elektrárnou vypouštěny při produkci elektřiny. Hlavní důvody, proč se ale stále hojně využívají spočívají v tom, že jsou oproti obnovitelným zdrojům schopny dodávat elektřinu kdykoli je nutné, a navíc cena za jednotku generované elektřiny je nižší než třeba u paroplynových elektráren, které ale vypouštějí méně emisí do ovzduší. (4)

Druhým nejvyužívanějším typem elektrárny na světě jsou elektrárny na zemní plyn. Jejich výhodou je poměrně levná a rychlá výstavba s porovnáním s jadernými nebo uhelnými elektrárnami. Oproti obnovitelným zdrojům jsou podobně jako uhelné elektrárny schopny dodávat elektřinu vždy, když je potřeba. (2)

Jaderná elektrárna využívá štěpného procesu, při kterém probíhá přeměna vazebné energie jader obohaceného uranu na energii elektrickou. Štěpnou reakcí vzniká teplo, které slouží k výrobě vysokotlaké páry. Výhodou jaderných elektráren je výborný poměr množství dodaného paliva ku množství získané energie, snadná regulovatelnost množství vyrobené energie, neprodukování skleníkových plynů a relativně nízké provozní náklady. Jako nevýhodu lze vnímat dlouhou dobu výstavby, která může dosahovat i desítek let. Výstavba je navíc je finančně i technicky velmi nákladná. Zejména v řadách široké veřejnosti jsou jaderné elektrárny stále asociovány s katastrofami a mohou tak vzbuzovat strach v lidech žijících v bezprostředním okolí. Vysoké jsou i náklady na bezpečnost a ochranu provozu a potřebu skladování jaderného odpadu. (5)

Vodní elektrárny oproti tepelným nevyužívají teplo, ale kinetickou energii vodního proudu. Voda pohání turbínu přímo, která je napojena na generátor. Rozlišujeme 3 hlavní typy vodních elektráren. Průtokové se staví přímo na vodních tocích, jejich nevýhodou je závislost výkonu na aktuálním průtoku. Součástí hráze určité vodní stavby je pak akumulární vodní elektrárna. A v neposlední řadě rozlišujeme elektrárny přečerpávací, které mají zpravidla horní a spodní nádrž. V době, kdy je elektřiny nadbytek se

přečerpává voda ze spodní do horní nádrže, a v momentě kdy je elektřiny nedostatek ve spouští z horní nádrže do spodní, přičemž pohání turbínu. Velmi zjednodušeně lze přečerpávací elektrárnu chápat jako jakési skladiště či baterii elektrické energie. (2)

Větrné elektrárny využívají kinetickou sílu větru, který pohání rotor skrze lopatky. Výhodou větrných elektráren jsou nulové emise a nevyčerpatelný zdroj energie v podobě větru. Jako nevýhody lze jmenovat nerovnoměrný výkon, který je závislý na povětrnostních podmínkách, poměrně vysoké pořizovací náklady a krátká životnost turbín a v neposlední řadě narušení rázu krajiny a hlučnost v bezprostředním okolí. (6)

Sluneční elektrárny využívají sluneční záření, jeho přeměna na elektrickou energii je možná několika způsoby a rozlišujeme několik typů solárních elektráren, a to fotovoltaické, termoelektrické, sluneční tepelné a elektrárny na palivový článek. Obecně ale výhody slunečních elektráren spočívají v nízkých provozních nákladech, jednoduché správě a údržbě a čisté energii z obnovitelných zdrojů. Oproti tomu jsou závislé na slunečních podmínkách, mají vyšší cenu instalace a ve větším množství mohou ničit ráz krajiny. (2)

2.1.2 Účastníci a rozdělení trhu s elektrickou energií

Hlavní specifikum obchodování s elektřinou spočívá v její neskladovatelnosti. Ačkoli jsou vyvíjeny systémy k akumulaci elektrické energie, prakticky jsou stále jedinou možností k uchování většího množství elektrické energie přečerpávací elektrárny. Další specifikum je ve způsobu dopravy, elektrická energie se dostává sítí k uživateli cestou nejmenšího odporu a není možné nijak identifikovat energii vyrobenou určitým zdrojem, nebo jí poslat jen k určitému spotřebiteli. Klíčový prvek s elektroenergetické sítí je zachování rovnováhy energie dodané a energie odebírané plus ztráty. Nesplnění této rovnováhy vlivem přebytku výkonu pak vede k zvyšování frekvence sítě nebo v případě nedostatku výkonu ke snižování, což jsou oba stavy nežádoucí, a jejich podcenění může vést až k výpadku sítě. Aby neodcházelo k těmto stavům, jsou všechny národní elektroenergetické sítě podřízeny dispečinku, který pomocí regulačních energií zajišťuje rovnováhu v síti. (7)

Účastníci trhu

Účastníky trhu s elektřinou jsou výrobce, odběratel, obchodník, burza, provozovatel distribuční soustavy, provozovatel přenosové soustavy, operátor trhu s elektřinou a energetický regulační úřad. (7)

Výrobce elektrické energie potřebuje pro svoji činnost licenci. Pokud splňuje všechny podmínky, má právo na připojení k síti, přepravu vyrobené elektřiny a jejímu prodeji dalším subjektům. Odběratel je spotřebitelem elektrické energie ze sítě na základě smlouvy s obchodníkem a má právo na dodávku energie v odpovídající kvalitě. Obchodník s elektrickou energií také potřebuje licenci, aby mohl provozovat svou činnost. Může obchodovat na maloobchodním či velkoobchodním trhu a jeho cílem je maximalizace zisku. Má povinnost obchodní transakce ohlašovat operátorovi trhu. Burza je organizátorem obchodování s elektřinou a usnadňuje obchodování s elektřinou, dělá ho rychlejším a pohodlnějším. Operátor trhu s elektřinou opět patří mezi subjekty s licenci, má povinnost zajišťovat fungování trhu s elektřinou, což zahrnuje registraci účastníků trhu a zpracovávání všech obchodních transakcí. Zároveň na základě měření vyhodnocuje a provádí zúčtování odchylek. Provozovatel distribuční soustavy také potřebuje licenci ke své činnosti, stará se o distribuci elektrické energie ke konečným zákazníkům a řídí její kvalitu tak, aby odpovídala zákonům. Provozovatel přenosové soustavy spravuje přenosovou soustavu, což představuje vedení při napětích 400 kV, 220 kV a vybrané vedení 110 kV, pro svoji činnost potřebuje licenci. Energetický regulační úřad vydává licence všem zmíněným subjektům a stanovuje tarify pro regulovanou část elektřiny, která nepodléhá hospodářské soutěži, protože například přenos a distribuce jsou přirozenými monopoly. (7)

Rozdělení trhu

Subjekt obchodující na trhu s elektrickou energií musí být odpovědný za odchylku, kterou způsobí v síti a následně zaplatit za regulační energii, která musí být vynaložena, aby došlo k zachování rovnováhy. Tato odpovědnost ale může být přenesená, například odpovědnost spotřebitele typu domácnost má obchodník, se kterým má domácnost uzavřenou smlouvu. Dělit trh lze na maloobchod a velkoobchod, na velkoobchodním trhu mají všichni účastníci odpovědnost na odchylku svoji vlastní, zatímco na maloobchodním je tato odpovědnost přenesena. (7)

Další dělení trhu může být dle organizovanosti, na neorganizovaném trhu se uzavírají bilaterální dohody, jedná se typicky o dohodu dvou stran, které se dohodnou samostatně na průběhu obchodu a nejsou omezovány pravidly, ale musí být k určitému termínu předem nahlášeny operátorovi trhu. Nevýhodou takového způsobu obchodu spočívá v hledání protistrany, u které musí dojít k naprosté shodě ve všech podmínkách obchodu, což nemusí být vůbec snadné. Výhodou ale je možnost uskutečnění velmi specifických obchodů, které by třeba na burze nemohly proběhnout. V rámci organizovaného trhu mají účastníci jednu centrální protistranu, kterou může být například burza. Burza spravuje trh, nastavuje pravidlový rámec a zajišťuje finanční stránku vypořádání obchodů. Hledání obchodních transakcí může být formou aukce anebo průběžně, kdy se do určité uzávěrky podávají nabídky a poptávky a následně dojde k vyhodnocení obchodu jako průsečíku nabídky a poptávky. Obchody mohou probíhat i průběžně, kdy se poptávky a nabídky okamžitě párují, pokud samozřejmě existuje vhodná protistrana, v opačném případě poptávka čeká určitou dobu, než dojde k nalezení odpovídající protistrany. (7)

Trh lze rozdělit podle časového horizontu, v kterém se obchoduje. Na dlouhodobém trhu je obchodováno v rámci delších a vzdálenějších časových horizontů. Funkce tohoto trhu spočívá spíše ve finančním zajištění ceny elektrické energie do budoucna. V případě dlouhodobého trhu se spíše ani nejedná o fyzickou dodávku elektřiny, ale o obchodování kontraktů, které mohou mít podobu futures, forwards, OPCE nebo CfD (Contracts for Difference). (7)

V rámci krátkodobého trhu se obchoduje s dodávkou elektrické energie v řádu dní či hodin předem. Krátkodobý trh lze dělit na trh blokový, kde se obchodují produkty Base, Peak nebo Off-peak. Označení odpovídá denní dobu, pro kterou je dodávka uzavírána. Dodávka Base se týká celého dne, Peak neboli špička označuje dobu mezi 8 a 20 hodinou. Mimo špičku neboli Off-peak představuje zbývající dobu, a to od 20 do 8 hodiny. Denní trh představuje prostor pro obchodování s dodávkou elektřiny na den dopředu. Obchod zde probíhá formou 24 aukcí denně, na každou hodinu jedna. Výsledkem je vždy zobchodované množství energie a výsledná cena. Vnitrodenní trh umožňuje obchod v daný den na dodávku alespoň hodinu předem. Je to dobrá příležitost pro účastníky, kteří trpí neplánovaným nedostatkem nebo přebytkem energie. Vyrovňovací trh má centrální poptávku a nabídku, která je řízena provozovatelem přenosové soustavy a uzavírá se

zpravidla 30 minut před začátkem dodávky, provozovatel přenosové soustavy zde má možnost nakoupit regulační energii. (7)

Pro přeshraniční obchody je nutné počítat i s přeshraniční kapacitou, jelikož infrastruktura většiny národních elektroenergetických soustav je uvnitř daného území sice dostatečná, ale propojení s okolními zeměmi často nestačí. Proto se zároveň s obchody s jinými státy musí nakoupit i samotná možnost dodávku do těchto států přenést. V rámci Evropy existují oblasti, kde je nadnárodní systém organizování a hledání protistrany, který bere ohled na omezující stav přeshraniční sítě. Obchodník je tak osvobozen od povinnosti kupovat přeshraniční kapacita, jelikož samotný systém mu obchod nepovolí, pokud není dostatečná přeshraniční kapacita k dispozici. EU má za cíl vytvořit jednotný denní trh po celé Evropě. (7)

2.2 Energetický trh

V části energetického trhu bude představen trh se zemním plynem, uhlím a evropský trh s emisními povolenkami.

2.2.1 Vývoj trhu se zemním plynem

Světová spotřeba zemního plynu roste nejrychleji ze všech fosilních paliv a silný růst se předpokládá i do budoucna. Nárůstu poptávky po zemním plynem silně přispívá industrializace rozvíjejících se ekonomik v asijských zemích, na Blízkém východě a Latinské Americe. Díky rostoucí produkci a přepravě zkapalněného zemního plynu LNG je tento zdroj i dostupný v zemích, které jsou daleko od přirozených nalezišť. Podle International Energy Agency byl zemní plyn v roce 2020 použit k produkci 6300 TWh elektrické energie, což představuje asi čtvrtinu světové produkce v daném roce. Plynové elektrárny často nahrazují ty uhelné, zejména díky nižším emisím a flexibilitě, která jim umožňuje bleskové uvedení do plného provozu anebo do klidu v případě potřeby, plynové elektrárny jsou tak skvělým nástrojem k vyrovnání nejen sezónních výkyvů, ale i krátkodobých výkyvů v produkci například solárních a větrných elektráren, které jsou ve své produkci poměrně nepředvídatelné, ale jejich využití přesto každým rokem roste. Plynové elektrárny tak tvoří nezbytný přechodový článek minimálně do doby, kdy bude vyřešena otázka praktického skladování elektřiny z obnovitelných zdrojů. (8)

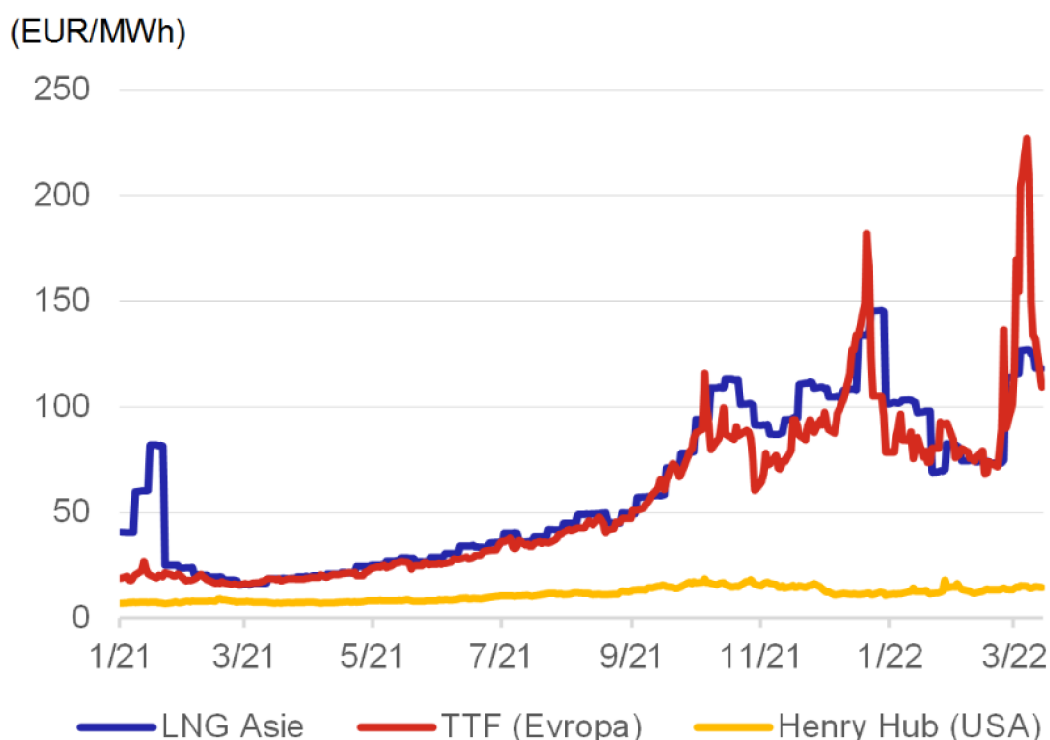
Spotřeba zemního plynu se bude i v Evropě nadále zvyšovat, na začátku posledního desetiletí sice klesla spotřeba plynu v Evropě kvůli rychlému růstu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, avšak od roku 2015 se tento trend obrátil, kdy plynové elektrárny nahrazovaly uzavírané uhelné a jaderné elektrárny. Díky dočasnému zařazení zemního plynu mezi čisté zdroje energie bude spotřeba zemního plynu růst i ve vyspělých zemích v střednědobém horizontu. (8)

Závislost Evropy na dovozu zemního plynu se však stále více zvětšovala kvůli poklesu v domácí těžbě, mezi lety 2010 a 2020 došlo k poklesu těžby zhruba na polovinu. V roce 2020 byl největším dodavatelem zemního plynu Rusko, využívající plynovody Nordstream a Turkstream. Velká část spotřeby je byla uspokojována dovozem zkapalněného plynu, v roce 2021 se na dovozu LNG nejvíce podílel USA s 26 %, Katar se 24 % a nakonec Rusko s 20 %. (8)

Situace se drasticky změnila v roce 2022 ruskou invazí na Ukrajinu, plán Evropské komise s názvem REPowerEU oznámený v květnu 2022 je odpovědí na narušení energetického trhu způsobeného invazí, které má za cíl radikálně snížit závislost na ruských fosilních palivech do roku 2027. Přepokládá se nárůst dovozu LNG z neruských zdrojů. (9)

Díky světové produkci LNG, která stále roste, je globální trh s plynem stále více propojený. Ačkoli mechanismy, na základě, kterých je zemní plyn obchodován, se v regionech liší, můžeme pozorovat, že ceny v jednotlivých regionech nejsou nezávislé a postupně se sbližují. Stále rostoucí propojenost trhů s plynem, které dříve byly izolované, znamená, že šoky v poptávce nebo nabídce v jednom regionu ovlivňují i jiné vzdálené oblasti, nejen ceny plynu samotného, ale i ceny souvisejících komodit jako elektřina, hnojiva a chemikálie. I když dochází k částečné konvergenci cen, zemní plyn v jednotlivých regionech stále zůstává dlouhodobě odlišný. V Evropě existuje silný tlak na přechod od dlouhodobých kontraktů závislých na cenách ropy ke kontraktům s kratším horizontem, které se uzavírají na tržních principech. To by mělo snížit cenotvornou sílu monopolních dodavatelů a zvýšit transparentnost obchodování. V Evropě i ve světě se vytvářejí fyzické nebo virtuální tržní uzly, které jsou přístupné jak dodavatelům a odběratelům fyzického plynu, tak i firmám, které hledají zajištění proti výkyvům cen, a investorům, kteří spekulují o budoucích cenách. (8)

V minulém desetiletí byl na světovém trhu s plynem výrazný přebytek nabídky kvůli rostoucí produkci zkapalněného zemního plynu (LNG), ale situace se dramaticky změnila v roce 2021. Ještě o rok předtím skutečně rychlý růst produkce LNG vedly k poklesu cen zemního plynu, ale světový trh byl neočekávaně ovlivněn pandemií koronaviru. Ta snížila poptávku v roce 2020, ale s oživením ekonomiky v roce 2021 se situace změnila. S celosvětovým nárůstem poptávky po primárních energetických komoditách došlo k růstu cen zemního plynu, což bylo nejvýraznější. V prosinci 2021 dosáhly ceny zemního plynu v Evropě a Asii historického maxima, které byly překonány až v důsledku války na Ukrajině, vývoj cen plynu můžeme vidět v grafu 1. (8)



Graf 1: Vývoj tržních cen zemního plynu od roku 2021 (zdroj: (9))

2.2.2 Trh s uhlím

Zásoby uhlí jsou na naší planetě mnohem rovnoměrněji rozdělené než ostatní fosilní paliva, jako ropa a zemní plyn. Díky tomuto rozložení je riziko narušení dodávek výrazně nižší než u ostatních fosilních paliv. Vytěžitelné zásoby uhlí tvoří zhruba ze 70 % černé uhlí + antracit a zbylých 30 % tvoří zásoby uhlí hnědé. Největší zásoby hlavně černého uhlí a antracitu se nacházejí v USA, dalšími významnými zeměmi se zásobami jsou Rusko, Austrálie, Čína a Indie. V rámci Evropy se zásoby černého uhlí nacházejí na

Ukrajíně a v Polsku, zásoby hnědého uhlí zase v Německu. S přihlédnutím k současné těžbě a spotřebě by světové zásoby uhlí měly vystačit na více než 130 let, což je o poznání více než je tomu u zásob ropy a zemního plynu, které by při současné spotřebě vystačily 50 let. (10)

Co se týče ceny uhlí, ta je určována několika faktory. Je to na jedné straně poptávka z rozvíjejících se zemí, kde vlivem industrializace a urbanizace silně roste spotřeba elektřiny, oceli a cementu. Na druhou stranu stále více zemí se snaží nahrazovat uhlí čistějšími zdroji energie, především zemním plynem. Velkým vlivem jsou i limity na emise oxidu uhličitého, kterými se vlády rozvinutých zemí snaží zpomalit globální oteplování planety. Limitování emisí prodražuje používání uhlí a snižuje poptávku po něm. Do ceny uhlí zasahují i náklady na dopravu, která je zase závislá na ceně motorové nafty a vzdálenosti přepravy. V průměru až 25 % ceny uhlí je dáno náklady na dopravu. Při velmi dlouhých trasách ale může dojít k situaci, kdy samotné dopravní náklady překročí cenu samotné suroviny ihned po vytěžení. (10)

Uhlí je poměrně heterogenní surovina a těžko se rozděluje na jednotlivé druhy, zpravidla ale lze říci, že čím větší podíl uhlíku a menší podíl vody či prchavých látek, tím kvalitnější uhlí je. Dle World Coal Association se rozlišují následující druhy uhlí na uhlí hnědé, černé a antracit. Hnědé uhlí lze dělit na lignit, což je nejmladší a nejméně kvalitní uhlí. Má malou výhřevnost, špatně se skladuje a zpravidla se nevyplácí ho transportovat na větší vzdálenosti. Spotřebovává se většinou v elektrárnách nebo teplárnách v blízkosti místa těžby. Další druh hnědého uhlí je sub-bitumenové, které se přepravuje a skladuje o něco lépe než lignit, spaluje se v elektrárnách, ale jeho využití je i ve výrobě cementu a obecně v průmyslu. (10)

Černé uhlí tvoří asi 52 % světových zásob uhlí, je to nejvíce mezinárodně obchodované uhlí a podle kvality ho lze dělit na energetické uhlí a koksovatelné uhlí. Energetické je hlavním zdrojem energie v elektrárnách, používá se ale i při výrobě cementu, papíru a v chemickém průmyslu. Uhlí koksovatelné se také používá jako zdroj energie, zároveň se používá při tavení železné rudy. Slouží i k výrobě koksu, který má klíčové uplatnění v ocelářském průmyslu. Antracit tvoří asi jen 1 % světových zásob uhlí, ten méně kvalitní má uplatnění v elektrárnách, kvalitnější druhy antracitu se používají v ocelářském průmyslu jako náhrada koksu (10)

V Evropě v dubnu 2020 činila výroba elektřiny z uhlí pouhých 12 % celkové produkce elektřiny, což je propad o téměř 30 % z minulého roku. Bylo to způsobeno sníženou poptávkou po elektřině kvůli epidemii koronaviru a rekordně nízkých cen plynu, nicméně určitou roli hráli i dlouhodobější trendy, jako je rostoucí kapacita obnovitelných zdrojů energie a snaha evropských zemí o snížení podílu uhlí při výrobě elektřiny. (10)

Za posledních 20 let došlo i přes velkou heterogenitu uhlí k velkému rozvoji elektronického obchodování s termínovanými kontrakty a finančními deriváty. Pro potřeby platformy globalCOAL (GC), která se zabývá oceňováním a globálními obchody s uhlím byly vyvinuty cenové obchodovatelné API indexy, které standardizují vlastnosti obchodovaného uhlí a které jsou odvozené od spotových cen na terminálech, ať už dovozních nebo vývozních. Vznik API indexů výrazně přispěl k vyšší transparentnosti cenotvorby na trhu s uhlím. (10)

Uhlí bylo v 20. století klíčovou surovinou pro ekonomický rozvoj, v současnosti je však spíše nepreferovaným zdrojem elektrické energie a tepla. Vlivem spalování uhlí dochází k úniku velkého množství nežádoucích látek, jako je oxid uhličitý, oxid siřičitý, prach, popel, oxidy dusíku, které velkou mírou přispívají ke globálnímu oteplování a znečištění životního prostředí obecně. Proto se většina vyspělých zemí zavázala upustit od užívání uhlí v energetickém průmyslu, hodně těchto zemí už do roku 2030. Některé rozvojové země plánují ukončení produkce elektřiny z uhlí do konce roku 2050. V té době už by mělo být uhlí ideálně nahrazeno obnovitelnými zdroji energie. K snížení spotřeby uhlí v Evropě pomáhá rychle rostoucí cena emisních povolenek CO₂. Nejvyšší motivací ke snížení spotřeby uhlí jsou typicky země, které jsou dovozci této suroviny, přičemž vlastní těžba je u nich zanedbatelná. Na druhou stranu historicky hornické země jako jsou v Evropě Německo či Polsko, a ve světě USA či Čína, jsou s omezováním spotřeby uhlí o poznání zdrženlivější. Nicméně v některých metropolích Číny a Indie je znečištění vzduchu natolik škodlivé, že dochází k hromadnému ohrožení zdraví celé populace a tamní vlády jsou v podstatě nuceny zavádět útlum těžby uhlí a zavádět nové zejména obnovitelné zdroje. (10)

2.2.3 Trh s emisními povolenkami

EU ETS (European Emission Trading System) byl založen v roce 2005 a jedná se o první mezinárodní systém obchodování s emisemi na světě. Nyní se nachází ve své čtvrté fázi,

která trvá od roku 2021 do roku 2030. V roce 2021 Evropská komise přijala návrhy k dosažení klimatické neutrality v EU do roku 2050, včetně mezního cíle alespoň 55% snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030. (11)

Evropský systém pro obchodování s emisemi (EU ETS) je nástrojem politiky EU majícím za cíl snížit emise skleníkových plynů. EU ETS funguje na principu cap & trade, kdy je stanoven limit na celkový počet vydaných emisních povolenek, které jsou následně obchodovány na trhu. Množství vydaných povolenek se každoročně snižuje, čímž zpravidla roste jejich cena a firmy jsou tak motivovány k snížení emisí skleníkových plynů, zejména CO₂. V letech 2013–2020 se počet vydaných povolenek snížil o 1,74 % ročně, v další fázi od roku 2021 dochází ke snížení o 2,2 % ročně. (11)

EU ETS byl spuštěn v roce 2005, jeho průběh je rozdělován do několika fází. V první fázi byla úspěšně nastavena cena za povolenku oxidu uhličitého, vytvořen trh emisních povolenek a infrastruktura potřebná k monitorování a ověřování emisí. Téměř všechny emisní povolenky byly přiděleny bezplatně. (11)

Během druhé fáze došlo k rozšíření systému, zvýšení pokut na 100 EUR za tunu, zapojení oxidu dusného, snížení celkového množství emisních povolenek asi o 6,5 % oproti první fázi. Nicméně ekonomická krize roku 2008 vedla k nižším emisím, které se projeví nadbytkem emisních povolenek, což se projevilo ve snížení jejich ceny v průběhu druhé fáze. (11)

V třetí fázi dochází k zavedení jednoho limitu emisí pro celou EU namísto samostatných limitů pro jednotlivé státy. Hlavním metodou rozdělování povolenek je aukce, nikoliv přidělení zdarma. Čtvrtá fáze klade za cíl posílit tržní rovnováhu s rezervami (market stability reserve), lépe nastavit pravidla tak, aby bránila tzv. Carbon leakage, což je situace, kdy firmy přenášejí svoji produkci do regionů, které podléhají mírnější nebo žádné regulaci. (11)

2.3 Německý trh

Německo je ve středu propojeného evropského elektroenergetického systému. Díky své geografické poloze v Evropě je klíčovým hráčem na evropském energetickém trhu a uzlem, kterým proudí významné energetické toky. Německo je zároveň velkým vývozcem elektrické energie do sousedících zemí, konkrétně se jedná o Dánsko,

Nizozemsko, Lucembursko, Francii, Švýcarsko, Rakousko, Českou republiku, Polsko a Švédsko (skrže podmořským kabelovým spojením). Německo v roce 2018 svým sousedům exportovalo 82,7 TWh elektrické energie a importovalo 31,5 TWh. Německo má největší instalovanou kapacitu a je zároveň největším konzumentem a výrobcem elektrické energie v Evropě. Stále větší množství elektřiny je produkováno z obnovitelných zdrojů, v roce 2018 přibližně 226 TWh pochází z obnovitelných zdrojů, což představovalo v daném roce přibližně 37,8 % spotřeby. V druhé polovině minulé dekády se snižoval zejména podíl hnědého, černého uhlí a jaderné energie. Podrobnější podíl jednotlivých zdrojů energie v Německu v letech 2014 až 2018 lze vidět v tabulce 1 a procentuální rozložení v tabulce 2. (12)

Tabulka 1: zdroje produkce elektrické energie v Německu (zdroj: vlastní zpracování dle (12))

rok		2014	2015	2016	2017	2018
jednotka		TWh	TWh	TWh	TWh	TWh
celková produkce elektřiny		627,8	648,1	650,7	653,6	646,8
lignit		155,8	154,5	149,5	148,4	145,5
jaderná energie		97,1	91,8	84,6	76,3	76,0
černé uhlí		118,6	117,7	112,2	92,9	83,2
zemní plyn		61,1	62,0	81,3	86,7	83,4
ropa		5,7	6,2	5,8	5,6	5,2
obnovitelné zdroje		162,5	188,6	189,9	216,2	226,4
	<i>vnitrozemní</i>	<i>57,0</i>	<i>72,2</i>	<i>67,9</i>	<i>87,9</i>	<i>92,2</i>
	<i>větrné</i>					
	<i>mořské</i>	<i>1,5</i>	<i>8,3</i>	<i>12,3</i>	<i>17,7</i>	<i>19,3</i>
	<i>větrné</i>					
	<i>vodní</i>	<i>19,6</i>	<i>19,0</i>	<i>20,5</i>	<i>20,2</i>	<i>16,6</i>
	<i>biomasa</i>	<i>42,2</i>	<i>44,6</i>	<i>45,0</i>	<i>45,0</i>	<i>45,7</i>
	<i>fotovoltaické</i>	<i>36,1</i>	<i>38,7</i>	<i>38,1</i>	<i>39,4</i>	<i>46,2</i>
ostatní		27,0	27,3	27,3	27,5	27,0
saldo přenosu s ostatními zeměmi		-35,6	-51,8	-53,7	-55,0	-51,2
celková spotřeba elektřiny		592,2	596,3	597,0	698,7	595,6

Z obnovitelných zdrojů jsou zdaleka největším producentem vnitrozemní větrné elektrárny, které v roce 2018 pokrývaly už přes 14 % celkové produkce. Další významné obnovitelné způsoby produkce energie jsou elektrárny na biomasu, ty zajišťují konstantní příjem asi 7 % celkové produkce a fotovoltaické, které z necelých 6 % v roce 2014 vzrostly a překročili hodnotu 7 % v roce 2018. Mořské větrné elektrárny během 4 let

několikanásobně zvýšili svou produkci, ale jejich vnitrozemní protějšek je stále mnohem významnější způsob produkce z větrné energie. Vodní elektrárny si udržují stabilní množství produkce kolem 20 TWh ročně, což představuje asi 3 % celkové produkce.

Tabulka 2: procentuální podíl zdrojů v Německu (zdroj: vlastní zpracování dle (12))

rok		2014	2015	2016	2017	2018
jednotka		%	%	%	%	%
celková produkce elektřiny		100	100	100	100	100
lignit		24.8	23.8	23.0	22.7	22.5
jaderná energie		15.5	14.2	13.0	11.7	11.8
černé uhlí		18.9	18.2	17.2	14.2	12.9
zemní plyn		9.7	9.6	12.5	13.3	12.9
ropa		0.9	1.0	0.9	0.9	0.8
obnovitelné zdroje		25.9	29.1	29.2	33.1	35.0
	<i>vnitrozemní větrné</i>	<i>9.1</i>	<i>11.1</i>	<i>10.4</i>	<i>13.4</i>	<i>14.3</i>
	<i>mořské větrné</i>	<i>0.2</i>	<i>1,3</i>	<i>1.9</i>	<i>2.7</i>	<i>3.0</i>
	<i>vodní</i>	<i>3.1</i>	<i>2.9</i>	<i>3.2</i>	<i>3.1</i>	<i>2.6</i>
	<i>biomasa</i>	<i>6.7</i>	<i>6.9</i>	<i>6.9</i>	<i>6.9</i>	<i>7.1</i>
	<i>fotovoltaické</i>	<i>5.8</i>	<i>6.0</i>	<i>5.9</i>	<i>6.0</i>	<i>7.1</i>
ostatní		4.3	4.1	4.2	4.1	4.1

Fosilní paliva obecně jsou stále méně využívaným způsobem produkce elektrické energie, největší podíl na tom má propad černého uhlí z bezmála 19 % celkové produkce v roce 2014 na necelých 13 % o 4 roky později. Nicméně význam zemního plynu jako paliva stoupá a v roce 2018 se dostal na úroveň černého uhlí, a to na necelých 13 % celkové produkce. (12)

2.4 Ekonometrický model

Ekonometrii lze popsat jako ekonomickou disciplínu, která se zabývá měřením ekonomických vztahů a závislostí. Vznik ekonometrie jako samostatného vědního oboru sahá do 30. let minulého století, kdy v USA byla založena Econometric Society. Ekonometrická analýza spojuje ekonomickou teorii, matematiku, statistiku a také informatiku za účelem vyhledávání, měření či testování ekonomických a jiných

společenských jevů. Předmět zkoumání ekonometrie zahrnuje tři hlavní oblasti. První oblastí je matematická a statistická formulace ekonomické teorie pomocí modelového přístupu. Další oblastí je rozvoj ekonometrické teorie spočívající v navrhování odhadových a testovacích metod a jiných výpočetních technik, které jsou vhodné pro ekonometrické modely a empirická data. Třetí oblastí je aplikace ekonometrických modelů a metod v oblastech ekonomické teorie a praxe. (13, s. 11–12)

Praktické ekonometrické úlohy zahrnují více či méně faktor nejistoty, která je obvykle explicitně obsažena v ekonometrické analýze ve formě náhodných složek neboli chyb. Na rozdíl od ekonomické teorie a matematické ekonomie, které předpokládají přesnou platnost vztahů mezi ekonomickými veličinami, ekonometrie respektuje pravděpodobnostní charakter vztahů. Tím zároveň reaguje na fakt, že chování jednotlivých ekonomických subjektů nelze přesně předpovědět a platnost jednotlivých ekonomických relací a závislostí je pouze přibližná. (13, s. 11–12)

Ekonometrický model, správně specifikovaný z hlediska zahrnutých proměnných, matematického či analytického tvaru zkoumané závislosti a stochastických předpokladů o rozdělení pravděpodobnosti náhodných složek, umožňuje kvantifikovat vhodně zvolenými statistickými a ekonometrickými metodami, jsou-li k dispozici adekvátní statistická data, intenzitu a směr vzájemného působení ekonomických proměnných, měřené parametry modelu. (13, s. 11–12)

Odhadnutý ekonometrický model umožňuje nejen kvalitativní, ale i kvantitativní analýzu zkoumaného problému nebo systému, jakož i chování ekonomických subjektů. Ekonometrická analýza dává empirický obsah teoretickým ekonomickým postulátům, vztahům a závislostem. Umožňuje tak svým způsobem verifikaci adekvátnosti ekonomické teorie, která byla použita, přičemž verifikovaná kvantitativní informace vztahující se ke zkoumanému ekonomickému jevu je reálným východiskem pro ekonomické analýzy, prognózování a rozhodování i při volbě hospodářské strategie. (13, s. 11–12)

Metodologie ekonometrické analýzy je založena na vícestupňové abstrakci, jejím cílem je nejprve specifikace ekonomického modelu neboli formulace základní hypotézy. Po matematické specifikaci a transformaci ekonomického modelu se lze bavit o základní hypotéze s maximálním, avšak stále únosným zjednodušením, výsledkem je

ekonomickomatematický model. Po následné vhodné statistické specifikaci stochastických vlivů, je získán ekonometrický model. (13, s. 11–12)

Specifikace ekonometrického modelu

Konkrétní formulace a specifikace modelu záleží do značné míry na schopnostech ekonometra spojit teoretické poznatky s informacemi o problému nebo systému, který je předmětem kvantitativní analýzy. Během této fáze modelování musí být pozornost věnována tomu, jestli disponibilní statistická data odpovídají proměnným, které byli zahrnuti do modelu v souladu s teoretickými předpoklady. Relativně jednoduše specifikovaný model je lepší než model sofistikovaný, ke kterému ovšem nejsou k dispozici adekvátní data, jež by odpovídali na otázky zkoumané problematiky. (13, s. 14–16)

Model může být specifikovaný v několika krocích. Prvním krokem je určení a klasifikace všech proměnných, které byli zahrnuti do modelu v souladu s apriorní i výběrovou informací jež byla získána z ekonomické teorie a dat. Proměnné se dělí na exogenní a endogenní, první jmenované nejsou samy ovlivňovány zkoumaným systémem, jejich hodnoty jsou determinovány mimo tento systém. Oproti nim proměnné endogenní mají hodnoty určené daným systémem nebo modelem. V jednorovnicových modelech mají endogenní proměnné roli vysvětlovaných proměnných, ve víceroovnicových modelech ale mohou vystupovat ve dvojí roli. Exogenní proměnné jsou vždy proměnné vysvětlující. (13, s. 14–16)

Druhým krokem je stanovení předpokládaných znamének a očekávaných hodnot odhadnutých parametrů modelu. Znaménka parametrů jsou určena na základě ekonomické teorie nebo jiných kvalitativních analýz a studií. Pomocí apriorní informace je například možné usoudit, že znaménko určitého parametru představujícího konkrétní mezní veličinu může být pouze kladné nebo pouze záporné. Podobným způsobem lze z konkrétního apriorního omezení dospět k závěru, že očekávaná hodnota se například pohybuje v intervalu. (13, s. 14–16)

Třetím krokem je volba matematického a analytického modelu. Ekonomická teorie obvykle nedává přesný návod týkající se analytického tvaru zkoumaných závislostí, ani informaci o počtu rovnic v modelu nebo jejich vzájemných vztazích. Z teorie se lze dozvědět, zda je zkoumaná závislost veličin přímá či nepřímá, ale nezískáme jasný klíč

k rozhodnutí, zdali postačí daný problém popsat modelem o jedné rovnici, nebo zdali je nutné formulovat soustavu rovnic, případně použít některé z nelineárních analytických forem. (13, s. 14–16)

Při volbě matematického tvaru je rozhodování pro jeden ze tří typů modelů. Může to být jednorovnicový model, který je charakterizován jako stochastický regresní model, vyjadřující jednu vysvětlovanou endogenní proměnnou v závislosti na jedné nebo více vysvětlujících proměnných a neměřitelné náhodné složce. Dalším druhem je vícero rovnicový model zcela nebo zdánlivě nezávislých rovnic, u kterého lze chápat každou rovnici odděleně nebo je možné chápat celou soustavu jako vícerozměrný regresní model. Třetí variantou je simultánní model, který se skládá ze soustavy vzájemně závislých stochastických i nestochastických rovnic. (13, s. 16–17)

Kvantifikace ekonometrického modelu

Kvantifikace modelu se používá především pro odhad numerických hodnot jeho parametrů pomocí vhodných ekonometrických odhadových postupů. Postup začíná shromážděním a úpravou vhodných statistických dat. Data, která se používají při kvantifikaci modelu, mají většinou povahu kvantitativních statistických pozorování neexperimentálního charakteru, nejsou tedy generována speciálně pro odhad konkrétního ekonometrického modelu. Díky existenci vhodných postupů je možné použít při odhadu parametrů modelu i veličiny kvalitativní či kvantitativní proměnné, které nejsou přímo měřitelné, čehož lze dosáhnout využitím umělých proměnných. (13, s. 21–23)

Data mohou mít podobu časových řad, které poskytují informaci o numerických hodnotách proměnných v jednotlivých po sobě jdoucích obdobích různé délky, jako bývají roky, čtvrtletí či měsíce. Data průřezová jsou pozorování proměnných, která se týkají jednotlivých subjektů stejného období, vážou se k určitému okamžiku. Pokud shrnují informace z různých regionů či zemí v daném období, jedná se o prostorové údaje. (13, s. 21–23)

Při některých zkoumáních je vhodné kombinovat průřezová data a údaje časových řad, tímto postupem lze vnést do modelu více informací a používá se běžně například při smíšeném odhadu koeficientů pružnosti poptávky po určité komoditě, kdy jsou koeficienty příjmové pružnosti odhadovány z průřezových údajů a koeficienty příjmové pružnosti z časových řad. Panelová data vznikají opakováním výběrového šetření

s daným programem u stejného souboru respondentů v různých obdobích, příkladem mohou být údaje o peněžních příjmech a výdajích sociálních skupin domácností, které jsou zjišťovány několik období opakovaně po sobě. (13, s. 21–23)

Statistická data svým neexperimentálním charakterem vyvolávají při odhadu parametrů modelu řadu problémů, například nedostatečným počtem disponibilních pozorování dojde k nedostatečnému počtu stupňů volnosti modelu. Dalším nedostatkem přítomným zejména u časových řad bývá multikolinearita. Data také mohou být neúnosně zatížena chybou měření, ty mohou mít náhodný ale i systematický charakter. Je důležité ve většině případů disponibilní statistická data očistit nebo upravit, ale zároveň se vyvarovat situace, kdy vyřešení jednoho problému přinese problém nový. (13, s. 21–23)

Výběr a aplikace adekvátního odhadového postupu je klíčový pro vlastní odhad parametrů stochastických rovnic modelu, u víceroznicových modelů lze odhadovat každou rovnici zvlášť nebo všechny současně. Rozlišují se tedy metody s omezenou informací, které odhadují jednotlivé rovnice a metody s úplnou informací, které simultánně umožňují odhad celého systému rovnic.

Verifikace ekonometrického modelu

Před aplikací na praktických a teoretických ekonomických problémech musíme nejprve verifikovat odhadnutý ekonometrický model, tj. vyhodnotit, zda jsou odhady parametrů v souladu s apriorními omezeními výchozí ekonomické hypotézy. Verifikace zahrnuje kromě rozhodnutí o jeho reálnosti i posouzení statistické významnosti odhadů a testování platnosti apriorních hypotéz, které se týkají vlastností proměnných, parametrů, analytického tvaru a dat. Pro ověření se používají apriorní ekonomická omezení, statistické testy a ekonometrická kritéria. (13, s. 23–24)

Ekonomická verifikace vychází z apriorních ekonomických kritérií či omezení a je nezbytnou podmínkou ekonomické interpretace či využitelnosti výsledků interpretace. Spočívá v podstatě v ověření velkých numerických hodnot a správnosti znamének. Jsou-li odhady ve shodě s očekáváními ohledně znamének a hodnot jednotlivých parametrů, mohou být interpretována v souladu s teoretickými ekonomickými předpoklady a odhadnutí ekonometrický model je sice zjednodušeným, ale adekvátním zobrazením zkoumaného systému nebo ekonomického problému. Na druhou stranu, pokud znaménka nebo hodnoty odhadnutých parametrů výchozím ekonomickým předpokladům

či omezením nevyhovují, je nezbytné model pro jeho jednotlivé rovnice specifikovat jiným způsobem, případně přezkoumat teoretická východiska. Poměrně častou příčinou zamítnutí získaných odhadů jsou neadekvátní empirická data, ale důvodem může být i nesplnění některých předpokladů nutných pro použití konkrétní ekonometrické metody odhadu. Statistická verifikace se používá k posouzení statistické reálnosti jednotlivých parametrů i celého modelu. Pomocí statistických testů v rámci statistické verifikace ověřujeme přesnost a významnost získaných výsledků. Nejčastěji používaná kritéria jsou standartní chyby odhadnutých parametrů, koeficient vícenásobné determinace anebo t a F testy statistické významnosti odhadů. Ekonometrická verifikace se soustředí na ověřování podmínek, které jsou nutné k úspěšné aplikaci daných ekonometrických metod, testů nebo technik. (13, s. 23–24)

Ekonometrická verifikace bude podrobněji rozebrána níže.

Ekonometrická verifikace

V rámci ekonometrické verifikace bude více přiblížena problematika multikolinearity, autokorelace a heteroskedasticity.

Předpokládá se tvar bodové odhadové funkce

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (1)$$

Pokud je cílem spočítat bodovou odhadovou funkci, musí být možné vyčíslit inverzní matici $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$. Pokud jsou některé sloupce v matici lineárně závislé, pak matice nemá plnou hodnotu. V takovém případě se nepodaří spočítat inverzní matici a nelze tedy vyjádřit bodovou odhadovou funkci \mathbf{b} a k odhadu modelu nelze použít metodu nejmenších čtverců. Pokud se mezi sloupci matice \mathbf{X} vyskytuje lineární vztah, je řeč o tzv. perfektní multikolinearitě. V takovém případě není možné odhadnout regresní koeficienty. (14, s. 91)

Multikolinearita není vlastnost, která se týká celého základního souboru nebo populace, ale týká se pouze výběrového vzorku. Multikolinearita se často vyskytuje v modelech, které pracují s ekonomickými (případně makroekonomickými) časovými řadami, nebo ve kterých se pracuje s průřezovými daty. Dále v modelech, kde jsou zahrnuty zpožděné hodnoty endogenních nebo exogenních proměnných, případně v modelech, kde je zabudován nesprávný počet tzv. nula-jednotkových proměnných. (14, s. 92)

Další předpoklad pro použití metody nejmenších čtverců v modelu je sériová nezávislost náhodných složek. Dle tohoto předpokladu mají nediagonální prvky kovarianční matice náhodných složek nulové, v takovém případě jsou náhodné složky po dvojicích nezávislé. Pokud je tento předpoklad porušen, náhodné složky nejsou sériově nezávislé a v takovém případě je řeč o autokorelaci. Autokorelace není závislost mezi více proměnnými, ale je to závislost mezi více hodnotami jedné proměnné. Autokorelace se může v modelech vyskytovat z několika důvodů. (14, s. 109)

Zprvė většina ekonomických časových řad vykazuje ve svém vývoji určitou setrvačnost a hodnoty určitého období jsou často ovlivněny hodnotami předchozích období. Může to být dáno špatnou specifikací modelu, například sestavením lineárního modelu v případě, kdy by byl lepší nelineární model. Další příčinou mohou být chyby v měření, zahrnutí zpožděné vysvětlující proměnné či se často vyskytuje u dat nějakým způsobem zprůměrovaných, extrapolovaných apod. Důsledkem autokorelace je, že získané odhady parametrů lineárního regresního modelu jsou nekonzistentní a nestranné. (14, s. 110)

Podle podmínek použití metody nejmenších čtverců by měl být model homoskedastický, tzn. neměla by se v něm vyskytovat heteroskedasticita neboli různý rozptyl pro skupiny pozorování. V případě výskytu heteroskedasticity rozptyl náhodné složky není konečný a konstantní. Takový rozptyl není shodný pro všechna pozorování, ale mění se v závislosti na hodnotách vysvětlujících proměnných. Heteroskedasticita se často vyskytuje u modelů s průřezovými daty. Kvaziheteroskedasticita se může projevit při chybné specifikaci modelu, další příčinou může být chybné měření jednotlivých proměnných nebo použití agregovaných údajů, například skupinové průměry apod. Vlivem heteroskedasticity intervaly spolehlivosti a testování hypotéz ztrácejí na síle. (14, s. 139)

Využití ekonometrických modelů

Existuje celá řada způsobů aplikace odhadnutého ekonometrického modelu. Uplatnění ekonometrická analýza nachází při kvantifikaci a verifikaci ekonomických hypotéz na makroúrovni, ale i při zkoumání vztahů mezi ekonomickými proměnnými jako jsou poptávka, důchody a ceny nebo spotřeba a důchody na mikroúrovni. (13, s. 26–27)

Od počátků ekonometrie bylo věnována velká pozornost částečně mikro a částečně makroekonomickým studiím v oblasti poptávkových funkcí, kde je středem pozornosti

domácnost. Další důležitou oblastí aplikace jednorovnicových ekonometrických modelů je firma, která je předmětem zkoumání v souvislosti produkčních a nákladových funkcí. V oblasti makroekonomie je velký důraz kladen na spotřební funkce. Různé výsledky, které jsou získány při odhadu parametrů z průřezových údajů, případně z časových řad, vedly k řadě zlepšení klasické výchozí ekonomické hypotézy, která má za důsledek variantní specifikace spotřební funkce. Důležitou roli při empirické verifikaci teoretických poznatků má ekonometrická analýza na zkoumání investičních funkce. Ekonometrické modelování představuje důležitý nástroj také pro ověřování různě specifikovaných funkcí poptávky po penězích v souvislosti s analýzou relativní efektivnosti monetární a fiskální politiky. (13, 26–27)

Empirické makroekonometrické modely zaujímají významné postavení v moderní ekonomii, zahrnují až stovky rovnic převážně dynamického charakteru. Jejich původně keynesiánský obsah, který se vyznačuje důchodově výdajovou strukturou, je v poslední době orientován na zkoumání vlivu měnových proměnných, různých typů očekávání a na nabídkovou stranu ekonomiky. (13, 26–27)

Regresní analýza

Hlavním úkolem regresní a korelační analýzy je více poznat příčinné vztahy mezi statistickými znaky pomocí matematického popisu systematických okolností, které provázejí statistické závislosti. Může se jednat například o zobrazení podmíněných průměrů vysvětlované proměnné v důsledku systematických změn hodnot jedné či většího počtu vysvětlujících proměnných. Častá je snaha o nalezení matematické funkce tak, aby co nejvěrněji vyjadřovala charakter závislosti. Taková matematická funkce se nazývá regresní funkce. Regresní analýza má za cíl co nejlépe přiblížit vypočítané regresní funkce k hypotetické regresní funkci. (15, s. 177)

K uvedenému úkolu regresní analýzy se vztahuje celá řada dílčích úkolů, například shromáždění a matematické formulování apriorní představy o charakteru regresní funkce, formulování předpokladů o souhrnném působení neuvažovaných statistických znaků, odhadnutí empirické regresní funkce na základě pozorování a posouzení kvality empirické regresní funkce z pohledu cílů statistického zjišťování. (15, s. 177)

Volba vhodného typu regresní funkce by měla být určena dle věcného rozboru analýzy vztahů mezi veličinami na základě existující ekonomické teorie. Součástí rozhodnutí by

mělo být určení nezávislých proměnných jsou vhodné pro analýzu dané závislé proměnné. (15, s. 180)

Níže je zobrazen jednoduchý model regresní analýzy:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X + e, \quad (2)$$

kde β_1 , β_2 představují neznámé parametry (neznámé reálné konstanty), Y a e jsou náhodné veličiny a X je daná reálná proměnná. Parametry β_1 a β_2 jsou neznámé a vyžadují odhadnutí pomocí naměřených dat. Předpokládá se, že při hodnotách x_1, x_2, \dots, x_n proměnné X budou pozorovány hodnoty y_1, y_2, \dots, y_n proměnné Y zatížené chybami e_1, e_2, \dots, e_n . Při splnění předpokladu, že pozorování y_1, y_2, \dots, y_n vyhovují jednoduchému modelu regresní analýzy, platí následující regresní funkce:

$$y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Předpokládá se, že chyby e_1, e_2, \dots, e_n jsou nezávislé náhodné veličiny a jsou nesystematické, což znamená, že jejich střední hodnota $E(e_i) = 0$. Chyby jsou zároveň homogenní, mají tedy stejný rozptyl $D(e_i) = \sigma^2, i = 1, 2, \dots, n$. Cílem v daném regresním modelu je najít odhady parametrů β_1, β_2 a rozptylu σ^2 . Toho lze dosáhnout metodou nejmenších čtverců, která bude popsána níže. (16, s. 264)

Metoda nejmenších čtverců

Vektor neznámých regresních koeficientů i stochastické rozdělení náhodných složek v lineárním regresním modelu lze odhadnout metodou řádných nebo klasických nejmenších čtverců, pokud jsou splněny 4 klasické předpoklady.

1. $E(\mathbf{u}) = \mathbf{0}$.
2. $E(\mathbf{u} \mathbf{u}') = \sigma^2 \mathbf{I}_n$.
3. \mathbf{X} je nestochastická matice, takže $E(\mathbf{X}'\mathbf{u}) = \mathbf{0}$.
4. \mathbf{X} má plnou hodnost k .

První podmínka znamená, že náhodné složky mají ve všech výběrech identické rozdělení s nulovou střední hodnotou. Druhá představuje vyjádření homoskedasticity a sériové nezávislosti. Třetí požadavek znamená, že při opakovaných výběrech by pozorování vysvětlujících proměnných nabývala fixních hodnot, takže jediný zdroj

měníci se variability \mathbf{y} v různých výběrech je pouze proměnlivost vektoru náhodných složek. Posledním požadavkem se rozumí, že matice \mathbf{X} neobsahuje žádné perfektně lineárně závislé sloupce pozorování vysvětlujících proměnných. (13, s. 32)

Přednost metody nejmenších čtverců oproti jiným technikám je v poskytování odhadů s optimálními vlastnostmi i pro malé výběry pozorování a jednoduchý výpočetní postup při určení numerických hodnot odhadovaných parametrů. (13, s. 32)

Lineární regresní model má veškerou informaci o neznámém vektoru parametrů $\boldsymbol{\beta}$ a neznámém skaláru σ^2 obsaženou ve výběru n pozorování náhodné proměnné \mathbf{y} a pro k fixních vysvětlujících proměnných \mathbf{X} . Podstata bodového odhadu spočívá v určení vhodné funkce pozorování \mathbf{y} při známé matici pozorování \mathbf{X} , aby bylo možné získat nejlepší možné odhady neznámých parametrů. Omezením se na lineární transformace \mathbf{y} lze pro bodovou lineární odhadovou funkci nebo statistiku psát

$$\mathbf{b} = \mathbf{A} \mathbf{y}, \quad (4)$$

kde \mathbf{b} je sloupcový vektor odhadů $\boldsymbol{\beta}$ a \mathbf{A} je matice typu $k \times n$.

Vychází-li se při odhadu klasického lineárního modelu z metody nejmenších čtverců, pak pro bodovou odhadovou funkci \mathbf{b} platí následující:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \mathbf{b} + \mathbf{e}. \quad (5)$$

Případně:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \mathbf{b}, \quad (6)$$

kde \mathbf{e} je vektor n reziduí $(\mathbf{y} - \mathbf{X} \mathbf{b})$ a $\hat{\mathbf{y}}$ je vektor vyrovnaných hodnot vysvětlované proměnné. Kritériem pro volbu odhadové funkce $\boldsymbol{\beta}$ při použití metody nejmenších čtverců je dosažení minima součtu čtverců reziduí, dojde tedy k minimalizaci kvadratické formy

$$\mathbf{e}'\mathbf{e} = (\mathbf{y} - \mathbf{X} \mathbf{b})'(\mathbf{y} - \mathbf{X} \mathbf{b}) = \mathbf{y}'\mathbf{y} - 2 \mathbf{b}'\mathbf{X}'\mathbf{y} + \mathbf{b}'\mathbf{X}'\mathbf{X} \mathbf{b}. \quad (7)$$

Stanovením první parciální derivace soustavy podle \mathbf{b}' a položením výsledku roven nule, vznikne:

$$\frac{\partial(\mathbf{e}'\mathbf{e})}{\partial \mathbf{b}'} = -2 \mathbf{X}'\mathbf{y} + 2\mathbf{X}'\mathbf{X} \mathbf{b} = \mathbf{0}. \quad (8)$$

Dalším řešením lze dospět k normálním rovnicím nejmenších čtverců

$$\mathbf{X}'\mathbf{X}\mathbf{b} = \mathbf{X}'\mathbf{y}, \quad (9)$$

takže při existenci $(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}$ vzniká bodová odhadová funkce \mathbf{b} , minimalizující součet čtverců reziduí, která má tvar:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{y}. \quad (10)$$

Jelikož matice druhých parciálních derivací $\frac{\partial^2(\mathbf{e}'\mathbf{e})}{\partial \mathbf{b}'\partial \mathbf{b}} = 2\mathbf{X}'\mathbf{X}$ je pozitivně definitní, vektor \mathbf{b} zaručuje, že došlo k dosažení minima výrazu kvadratické formy odhadované funkce. (13, s. 32–33)

Jestliže je závisle proměnná y lineárně závislá na každé z vysvětlujících proměnných x_1, x_2, \dots, x_p a zároveň jsou vysvětlující proměnné navzájem nezávislé, je používána pro určení vývoje závislé proměnné mnohonásobná lineární funkce. Regresní funkci η lze napsat ve tvaru:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p, \quad (11)$$

kde $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ jsou neznámé parametry a x_1, x_1, \dots, x_p jsou vysvětlující proměnné. (15, s. 213–214)

2.5 Ekonometrické prognózování

Důležitým cílem ekonometrického modelování je prognózování, někdy označované také jako predikce. V rámci ekonometrického prognózování je predikována hodnota vysvětlovaných endogenních proměnných mimo interval pozorování. Ekonometrická prognóza, nebo také předpověď, je kvantitativním odhadem pravděpodobnosti budoucí hodnoty konkrétní ekonomické veličiny pomocí minulé i současné informace, kterou reprezentuje odhadnutý ekonometrický model. Existuje několik způsobů možné extrapolace strukturního modelu mimo období, z něhož jsou určeny jeho parametry. Hlavním zaměřením bude na prognózování pomocí lineárního regresního modelu. (13, s. 199)

Klasifikace předpovědí

Termín předpověď nebo také prognóza má své využití zpravidla v případě, že se jedná o extrapolaci modelu do budoucnosti, nicméně jako předpověď lze chápat i extrapolaci

odhadnutého modelu směrem do minulosti, tzn. před interval pozorování, na základě kterého byl model sestaven. Taková situace se ale spíše označuje jako retrospektiva. (13, s. 199)

Předpovědi se rozlišují na bodové, které spočívají v odhadu jedné hodnoty v budoucnosti predikované proměnné v rámci daného období. Dalším typem předpovědi jsou předpovědi intervalové, které představují období intervalu spolehlivosti odhadu. V něm je obsažena skutečná hodnota predikované proměnné v období s požadovanou přesností. (13, s. 199)

Předpovědi ex post a ex ante se rozlišují hlavně z praktických a metodologických důvodů. Ex post předpovědi vysvětlované endogenní proměnné lze získat tehdy, pokud je možné stanovit hodnoty jak endogenních, tak vysvětlujících predeterminovaných proměnných v daném období s naprostou jistotou. Následným porovnáním ex post předpovědi se skutečností tak lze ověřit vhodnost ekonometrického modelu k prognózování. (18, s. 199)

V opačném případě je řeč o předpovědích ex ante, to jsou předpovědi, kdy hodnota vysvětlované endogenní proměnné ani některé nebo dokonce úplně všechny hodnoty vysvětlujících predeterminovaných proměnných v období dané předpovědi nejsou známy, nebo alespoň nejsou známy s jistotou. Je tedy nutné předpovědi ex ante odhadovat či stanovovat na základě apriorní informace. Předpověď ex ante je možné označit za předpověď v tom pravém slova smyslu, zatímco předpověď ex post má charakter spíše pseudopředpovědi. (13, s. 199)

V rámci ekonometrického prognózování je důležité předpovědi rozlišovat na podmíněné a nepodmíněné. Jsou-li známy hodnoty všech predeterminovaných proměnných modelu v období, pro které je dělána předpověď, s jistotou, jde o nepodmíněnou předpověď. Každá prognóza ex post je nepodmíněnou předpovědí, zatímco každá prognóza ex ante má charakter předpovědi podmíněné. (13, s. 200)

Stejně jako v ekonometrickém modelu platí, že lze pouze posuzovat na neznámé skutečné hodnoty jeho parametrů s určitou pravděpodobností, stejně platí i v ekonometrickém prognózování, že nelze získat zcela přesně podmíněné předpovědi vysvětlovaných endogenních veličin, ale s určitým odchýlením, chybou. Chyba předpovědi představuje odchylku předpovědi od skutečné hodnoty predikované endogenní proměnné v období

předpovědi. Velikost a variabilita chyby předpovědi je ovlivněna několika faktory. (13, s. 200)

V první řadě je dána stochastickým charakterem modelu, který je sám o sobě příčinou vzniku odchylek předpovědi vysvětlovaných endogenních proměnných a skutečných hodnot. Tato stochastická povaha modelu je příčinou odchylek i v případě, že je model přesně specifikován, je v souladu s výchozí ekonomickou hypotézou, a dokonce pokud jsou hodnoty jeho parametrů známé s perfektní jistotou. (13, s. 200)

Zadruhé je to dáno náhodnou chybou, kterou jsou zatíženy odhadnuté parametry ekonometrického modelu, to způsobuje odchýlení hodnot získaných z jednoho libovolného výběru pozorování od skutečných hodnot parametrů v modelu. Dále při podmíněné předpovědi hodnot vysvětlujících predeterminovaných proměnných, které byly získány odhadem nebo extrapolací pro období předpovědi, obsahují náhodnou chybu. V neposlední řadě to může být dáno chybnou specifikací odhadnutého ekonometrického modelu v období předpovědi, způsobené nestabilitou modelu v čase. (13, s. 200)

Vlivem působení vlivů na proces predikování zmíněných výše jsou ekonometrické předpovědi stochastického charakteru. Cílem prognózování je ovšem získat takové předpovědi, u nichž má jejich chyba minimální rozptyl. Přesnost ekonometricky stanovených předpovědi se ověřuje pomocí odpovídajících stochastických a ekonometrických testů. (13, s. 200)

Prognózování pomocí lineárního regresního modelu

Pro získání předpovědi s optimálními vlastnostmi použitím standartního lineárního regresního modelu je třeba zajistit, aby byl stanovený model v čase stabilní. Jeho specifikace, charakter rozdělení náhodné složky a odhadnuté hodnoty parametrů jsou validní i v období, pro které je tvořena předpověď. Předpokládá se klasický tvar lineárního regresního modelu

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{u}, \quad (12)$$

kde \mathbf{y} je vektor $T \times 1$ pozorování vysvětlované proměnné,

\mathbf{X} – matice $T \times k$ pozorování vysvětlujících proměnných,

\mathbf{u} – vektor $T \times 1$ nepozorovatelných náhodných složek,

$\beta - k \times 1$ neznámých parametrů.

Při zajištění předpokladů pro aplikaci metody nejmenších čtverců je získán odhad vektoru β pomocí odhadové funkce ve tvaru

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}' \mathbf{y}. \quad (13)$$

Pokud je k dispozici nová množina hodnot, to jsou hodnoty pozorování nebo odhadů vysvětlujících proměnných pro období předpovědi $T + 1$, je možné stanovit bodovou předpověď průměrné hodnoty vysvětlované proměnné pro období $T + 1$ použitím funkce předpovědi ex ante \hat{Y}

$$\hat{Y}_{T+1} = \mathbf{x}'_{T+1} \mathbf{b}, \quad (14)$$

přičemž \hat{Y}_{T+1} je skalár, neboť \mathbf{x}'_{T+1} je $1 \times k$ řádkový vektor. Vektor \mathbf{x}'_{T+1} tvoří skutečná pozorování, jestliže lineární regresní model obsahuje všechny vysvětlující proměnné se zpožděním o jedno období. (13, s. 201)

Pokud je skutečná průměrná hodnota Y v období předpovědi označena jako \bar{Y}_p , potom chyba ex ante předpovědi průměrné hodnoty vysvětlované proměnné je určena

$$\hat{e}_p = \hat{Y}_p - \bar{Y}_p = \mathbf{x}' \mathbf{b} - \mathbf{x}' \beta = \mathbf{x}'_p (\mathbf{b} - \beta). \quad (15)$$

Zdrojem chyby předpovědi průměrné hodnoty \bar{Y} je variabilita odhadové funkce \mathbf{b} , která se měří pomocí odhadů standardních chyb.

Rozptyl chyby předpovědi průměrné hodnoty \bar{Y}_p se spočte ze vzorce

$$\hat{\sigma}_p^2 = E(\hat{e}_p^2) = \sigma^2 \mathbf{x}'_p (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_p, \quad (16)$$

kde σ^2 je rozptyl náhodné složky lineárního regresního modelu. Druhá odmocnina rozptylu chyby předpovědi $\hat{\sigma}_p^2$ je standardní chyba předpovědi průměrné hodnoty a je její mírou přesnosti. Odhad standardní chyby bodové předpovědi lze vyjádřit tvarem

$$\hat{s}_p = s \sqrt{\mathbf{x}'_p (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_p}. \quad (17)$$

Interval spolehlivosti předpovědi průměrné hodnoty \bar{Y}_p , respektive její intervalovou předpověď, lze určit pro požadovanou hladinu významnosti α ze vztahu

$$\hat{Y}_p \pm t_{\alpha/2}^* \hat{s}_p, \quad (18)$$

kde $t_{\alpha/2}^*$ je kritická hodnota Studentova rozdělení pro $T - k$ stupňů volnosti. (13, s. 202)

Charakteristikou přesnosti neboli kvality ekonometrické předpovědi ex post, která je nezávislá na jednotkách měření a použitelná i jako kritérium vhodnosti modelu k predikci, je Theilův modifikovaný koeficient nesouladu posloupnosti relativních změn předpovědí a skutečných hodnot vysvětlované proměnné. Theilův koeficient je dán vzorcem

$$U^* = \sqrt{\frac{\frac{1}{h} \sum_{T=1}^h (P_T - A_T)^2}{\frac{1}{h} \sum_{T=1}^h A_T^2}}. \quad (19)$$

P_T představuje predikovanou změnu endogenní proměnné, A_T je skutečná změna endogenní proměnné a h je délka horizontu předpovědi.

Hodnota $U^* = 0$ vyjadřuje, že všechny ex post předpovědi mají perfektní predikční schopnost, to znamená, že čím nižší hodnota Theilova koeficientu, tím je model přesnější. Pokud je $U^* = 1$, jedná se o naivní předpověď. (13, s.224)

3 ANALÝZA SOUČASNÉ SITUACE

V rámci analýzy současné situace budou představeny faktory mající potenciální vliv na hledanou proměnnou. Následně budou blíže popsány hodnoty daných faktorů a způsob, jakým budou zpracovány v modelu.

Volba prostředí a sledovaného období

V projektu je zkoumán vliv faktorů na produkci plynových elektráren, výzkum je proveden pro Německo a zpracovává data pro roky 2017 až 2019. Německo bylo zvoleno z několika důvodů: Jedná se o velký trh s vlivem nejen na Českou republiku, ale na celoevropský energetický trh. Zároveň na něm působí všechny zvolené faktory, které mají potenciální vliv na produkci plynových elektráren. Těmito zvolenými faktory jsou myšleny vzájemná konkurence zemního plynu a černého uhlí jako paliva pro výrobu elektrické energie, pestrá intenzivní výroba energie z nízkoemisních zdrojů a další. Zkoumaným obdobím jsou roky 2017 až 2019, jedná se o dobu, kdy jsou dohledatelná potřebná data a zároveň evropský energetický trh ještě nebyl uvržen do bezprecedentního chaosu způsobeného koronavirovou pandemií, válečným konfliktem na Ukrajině a energetickou krizí, při kterém bylo možné pozorovat nečekané výkyvy v cenách až několikanásobně větší než ve zkoumaném období 2017–2019.

3.1 Představení firmy

Práce je tvořena ve spolupráci s firmou E.ON. Koncern E.ON je jednou z největších soukromých energetických společností na světě. Sídlí v německém Essenu a má silné postavení na trhu v Evropě. Firma vznikla v roce 2000 sloučením energetických firem VEBA a VIAG, které byly obě založeny v roce 1920, aby sloužily jako holdingové společnosti státních průmyslových podniků. V letech 1960 a 1980 po privatizaci byly obě firmy zapsány na německou burzu akcie DAX 30, které tvoří 30 akcií blue-chips obchodovaných na německé burze. (17)

Firma E.ON SE je na vrcholu struktury celé skupiny E.ON, funguje jako management skupiny, dohlíží a koordinuje činnosti. Jednotlivé segmenty skupiny jsou rozděleny do globálních jednotek dle funkcí a regionálních jednotek podle zemí, součástí skupiny E.ON je tak mimo jiné E.ON Česká republika. V roce 2021 měla skupina E.ON tržby

přes 77 358 milionů eur a zaměstnávala přes 72 000 zaměstnanců. Hlavní činností firmy je distribuce a dodávka elektřiny, distribuce a dodávka plynu. E.ON působí ve více než 30 zemích a má přes 50 milionů zákazníků. (23, s. 8)

Hlavní strategické cíle firmy jsou zaměřeny na růst, udržitelnost a digitalizaci. V roce 2021 došlo k akvizici firmy Innogy společností E.ON, při této příležitosti došlo k změně členů představenstva. Nový tým vedení navrhl aktualizovanou strategii, jejíž účelem je připravit skupinu E.ON na nadcházející desetiletí. Jedním z hlavních cílů je podpořit sociálně odpovědnou udržitelnost a transformaci evropské energetiky v digitálním věku. Obě zmíněné oblasti (transformace energetiky a udržitelnost) patří mezi klíčové faktory budoucího růstu hlavní činnosti E.ON: oblasti energetických sítí a řešení pro zákazníky. Stále více se zrychluje přechod ke klimaticky neutrální energetice, která bude impulsem pro dekádu růstu celého odvětví. E.ON bude hrát při této transformaci klíčovou roli a bude se tak přímo podílet na utváření procesu dekarbonizace Evropy. (18, s. 42–48)

Udržitelnost je ústřední bod strategie společnosti a základním pilířem pro její budoucí kroky. E.ON usiluje o to, aby přímé emise, které může ovlivnit, byly do roku 2040 klimaticky neutrální, v některých sítích (zejména v Německu a Švédsku) ještě dříve. Firma nabízí zákazníkům energetická řešení a služby, které podporují cestu k dekarbonizaci a umožňují přechod od fosilních paliv k zelené energii. (18, s. 42–48)

Díky digitalizaci je možné zvládnout přechod k distribuovanému, proměnlivému a sítěmi propojenému světu energetiky, který je doprovázen stále rostoucí komplexitou. Cílem společnosti je být plně digitální energetickou společností a zásadně transformovat své produkty, procesy a služby na vysoce propojená řešení založená na datech. Digitalizace probíhá ve čtyřech hlavních směrech. Optimalizace interních činností, zapojení zákazníků a partnerů, transformace a rozvoj nových oblastí podnikání a zvyšování digitálních dovedností zaměstnanců. (18, s. 42–48)

Společnost E.ON má dva hlavní obory podnikání: provozování elektroenergetických a plynárenských sítí a nabídku řešení pro zákazníky. V souvislosti s transformací globálních energetických systémů se obory vzájemně doplňují. Jedná se o růstové aktivity, které těží z udržitelné transformace různých zákazníků a odvětví. Tato transformace zahrnuje aspekty rostoucího počtu zařízení na výrobu energie

z obnovitelných zdrojů a vozidla a přístroje šetrné ke klimatu, tepelná čerpadla a akumulční zařízení. (18, s. 42–48)

V budoucnu se očekává silné propojení trhů a klade se důraz na šetrnost klimatu. Obnovitelné zdroje energie budou prioritním způsobem výroby elektřiny, nicméně jejich úplná integrace do energetického systému se v současnosti neobejde bez jistých nevýhod. Velkou slabinou mnoha obnovitelných zdrojů (zejména větrných a slunečních elektráren) je jejich silná závislost na klimatu, kdy je těžké předpovědět a přesně určit, v jakou dobu bude možné produkovat určité množství energie. Klíčovou roli tak hrají spolehlivé zdroje energie, které jsou flexibilní, snadno kontrolovatelné a schopné rychle vyrábět energii. Takovou roli levných a stabilních zdrojů hrálo a v mnoha zemích světa hraje černé uhlí. Možnost vyrábět elektřinu rychle a levně je velký důvod proč mnoho světových zemí stále preferuje fosilní paliva před obnovitelnými zdroji.

Mezi fosilní paliva spadá také zemní plyn, nicméně jeho použití na výrobu elektřiny v Evropě v posledních letech roste. Je to způsobeno tím, že má mnohé výše popsané výhody černouhelných elektráren, je to flexibilní a stabilní zdroj paliva, který vyrábí elektřinu relativně levně. Na druhou stranu oproti černému uhlí plynové elektrárny vypouštějí násobně méně emisí a jsou tak v porovnání s nimi mnohem šetrnější k životnímu prostředí. Role zemního plynu tak spočívá v jakési protiváze obnovitelným zdrojům energie, funguje jako dobrý doplněk, který je schopen zahladit výkyvy v produkci obnovitelných zdrojů. Proto se očekává růst důležitosti plynu jako zdroje v následujících letech. Z toho důvodu je užitečné předvídat poptávku a spotřebu plynu v regionech Evropy. Ekonometrický model, který je předmětem návrhové části, slouží jako jeden z možných nástrojů, díky kterému lze předvídat a chápat fungování trhu a jeho směřování do budoucna. Zaměřuje se na faktory, ovlivňující výši produkci elektrické energie ze zemního plynu.

3.2 Popis proměnných regresního modelu

V následujících kapitolách budou popsány proměnné vyskytující se v ekonometrickém modelu. Jedná se o vysvětlovanou proměnnou Y představující průměrné množství elektřiny vyrobené v plynových elektrárnách v Německu. Dále se jedná o vysvětlující proměnné X , které byly vybrány jako potenciální faktory ovlivňující hodnotu Y .

Potenciální z důvodu, že budou představeny i takové proměnné X, u kterých byla pouze předpokládána možnost existující prokazatelné vazby na Y, ale nakonec daná vazba nebyla modelem prokázána případně se vyskytli jiné komplikace znemožňující použití proměnné ve finálním řešení modelu, a ten tedy takové proměnné X nakonec neobsahuje. Představeny budou i proměnné X, které se vyskytují v konečném řešení regresního modelu. Některé z těchto faktorů vznikají výpočtem, do kterého vstupují další proměnné. Takové proměnné, které nevystupují v modelu přímo, ale které se podílí na výpočtu přímo v modelu vystupujících proměnných X budou v práci nazývány jako podružné proměnné. V konečném řešení modelu tak jsou i faktory, které kombinují více podružných proměnných a ty budou také popsány. Pro lepší přehlednost jsou všechny potenciální proměnné X, podružné proměnné a vysvětlovaná proměnná Y zobrazeny v tabulce 3.

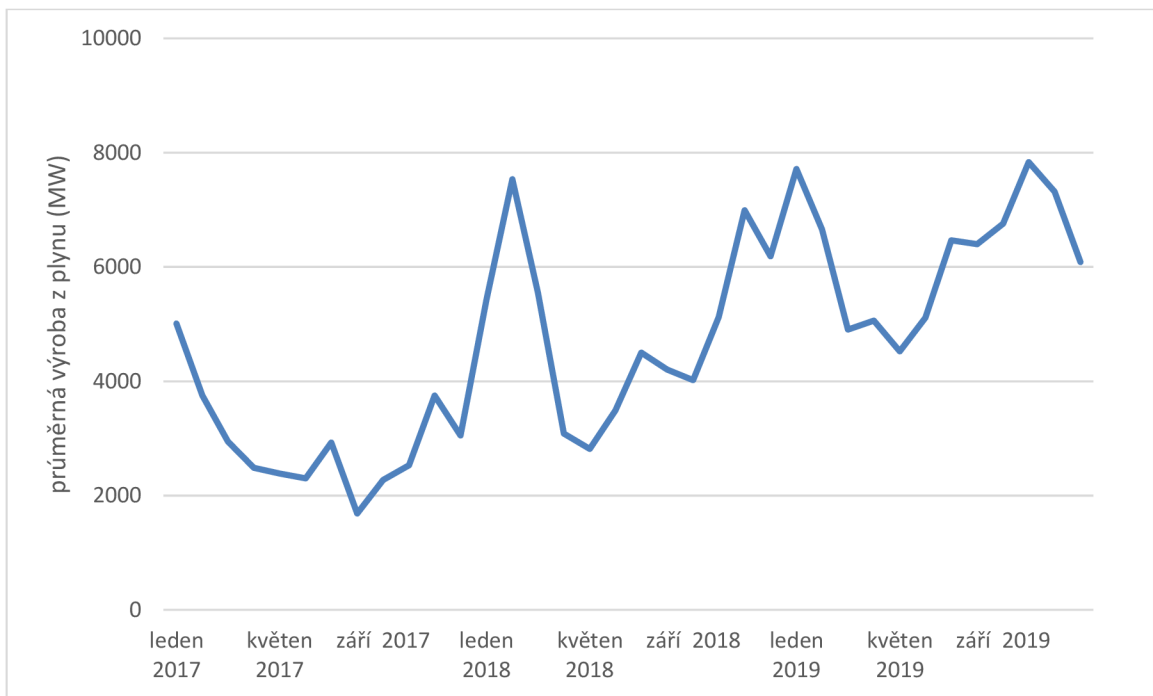
Tabulka 3: Souhrn potenciálních proměnných modelu (zdroj: vlastní zpracování)

název	označení	jednotka	podružné proměnné
výroba elektřiny z plynu	Y	MW	
poptávka elektřiny	X ₁	MW	spotřeba elektřiny v zemi export elektřiny
výroba el. z nízkoemisních zdrojů	X ₂	MW	
relativní konkurenceschopnost uhlí a plynu	X ₃	-	cena uhlí
			cena plynu
			cena emisní povolenky
			kurz eur/usd
výroba el. z hnědého uhlí	X ₄	MW	

Výroba elektřiny z plynu

Vysvětlovanou proměnnou Y představuje množství elektřiny vyrobené s použitím plynu jako zdroje energie. V modelu vystupuje jako ostatní proměnné v podobě měsíčního průměru. Jednotkou jsou megawatty (MW), které představují jednotku výkonu. Například proměnná Y v modelu o hodnotě 5000 MW znamená, že v průměru v daném měsíci jsou ve funkci plynové elektrárny se společným výkonem 5000 MW. Vynásobením výkonu časem lze spočítat množství vyrobené elektřiny, elektrárny s výkonem 5000 MW vyrobí za jednu hodinu 5000 MWh (megawatthodin) energie. Zdrojem dat je entsoe-e transparency platform, což je platforma zabývající se sběrem

a zveřejňováním dat a informací o výrobě, dopravě a spotřebě elektřiny pro celoevropský trh. Vývoj množství produkce elektřiny z plynu v letech 2017 až 2019 v Německu ukazuje graf 2.

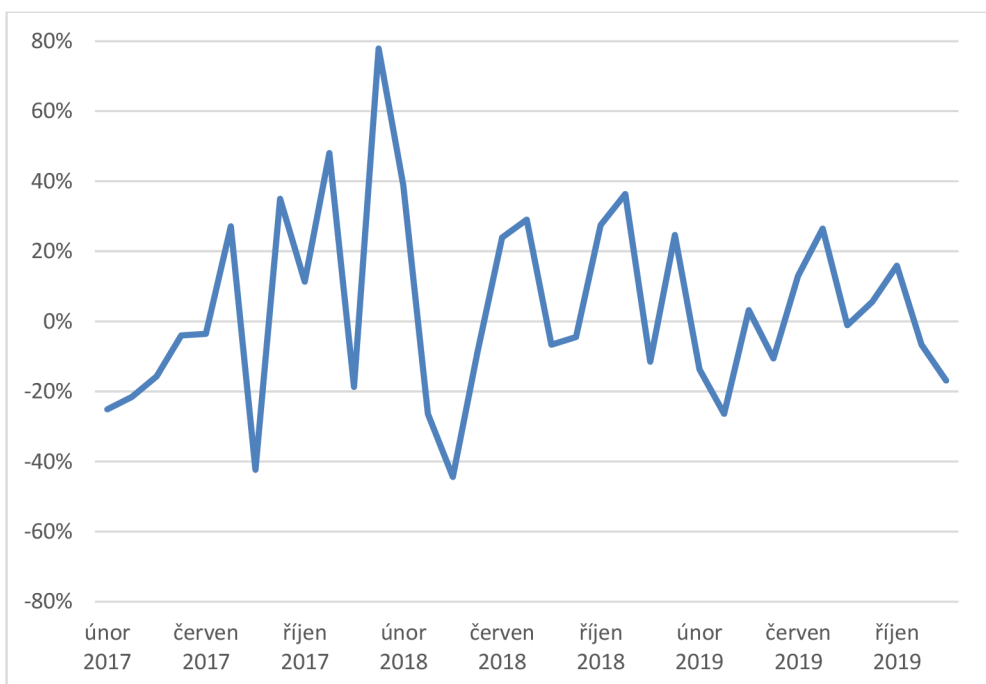


Graf 2: Vývoj výroby elektřiny z plynu v letech 2017–2019 (zdroj: vlastní zpracování dle (21))

Patrná je sezónnost výroby elektřiny v plynových elektrárnách, během letních měsíců dochází k výraznému poklesu. Oproti tomu lze vidět výrazné zvýšení během zimy. Je to způsobeno obecným zvýšením spotřeby elektřiny během zimy, kdy je elektrická energie využívána k vytápění. Jistý vliv má i snížení produkce obnovitelných zdrojů energie, zejména slunečních elektráren, toto snížení je do jisté míry nahrazováno plynem. Během sledovaných tří let lze pozorovat výrazný trend zvyšování produkce z plynu, je to dáno zvyšující se popularitou plynu jako zdroje energie v minulé dekádě a nahrazování uhlí jako zdroje energie.

V samotném řešení modelu vystupuje proměnná Y nikoliv jako výše představená hodnota průměrné měsíční výroby, ale jako relativní změna této hodnoty oproti minulému měsíci. Pokud například bude proměnná Y v lednu 5000 MW a v únoru 6000 MW, bude proměnná Y v modelu v měsíci únor zobrazena jako rozdíl měsíců únor a leden dělený hodnotou v lednu. Relativní změna pro únor tedy bude 0,2. Tato hodnota představuje 20%

nárůst oproti předchozímu měsíci. Graf 3 zobrazuje relativní změny oproti minulému měsíci průměrné měsíční výroby plynových elektráren.

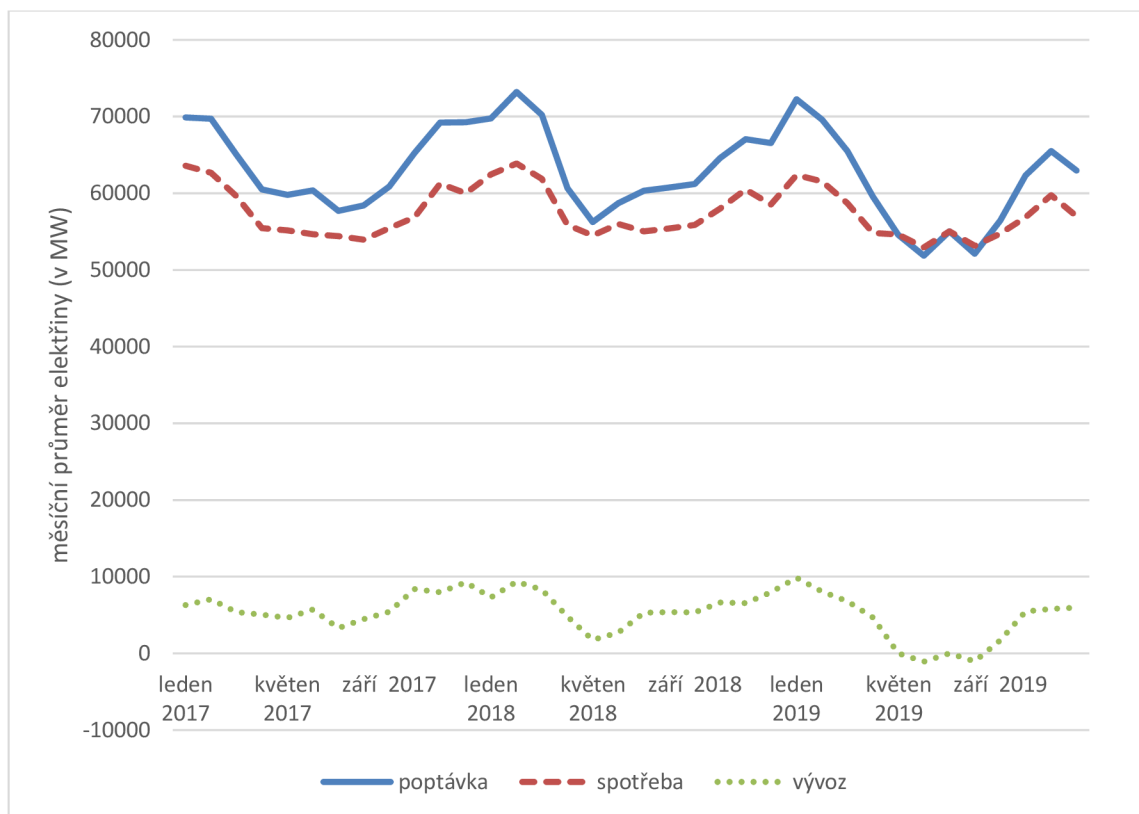


Graf 3: Vývoj relativní změny výroby z plynu během let 2017–2019. (zdroj: vlastní zpracování dle (21))

Z grafu je zřejmá vysoká kolísavost proměnné, zejména ke konci roku 2017 a začátkem roku 2018 jsou vidět velké skoky mezi jednotlivými měsíci. Do jisté míry je to způsobeno flexibilní povahou plynových elektráren, které jsou schopny poměrně rychle a levně vyrobit potřebné množství energie, a nemají problém vyrábět různá množství elektřiny v různých měsících.

Poptávka elektřiny

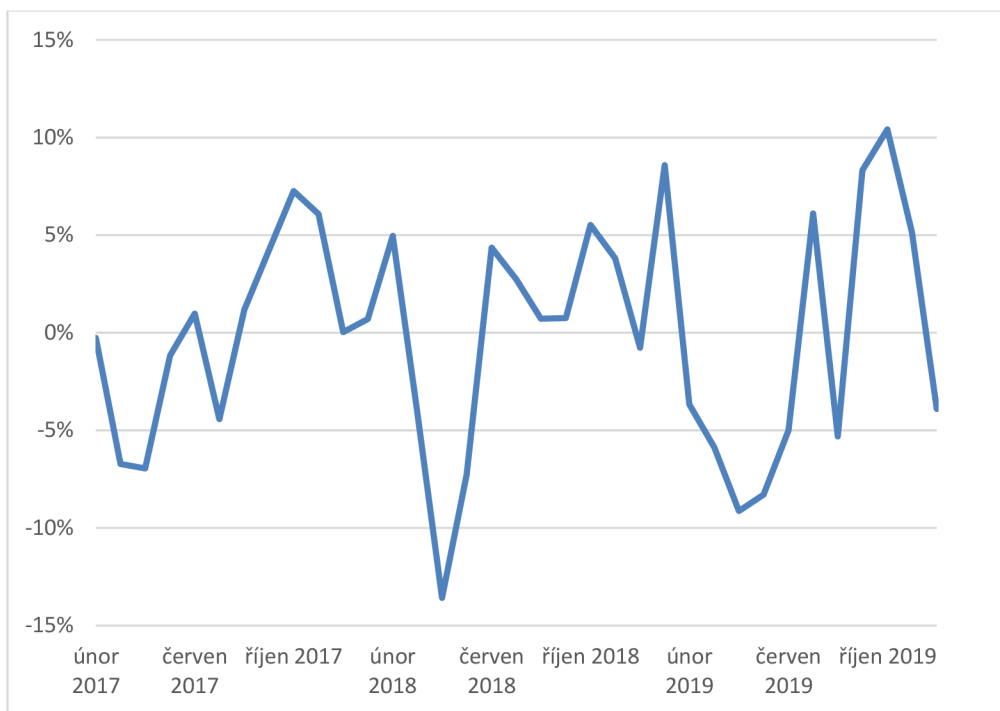
Proměnnou X_1 představuje poptávka elektřiny na německém trhu. Je tvořena součtem dvou dílčích proměnných, a to spotřebou elektřiny v Německu a vývozem elektřiny z Německa do zahraničí. Poptávka elektřiny X_1 je stejně jako proměnná Y uvedena v megawattech. V grafu 4 je zobrazen vývoj poptávky, spotřeby a vývozu během let 2017 až 2019. Zdrojem dat je entso-e transparency platform.



Graf 4: Vývoj poptávky po elektřině na německém trhu (zdroj: vlastní zpracování dle (19) a (20))

Poptávka elektřiny je zpravidla větší než spotřeba, protože Německo je častěji vývozcem elektřiny než dovozcem. Výjimku tvořily letní měsíce roku 2019, kdy Německo importovalo více elektrické energie, než exportovalo. V textu popisujícím výrobu plynu byla zmíněna zvýšená produkce plynových elektráren v zimních měsících, tuto skutečnost podporuje obecně zvýšená poptávka po elektrické energii během zimy. Během ní je poptáváno přibližně o 10 000 MW více než v létě. Nicméně rozdíl mezi zimou a létem se může zásadně rozlišovat dle délky a tuhosti zimy. Na druhou stranu horké letní měsíce také mohou spotřebovávat více energie v rámci chlazení, klimatizací apod.

V samotném modelu místo průměrných hodnot poptávky elektřiny vystupuje opět relativní změna oproti předchozímu měsíci. Vývoj této změny zobrazuje graf číslo 5.

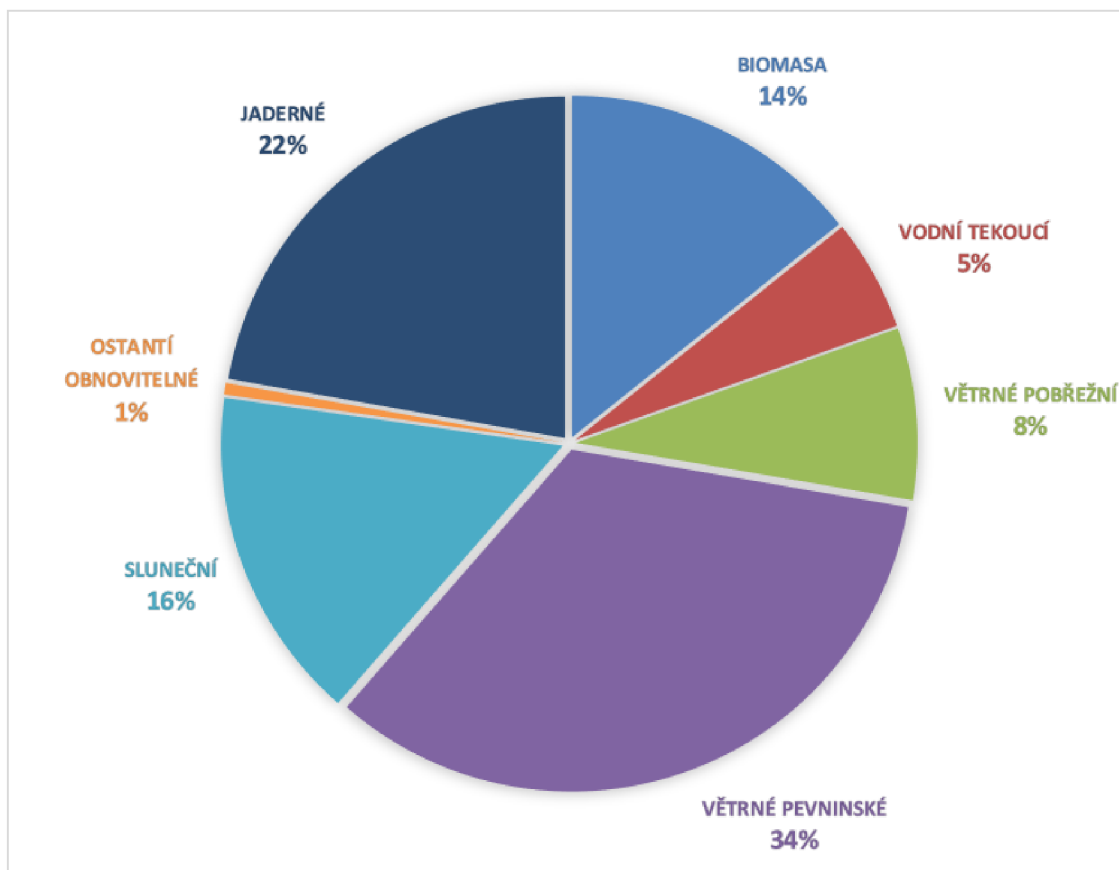


Graf 5: Vývoj relativní změny poptávky (zdroj: vlastní zpracování dle (19) a (20))

Největšího poklesu dosáhla poptávka v porovnání s předchozím měsícem na jaře 2018, i v ostatních jarních měsících jsou poklesy největší, protože s koncem zimy přichází také snížení spotřeby. Ovšem i pokud nebude brána v potaz sezónnost, je poptávka po elektřině poměrně kolísavá a mění se v rámci měsíců. V první polovině roku 2019 je patrné snižování poptávky, což se promítá v hodnotách předchozího grafu masivním poklesem v letních měsících 2019.

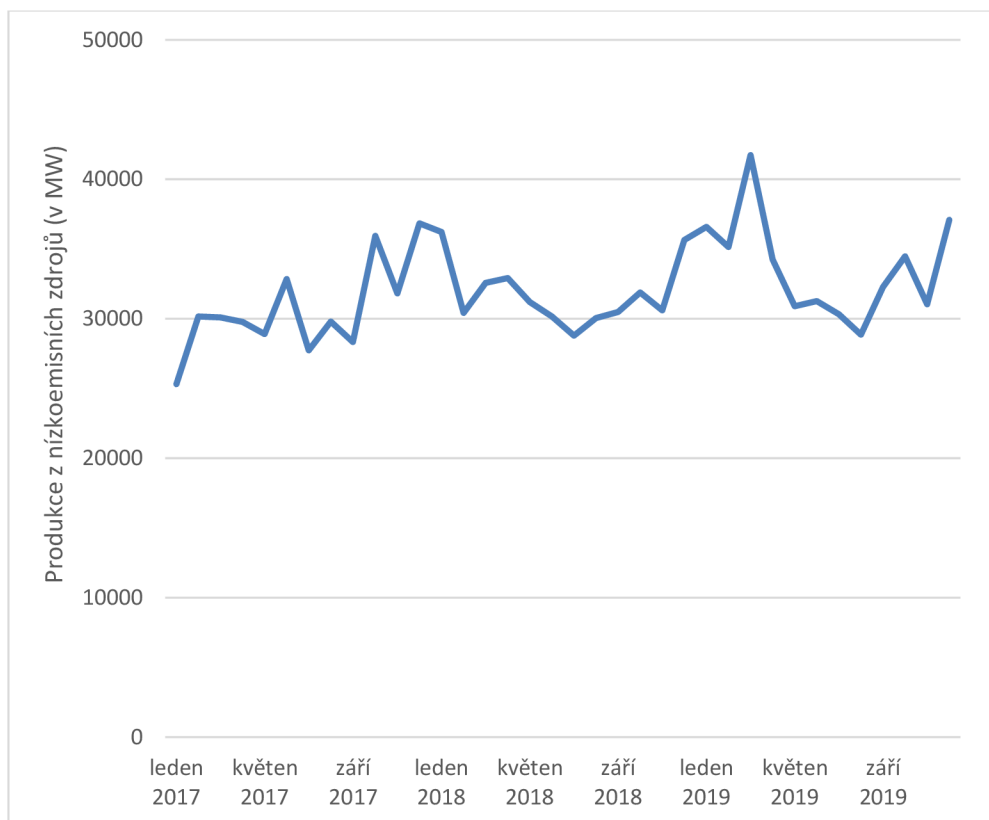
Výroba elektřiny z nízkoemisních zdrojů

Proměnnou X_2 tvoří produkce elektrické energie z nízkoemisních zdrojů. Pod nízkoemisní zdroje bylo zahrnuto hned několik druhů elektráren, respektive způsobů výroby elektřiny. Zdrojem dat je entso-e transparency platform, do nízkoemisních zdrojů byly zahrnuty následující elektrárny: Elektrárny na biomasu, vodní elektrárny na tekoucí vodě, větrné elektrárny na pobřeží i ve vnitrozemí, sluneční elektrárny, jaderné elektrárny a pak zbylé menší obnovitelné zdroje elektřiny. Podíl jednotlivých druhů elektráren na souhrnné proměnné výrobě z nízkoemisních zdrojů zobrazuje graf 6.



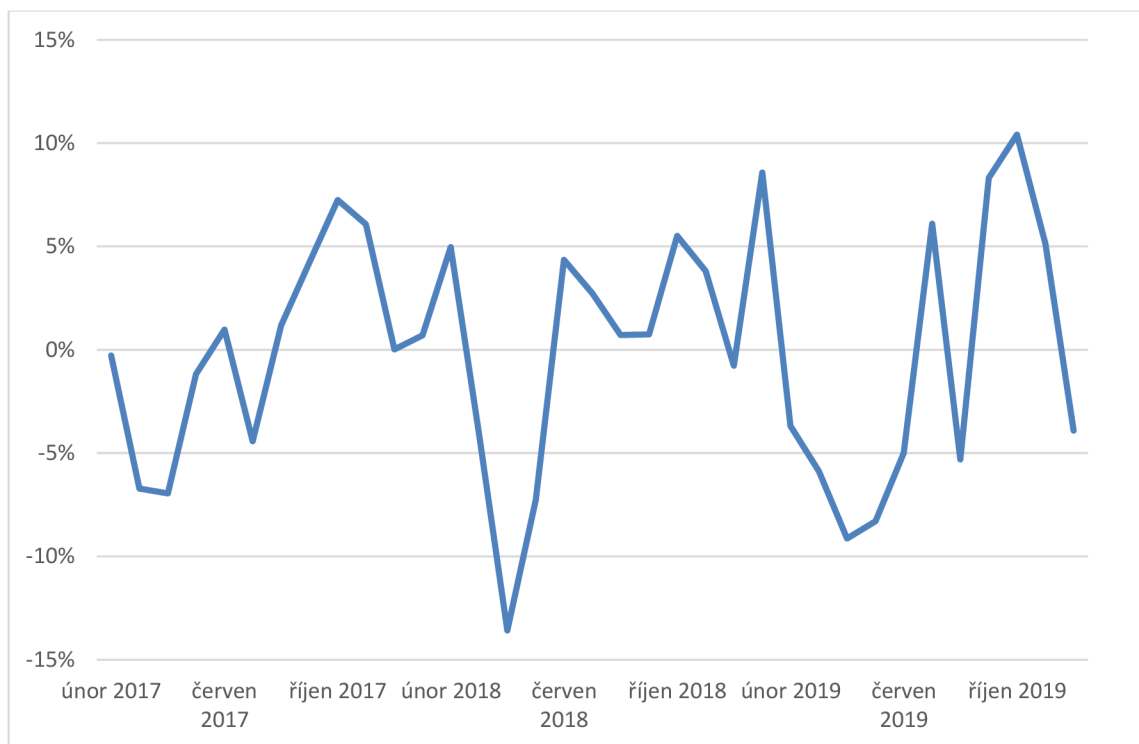
Graf 6: Složení nízkoemisních zdrojů (zdroj: vlastní zpracování dle (21))

Největší podíl na produkci elektřiny z nízkoemisních zdrojů mají větrné elektrárny, více než třetina celkové nízkoemisní elektrické energie pocházela z pevninských (onshore) větrných elektráren. Při připočtení pobřežních (offshore) elektráren společně větrné elektrárny produkovali přes 40 % nízkoemisní elektrické energie v letech 2017 až 2019. Velkou část tvořily jaderné elektrárny, s těmi se ale v Německu do budoucna nepočítá a v roce 2023 lze s jistotou říci, že v následujících letech dojde k jejich úplnému vyřazení. Přibližně 15% podíl mají elektrárny sluneční a elektrárny na biomasu a nejmenší asi 5% podíl mají vodní elektrárny, pokud se odhlédne od ostatních zdrojích obnovitelné energie, které představují asi 1 %. Souhrnnou průměrnou měsíční produkci elektřiny z nízkoemisních zdrojů zachycuje graf 7.



Graf 7: Vývoj produkce z nízkoemisních zdrojů (zdroj: vlastní zpracování dle (21))

V datech lze spatřit výkyvy v rámci průměrů jednotlivých měsíců, které odpovídají závislosti některých významných nízkoemisních zdrojů na počasí nebo klimatických podmínkách a jsou tak do jisté míry nepředvídatelné. Data mají mírný rostoucí trend a sezónnost. Vývoj relativní změny proměnné X_2 popisuje graf 8.



Graf 8: Vývoj relativní změny produkce nízkoemisních zdrojů (zdroj: vlastní zpracování dle (21))

Změna proměnné X_2 má kolísavý charakter, k výrazným propadům produkce z nízkoemisních zdrojů došlo v první polovině let 2018 a 2019, kdy meziměsíční poklesy dosahovali téměř 15 a 10 procent.

Relativní konkurenceschopnost uhlí a plynu

Vysvětlující proměnnou X_3 je relativní konkurenceschopnost elektráren spalujících zemní plyn a černé uhlí. Tato proměnná nabývá hodnot v intervalu od 0 do 1. Relativní konkurenceschopnost plynu a uhlí je určena následujícím vztahem:

$$X_3 = \frac{GasP - FSmin.}{FSmax. - FSmin.} \quad (20)$$

kde:

X_3 – relativní konkurenceschopnost plynu a uhlí,

$GasP$ – cena plynu,

$FSmin.$ – spodní hranice fuel-switchingu

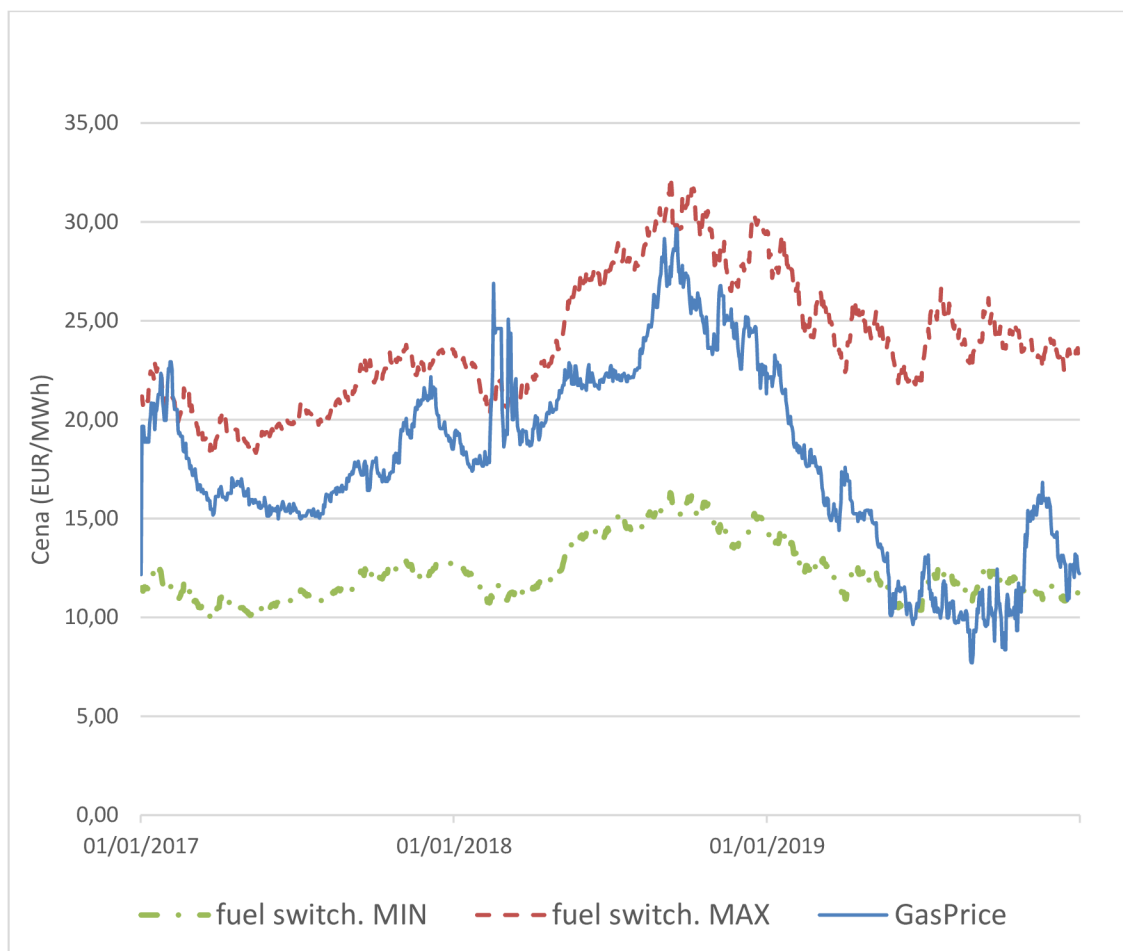
$FSmax.$ – horní hranice fuel-switchingu.

GasP – cena zemního plynu,

FSmin. – spodní hranice fuel-switchingu

FSmax. – horní hranice fuel-switchingu.

Spodní a horní hranice fuel-switchingu představují hranice intervalu 0 a 1. Cena plynu *GasP* představuje pozici proměnné X_3 v tomto intervalu. Pozici proměnné X_3 v intervalu v rámci let 2017 až 2019 zobrazuje graf. 9. Hranice intervalu tvoří maximální fuel-switching a minimální fuel-switching, popsané také jako fuel switch. MAX a fuel switch. MIN. Cena plynu je uvedena pro TTF plyn.



Graf 9: Vývoj ceny plynu v intervalu fuel-switchingu (zdroj: vlastní zpracování)

Lze pozorovat, že cena plynu se většinu sledovaného období držela uvnitř vymezeného intervalu, výjimku tvoří několik dní v únoru 2017 a také únoru 2018, kdy cena plynu překročila horní interval. Značnou část roku 2019 byla naopak cena plynu pod spodní hranicí fuel-switchingu.

Spodní hranice fuel-switchingu je určena následujícím vztahem:

$$FS_{min.} = \left(\frac{CoalP}{\frac{CR \cdot EURUSD}{CoalE_{min}}} + EUA \cdot (CO2_{int}C_{min} - CO2_{int}G_{min}) \right) \cdot GasE_{min}, \quad (21)$$

kde:

CoalP – cena černého uhlí API2 v USD

CR – míra převodu 1 tuny uhlí na MWh energie

EURUSD – kurz EUR/USD

CoalE_{min.} – minimální účinnost uhlí ve fuel-switchingu,

EUA – cena emisní povolenky,

CO_{2int}.C_{min} – minimální emisní náročnost černého uhlí,

CO_{2int}.G_{min} – minimální emisní náročnost zemního plynu

GasE_{min.} – minimální účinnost zemního plynu ve fuel-switchingu,

Obdobným způsobem je určena horní hranice fuel-switchingu:

$$FS_{max.} = \left(\frac{CoalP}{\frac{CR * EURUSD}{CoalE_{max}}} + EUA \cdot (CO2_{int}C_{max} - CO2_{int}G_{max}) \right) \cdot GasE_{max}, \quad (22)$$

kde:

CoalE_{max.} – maximální účinnost uhlí ve fuel-switchingu

CO_{2int}.C_{max} – maximální emisní náročnost černého uhlí

CO_{2int}.G_{max} – maximální emisní náročnost zemního plynu

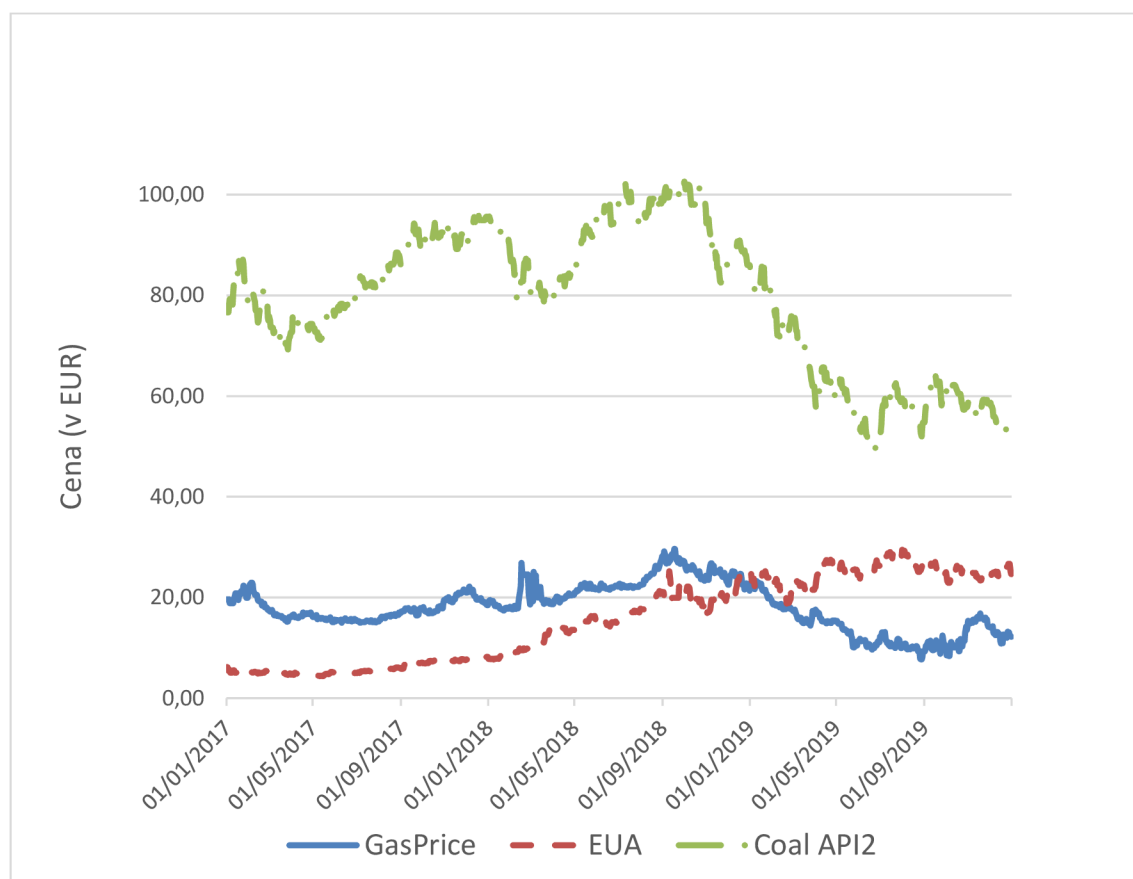
GasE_{max.} – maximální účinnost zemního plynu ve fuel-switchingu

Přítomnost kurzu EURUSD ve vztahu je zapříčiněna skutečností, že černé uhlí API2 se zpravidla obchoduje v dolarech, zatímco emisní povolenky *EUA* v eurech. Pokud by nastala situace, kdy vstupní ceny černého uhlí a emisních povolenek už jsou ve stejné měně, byla by přítomnost kurzu ve vztahu nežádoucí. Data cen černého uhlí, zemního plynu, emisní povolenky a kurzu EUR/USD jsou počítány na denní bázi. Ve vztahu se dále objevují veličiny, u kterých byly dohledány a použity následující hodnoty.

Tabulka 4: Hodnoty veličin pro výpočet mezních hodnot intervalu fuel-switchingu (zdroj: vlastní zpracování)

Veličina	zkratka	hodnota
míra převodu 1 tuny uhlí na MWh	CR	6,98
účinnost černého uhlí při minimálním FS	CoalEmin.	0,46
účinnost černého uhlí při maximálním FS	CoalEmax	0,34
minimální emisní náročnost černého uhlí	CO2int.Cmin	0,74
maximální emisní náročnost černého uhlí	CO2int.Cmax	1,00
účinnost zemního plynu při minimálním FS	GasEmin.	0,46
účinnost zemního plynu při maximálním FS	GasEmax	0,6
minimální emisní náročnost zemního plynu	CO2int.Gmin	0,4
maximální emisní náročnost zemního plynu	CO2int.Gmax	0,3

Vývoj podružných proměnných cena plynu TTF (ve vzorci jako GasP), cena uhlí API2 (CoalP) a cena emisních povolenek (EUA) je zobrazen v grafu 10.

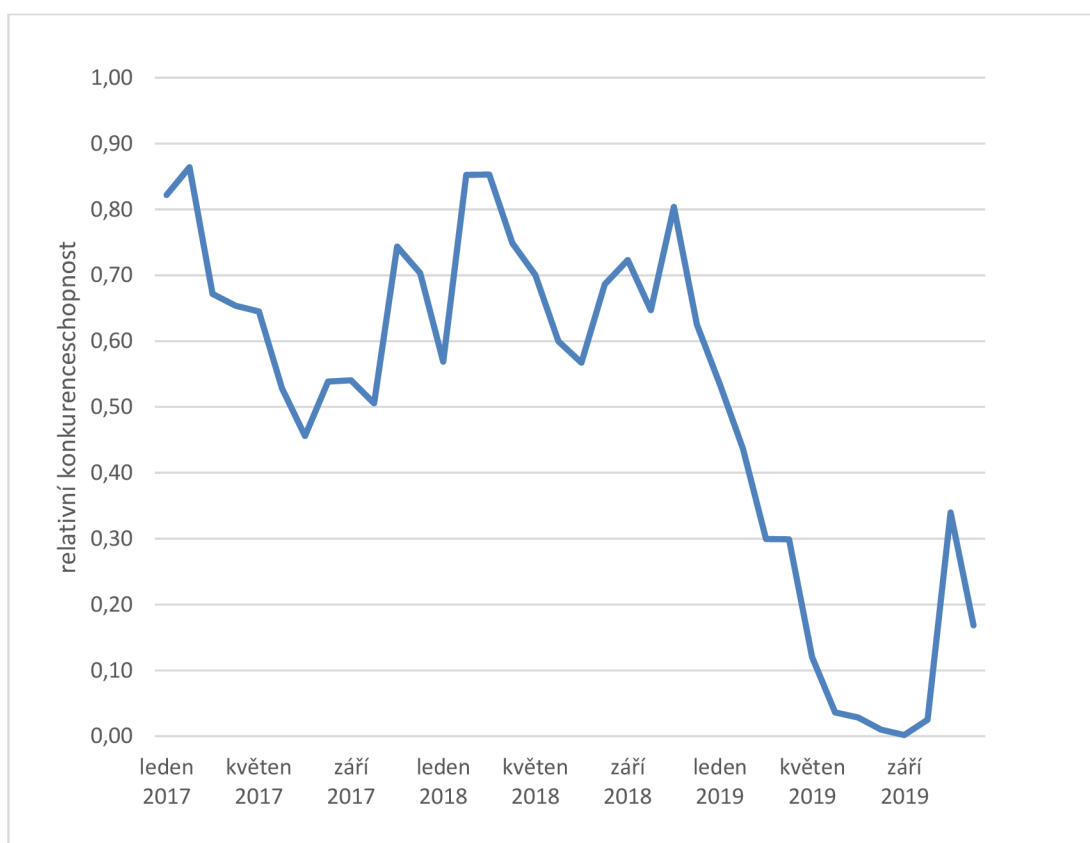


Graf 10: Vývoj ceny plynu, uhlí a emisních povolenek (zdroj: vlastní zpracování dle (22) a (23))

Zdrojem dat ceny plynu a emisních povolenek byla Intercontinental Exchange Inc., zdrojem dat ceny uhlí byla European Energy Exchange AG.

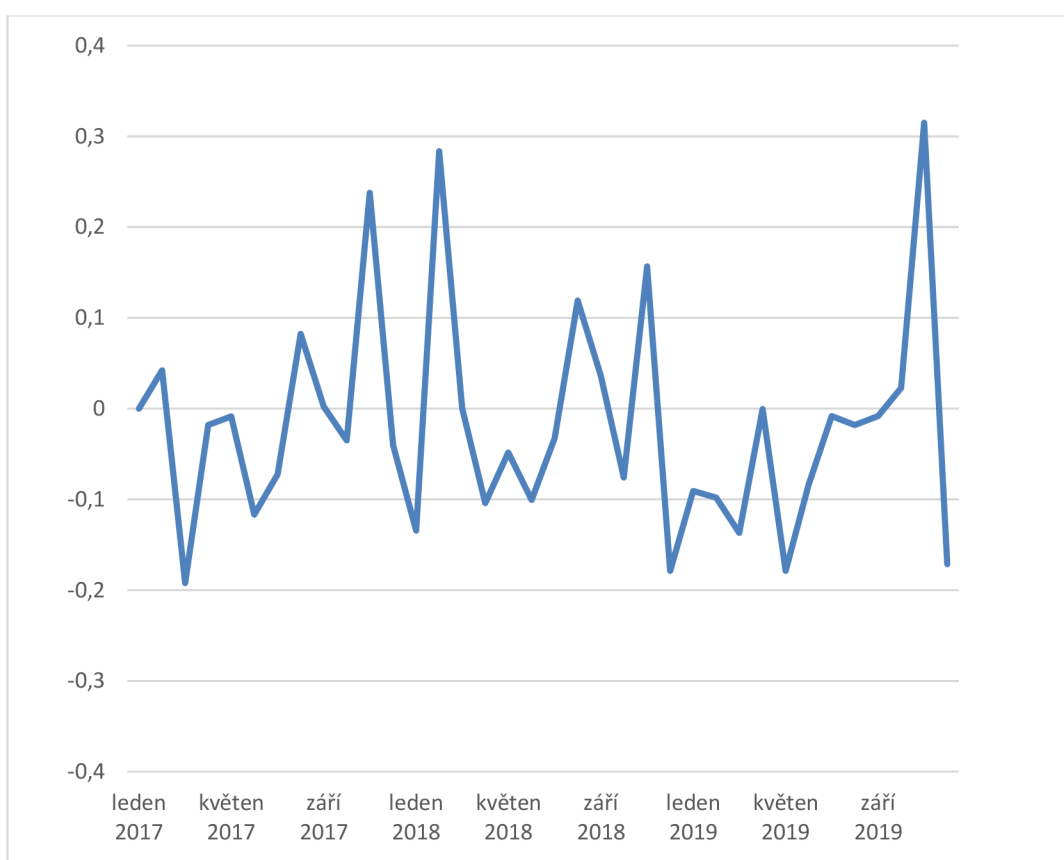
Přítomnost faktoru konkurenceschopnosti uhlí a plynu v modelu je důležitá zejména proto, že v porovnání s ostatními palivy jsou černé uhlí a zemní plyn vzájemnými substituty. Předpokládá se, že vyšší produkce energie z černého uhlí působí negativně na produkci energie ze zemního plynu a obráceně.

Co se samotné interpretace faktoru X_3 týče, pokud je hodnota X_3 nulová, i ta nejméně efektivní výroba elektrické energie ze zemního plynu je výhodnější než ta nejvíce efektivní výroba z černého uhlí. Naopak pokud je hodnota X_2 jedna, i ta nejvíce efektivní výroba elektřiny z plynu je méně výhodná než ta nejméně efektivní výroba z uhlí. U faktoru X_2 se očekává záporná korelace, pokud vzroste hodnota konkurenceschopnosti uhlí, předpokládá se snížení množství výroby z plynu Y . Vývoj průměrné měsíční vzájemné relativní konkurenceschopnosti uhlí a plynu v letech 2017–2019 zobrazuje graf 11.



Graf 11: Vývoj vzájemné relativní konkurenceschopnosti uhlí a plynu (zdroj: vlastní zpracování)

V letech 2017 a 2018 se hodnota proměnné X_3 držela zpravidla nad 0,5 a produkce elektřiny z uhlí tak měla relativní výhodu. To se změnilo koncem roku 2018 a v roce 2019 lze spatřit klesající hodnotu X_3 , která se dostala až na dno intervalu a pak mírně vzrostla ke konci 2019. Pro správnou funkci proměnné v modelu je žádoucí, aby velká část sledovaného období byla uvnitř intervalu, což se pro sledované roky 2017, 2018 a 2019 povedlo. Je ovšem dobré zmínit, že v modelu se pracuje s průměrnou měsíční hodnotou, takže ojedinělé případy dní, kdy se cena plynu nevyskytovala v intervalu byly naměřeny v únoru 2017 a březnu 2018. Nicméně drtivá většina období spadá do hodnot 0 až 1. Vývoj relativní změny konkurenceschopnosti uhlí a plynu v letech 2017–2019 zachycuje graf 12.

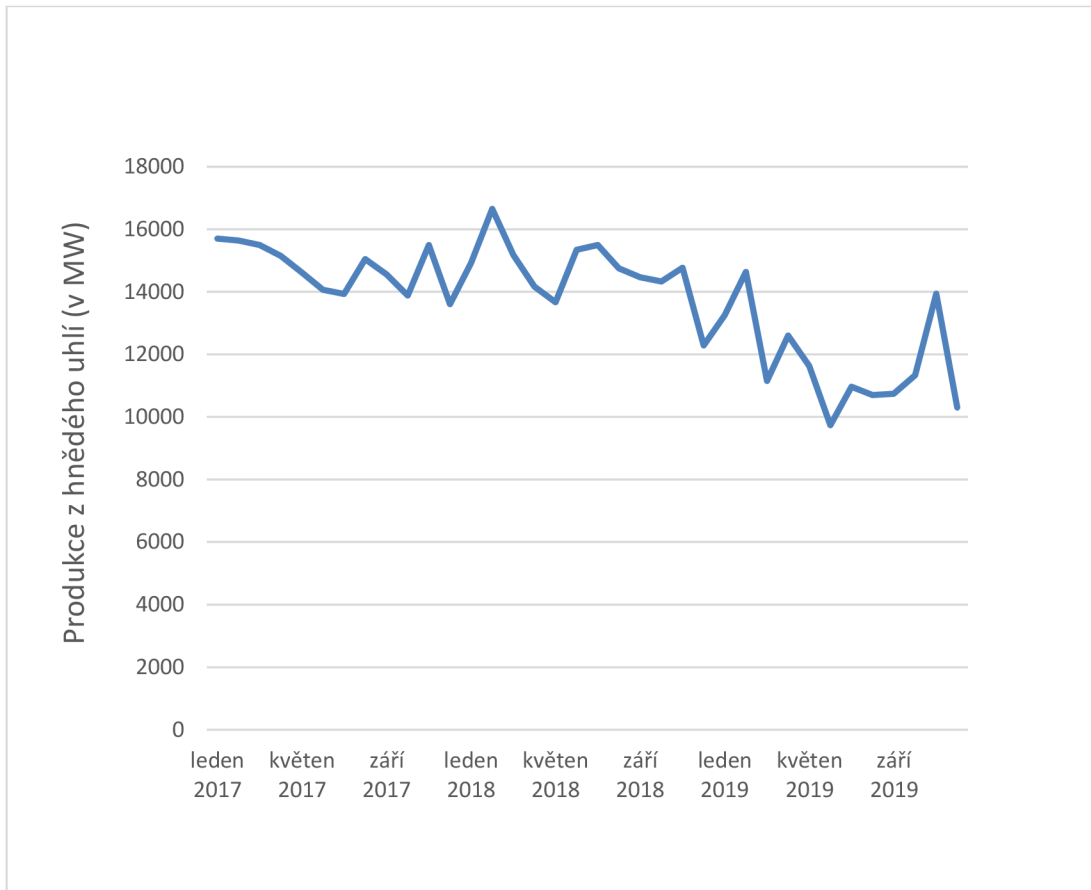


Graf 12: Vývoj relativní změny konkurenceschopnosti uhlí a plynu v letech 2017–2019 (zdroj: vlastní zpracování)

Na rozdíl od jiných grafů zobrazujících vývoj relativní změny v této kapitole, graf není změna v procentech, ale jedná se o rozdíl mezi současným a předchozím měsícem. Pokud například měsíc leden měl relativní hodnotu konkurenceschopnosti 0,6 a měsíc únor 0,5, potom relativní změna v modelu pro měsíc únor bude uvedena jako $0,5 - 0,6 = -0,1$.

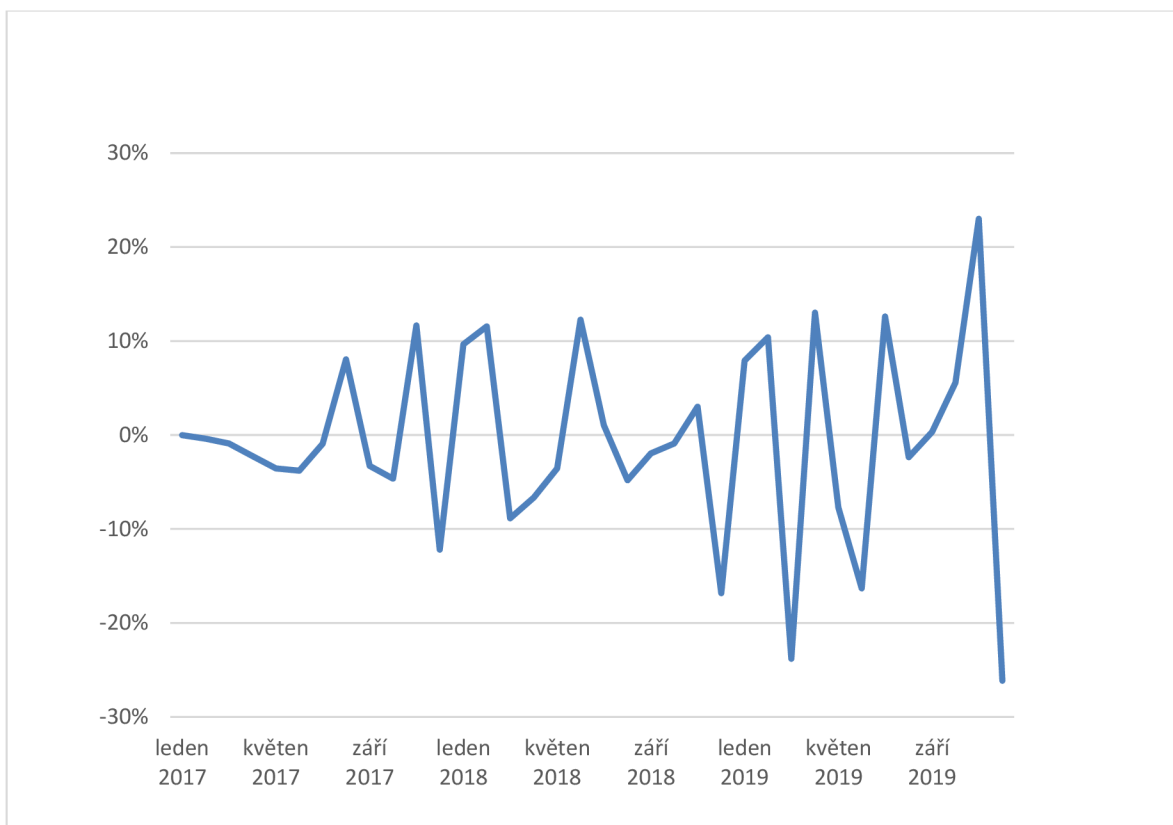
Výroba elektřiny z hnědého uhlí

Proměnná X_4 představuje výroba elektrické energie z hnědého uhlí neboli lignitu. Vývoj proměnné X_4 během let 2017–2019 lze vidět v grafu 13.



Graf 13: Vývoj produkce z lignitu v letech 2017–2019 (zdroj: vlastní zpracování dle (21))

Využití lignitu podléhá silnému klesajícímu trendu, což není překvapující vzhledem ke skutečnosti, že popularita a využití hnědého uhlí jako paliva v Německu klesá. Zatímco v roce 2017 v Německu byli aktivní průměrně hnědouhelné elektrárny o výkonu asi 15 000 MW, v roce 2019 už to byly elektrárny o výkonu spíše 11 MW. Klesající tendenci vývoje relativní meziměsíční změny průměrných měsíčních hodnot produkce z lignitu zobrazuje graf 14.



Graf 14: Vývoj relativní změny produkce z hnědého uhlí (zdroj: vlastní zpracování dle (15))

I zde je patrný výrazný pokles, kdy zejména během roku 2019 docházelo k meziměsíčním poklesům i o 25 %. Zajímavá je zvětšující se kolísavost v průběhu let, kdy během roku 2017 byli nejvyšší meziměsíční rozdílů kolem 20 %, typicky z růstu 10 % do poklesu 10 %, ale v roce 2019 byl největší skok z růstu přesahujícího 20 % do poklesu o více než 25 %.

3.3 Korelační analýza a popisná statistika

V následující kapitole bude řešena problematika multikorelace a popisná statistika potenciálních proměnných vystupujících v řešení modelu.

Korelační analýza

Vzájemnou korelaci faktorů zobrazuje korelační matice, v sloupcích vystupují příslušné potenciální proměnné modelu, od proměnné Y , který představuje množství výroby v plynových elektrárnách, až po proměnné X_1 až X_4 . V řádcích jsou uvedeny tytéž proměnné, hodnota matice dvou příslušných proměnných ukazuje hodnotu korelace mezi

danými dvěma proměnnými. Nepřekvapivě korelace stejných proměnných, tzn. korelace proměnné sama se sebou je 1.

Tabulka 5: Korelační matice faktorů (zdroj: vlastní zpracování)

	Y - plyn	X1 - popt.	X2 -nízkoem.	X3 -rel. kon.	X4 - lignit
Y - plyn	1,000				
X1 - popt.	0,554	1,000			
X2 - nízkoem.	-0,405	0,144	1,000		
X3 - rel. kon.	0,214	0,433	-0,355	1,000	
X4 - lignit	0,304	0,086	-0,084	-0,200	1,000

Pro správnou funkci modelu je nutná vzájemná nezávislost vysvětlujících proměnných. Na základě korelační matice by došlo k vyloučení proměnných, které mají příliš vysokou korelaci k jiné vysvětlující proměnné. Absolutní hodnota korelace by dle literatury neměla překročit 0,8. Nejvyšší naměřená korelace dvou X proměnných vychází mezi množstvím poptávky a relativní konkurenceschopností o hodnotě 0,433, což nepřekračuje hraničních 0,8 a multikorelace se mezi proměnnými nevyskytuje.

Popisná statistika

Pro lepší přehlednost budou představeny dvě tabulky řešící popisnou statistikou proměnných modelu. První popisná statistika je vytvořena na základě průměrných měsíčních hodnot proměnných, v které je lépe zobrazena povaha zdrojových dat, zatímco druhá tabulka řeší popisnou statistiku pro meziměsíční změny měsíčních průměrů hodnot proměnných, protože samotné řešení regresního modelu je v případě této práce řešeno v rámci meziměsíčních změn., v sloupcích opět vystupují příslušné potenciální proměnné modelu, od proměnné Y, který představuje množství výroby v plynových elektrárnách, až po proměnné X₁ až X₄. Popisná statistika pro hodnoty proměnných je vidět v tabulce 6.

Tabulka 6: Popisná statistika proměnných (zdroj: vlastní zpracování)

	Y - plyn	X1 - poptávka	X2 - nízkoe.	X3 - rel. konk.	X4 - lignit
Stř. hodnota	4691	62862	32015	0,51	13729
Chyba stř. hodnoty	301	955	548	0,04	302
Medián	4714	61768	31107	0,57	14251
Směr. odchylka	1805	5728	3288	0,27	1812
Rozptyl výběru	3257562	32807701	10812262	0,07	3283839
Špičatost	-1,18	-0,85	0,92	-0,62	-0,53
Šikmost	0,15	-0,04	0,77	-0,72	-0,76
Rozdíl max-min	6150	21349	16428	0,86	6918
Minimum	1686	51859	25309	0,00	9735
Maximum	7836	73208	41736	0,86	16653
Součet	168863	2263035	1152530	18,35	494243
Počet	36	36	36	36	36

Z tabulky 6 lze vidět podrobnosti datové sady jednotlivých proměnných, jako jsou střední hodnota, chyba střední hodnoty, medián, směrodatná odchylka, ale i například minimální hodnotu, maximální hodnotu a rozdíl mezi nimi. Protože každá proměnná figuruje v jiných velikostech hodnot, je těžké je mezi sebou porovnat. I proto z dat představených výše byly vypočítány meziměsíční změny průměrných měsíčních hodnot a ty jsou uvedeny v procentech. Popisná statistika těchto dat je v tabulce 7.

Tabulka 7: Popisná statistika změny proměnných (zdroj: vlastní zpracování)

	Y – plyn	X1 – poptávka	X2 – nízkoe.	X3 - rel. konk.	X4 – lignit
Stř. hodnota	3,89 %	-0,13 %	1,67 %	-1,87 %	-0,62 %
Chyba stř. hodnoty	4,54 %	0,99 %	1,86 %	2,09 %	1,81 %
Medián	-3,52 %	0,71 %	-0,26 %	-3,24 %	-0,94 %
Směr. odchylka	26,86 %	5,84 %	10,98 %	12,34 %	10,68 %
Rozptyl výběru	7,21 %	0,34 %	1,20 %	1,52 %	1,14 %
Špičatost	27,43 %	-67,62 %	-32,03 %	124,76 %	37,89 %
Šikmost	51,40 %	-20,57 %	38,28 %	111,80 %	-31,54 %
Rozdíl max-min	122,31 %	24,00 %	44,91 %	50,73 %	49,16 %
Minimum	-44,39 %	-13,58 %	-17,96 %	-19,22 %	-26,15 %
Maximum	77,93 %	10,42 %	26,96 %	31,50 %	23,01 %
Součet	136,22 %	-4,58 %	58,30 %	-65,34 %	-21,64 %
Počet	35	35	35	35	35

Střední hodnota znázorňuje trend dat, například proměnný Y se střední hodnotou 3,89 % v postupem měsíců roste. Mírný růst je i u X₂, na druhou stranu proměnné X₁, X₃ a X₄ mírně klesají. Počet pozorování je o jedna menší, tedy 35, to je dáno skutečností, že v rámci 36 měsíců dochází k 35 meziměsíčním změnám.

4 VLASTNÍ NÁVRHY

V rámci návrhové části bude představeno konkrétní řešení ekonometrického modelu, které bude otestováno v rámci testu autokorelace, heteroskedasticity a významnosti. Dále bude ověřena prognostická schopnost modelu, v rámci ověření bude spočítána přesnost modelu na zdrojových datech z let 2017 až 2019. Následně bude ověřena použitelnost modelu mimo období zdrojových dat a model tak bude otestován na datech pro rok 2021. V neposlední řadě bude představena možná aplikace modelu na smyšleném scénáři a na závěr bude následovat diskuse a zhodnocení získaných poznatků.

4.1 Ekonometrický regresní model

Využitím softwaru byl vytvořen návrh regresního modelu, jehož koeficienty a p-hodnoty proměnných lze vidět v tabulce 8.

Tabulka 8: Koeficienty a p-hodnoty proměnných (zdroj: vlastní zpracování)

Proměnná	Koeficienty	Hodnota P
Hranice	-0,52019	0,4294
X1 – poptávka	4,28908	7,1600E-07
X2 – nízkoemisní	-2,0056	1,9519E-05
X3 - rel. konk.	-0,7065	0,02357
X4 – lignit	-0,7028	0,12291

Vysvětlovanou proměnnou je proměnná Y, která zastupuje množství elektrické energie vyrobené z plynu jako zdroje v Německu, přesněji řečeno její hodnoty meziměsíčních změn průměrných měsíčních hodnot. První vysvětlující proměnná X₁, která představuje hodnotu meziměsíčních změn průměrných měsíčních hodnot poptávky po elektrické energii na německém trhu, má p-hodnotu $7,16 \times 10^{-7}$ a tudíž nepřekračuje svou p-hodnotou hranici 0,05, což je maximální přípustná hodnota pro určenou hladinu významnosti modelu 95 %. Ani proměnná X₂, představující meziměsíční změny

průměrného měsíčního množství elektřiny vyrobené z nízkoemisních zdrojů, nepřesahuje p-hodnotou 0,05. Relativní konkurenceschopnost X_3 má p-hodnotu v této verzi modelu 0,0236, což je nejvyšší p-hodnota ze všech vysvětlujících proměnných, ale stále je menší než 0,05. Oproti tomu proměnná X_4 reprezentující meziměsíční změnu průměrného měsíčního množství elektřiny v Německu vyrobené z hnědého uhlí/lignitu jako paliva má p-hodnotu 0,1229, což překračuje povolenou hranici 0,05. Znamená to, že existuje více než 12% šance, že zjištěný vliv proměnné X_4 na vysvětlovanou proměnnou Y v modelu je způsoben náhodnou složkou. V následující části bude vytvořen nový návrh modelu, ve kterém X_4 už nebude vystupovat.

Řešení regresního modelu

Tabulka 9 níže zobrazuje přepočítané hodnoty koeficientů a p-hodnoty proměnných po vyřazení proměnné X_4 z modelu. Vyřazení vysvětlující proměnné má jistý vliv na ostatní hodnoty koeficientů a p-hodnoty zbylých proměnných, je tedy nutné znovu ověřit, že všechny vysvětlující proměnné X mají p-hodnotu nižší než 0,05 a tudíž šance, že by jejich naměřená souvislost s proměnnou Y v modelu byla způsobena náhodným elementem je menší než 5 %.

Tabulka 9: Koeficienty a p-hodnoty výsledného modelu (zdroj: vlastní zpracování)

Proměnná	Koeficienty	Hodnota P
Hranice	-1,0589	0,071391
X1 – poptávka	3,705513	6,42E-07
X2 – nízkoemisní	-1,59118	1,16E-05
X3 – rel. konk.	-0,79488	0,012031

Rychlým pohledem je zřejmé, že vyřazení X_4 z modelu mělo minimální vliv na p-hodnoty ostatních proměnných a nedošlo k překročení maximální přípustné hodnoty 0,05 u žádné z proměnných. Vliv všech zbylých X proměnných na zkoumaný jev je tedy statisticky

prokazatelný a v následujícím kroku lze sestavit rovnici regresního modelu z koeficientů proměnných a koeficientu hranice. Výsledná rovnice je zobrazena níže.

$$Y = -1,0589 + 3,7055 X_1 - 1,5912 X_2 - 0,7949 X_3 \quad (22)$$

Interpretace modelu:

- Pokud se zvýší množství poptávané elektřiny na německém trhu o 1 %, zvýší se množství produkované elektřiny z plynu o 3,71 %.
- Pokud se zvýší množství produkce z nízkoemisních zdrojů o 1 %, sníží se množství produkované elektřiny z plynu o 1,59 %.
- Pokud se zvýší relativní konkurenceschopnost uhlí a plynu o 0,01 v rámci intervalu, sníží se množství produkované elektřiny z plynu o 0,79 %.

Regresní statistika daného modelu je v tabulce 10.

Tabulka 10: Regresní statistika modelu (zdroj: vlastní zpracování)

Násobné R	0,794382
Hodnota spolehlivosti R	0,631043
Nastavená hodnota spolehlivosti R	0,595338
Chyba stř. hodnoty	0,170835
Pozorování	35

Pod pojmem násobné R se skrývá koeficient korelace, která měří závislost mezi proměnnými X a vysvětlovanou proměnnou Y. Hodnota 1 značí absolutní závislost, zatímco 0 závislost neexistující. Hodnota 0,7944 značí poměrně silnou závislost v modelu.

Hodnota spolehlivosti R představuje koeficient determinace, což je ukazatel kvality regresního modelu. Ve své základní podobě vyjadřuje, jaký podíl variability závisle proměnné model vysvětluje. Koeficient determinace může nabývat hodnoty maximálně,

což je situace dokonalé predikci hodnot závisle proměnné. Naopak hodnota 0 znamená, že model nepřináší pro poznání závisle proměnné žádnou informaci, je zcela neúčinný.

(24)

Koeficient determinace je druhou mocninou koeficientu korelace, v modelu vyšel jako 0,631 což znamená, že model vysvětluje 63 % změn proměnné Y. Je zde výrazná nevysvětlená část modelem, ale i přesto je 63 % uspokojivý výsledek.

Statistické ověření modelu

Testování modelu probíhá na 95 % hladiny významnosti, která obecně zajišťuje 95% šanci, že nedojde mylnému vyložení hypotézy. K proměnným byli přiřazeny tzv. konfidenční intervaly, které na zmíněné hladině spolehlivosti zajišťují 95% šanci, že zmíněná hodnota modelu bude uvnitř daného konfidenčního intervalu. Koeficienty proměnných modelu včetně konfidenčních intervalů zobrazuje tabulka 11.

Tabulka 11: Konfidenční intervaly proměnných modelu (zdroj: vlastní zpracování)

	Koeficienty	Dolní 95 %	Horní 95 %
Hranice	-1,0589	-2,21567	0,097873
X ₁ – poptávka	3,705513	2,492097	4,918929
X ₂ – nízkoemisní	-1,59118	-2,21359	-0,96878
X ₃ – rel. konk.	-0,79488	-1,40255	-0,1872

Z konfidenčních intervalů lze potvrdit existenci 95% šance, že hodnota konstanty rovnice modelu bude v rozmezí -2,2156 a 0,0978. Pro proměnnou X₁ je šance 95 %, že koeficient bude v rozmezí 2,4921 a 4,9189 apod.

Test statistické významnosti modelu

V následující části bude proveden statistický test významnosti modelu, testováno je na hladině významnosti 5 %. Jsou stanoveny následující hypotézy H₀ a H₁

- H₀: $\beta_i = 0$, β_i model je statisticky nevýznamný
- H₁: $\beta_i \neq 0$, β_i model je statisticky významný

Pokud bude p-hodnota menší než 0,05, dojde k přijetí hypotézy H_1 a model bude statisticky významný. Test statistické významnosti lze provést pomocí F testu. Specifika F testu zobrazuje tabulka 12.

Tabulka 12: Test významnosti modelu (zdroj: vlastní zpracování)

F test	<i>F statistika</i>	<i>p-hodnota F</i>
Významnost regresního modelu	17,67355	7,14E-07

P-hodnota testu vyšla menší než 0,05, dochází tedy k přijetí hypotézy H_1 a prohlášení modelu za statisticky významný.

Test heteroskedasticity

K tvorbě lineárního regresního modelu, při kterém dochází k odhadování metodou nejmenších čtverců je důležité, aby data byla homoskedastická, tzn. aby data měla rozptýl reziduí konstantní v čase. Pokud takovou podmínku data nesplní, jsou heteroskedastická. Pro test výskytu heteroskedasticity je použit Whitův test. Testováno je opět na hladině významnosti 5 %. Jsou stanoveny následující hypotézy H_0 a H_1

- $H_0: \beta_i = 0$, β_i v modelu není přítomná heteroskedasticita
- $H_1: \beta_i \neq 0$, β_i v modelu je přítomná heteroskedasticita

Pokud bude p-hodnota menší než 0,05, dojde k přijetí hypotézy H_1 a model nebude heteroskedastický. Specifika Whitova testu zobrazuje tabulka 13.

Tabulka 13: whitův test heteroskedasticity (zdroj: vlastní zpracování)

Test	statistika	p-hodnota
White's test	5.922554	0.747644

Dle Whitova testu je p-hodnota větší než 0,05, dochází k přijetí nulové hypotézy H_0 . Data v modelu nejsou heteroskedastická.

Test autokorelace

Použitím Durbin-Watsonovy statistiky lze otestovat data modelu na přítomnost autokorelace. Podle jednoho z předpokladů pro náhodnou složku by data měla mít charakter nekorelovaných náhodných veličin, přítomnost autokorelace v modelu je nežádoucí. Hypotézy pro test autokorelace jsou stanoveny takto:

- $H_0: \beta_i = 0$, β_i v modelu není přítomná autokorelace
- $H_1: \beta_i \neq 0$, β_i v modelu je přítomná autokorelace

Durbin-watsonova statistika nabývá hodnot od 0 do 4, střední hodnota je 2 a při té není autokorelace přítomná. Hodnoty blíží se k 0 nebo ke 4 pak znamenají přítomnost kladné nebo záporné autokorelace.

Tabulka 14: Durbin-watson test autokorelace (zdroj: vlastní zpracování)

Durbin-watsonova statistika	p-hodnota
1.93085	0.427607

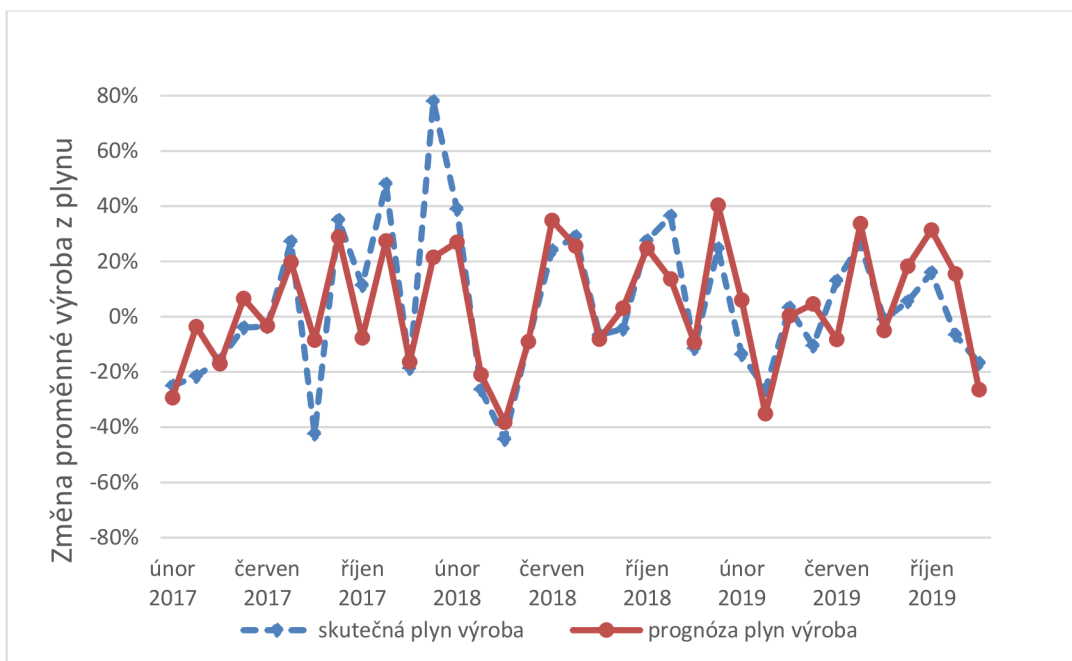
Durbin-watsonova statistika nabývá hodnoty v modelu 1,93, což je blízko střední hodnotě 2. Zároveň p-hodnota výrazně převyšuje hranici 0,05, je tedy přijata nulová hypotéza a model neobsahuje autokorelaci.

4.2 Ověření prognostické schopnosti modelu

Část ověření prognostické schopnosti modelu se zabývá měřením přesnosti modelu porovnáním odhadovaných (prognózovaných) hodnot výroby z plynu se skutečnými hodnotami. Jak již bylo zmíněno dříve, vypracovaný regresní model není schopen zcela vykreslit vlivy působící na proměnnou Y , ale je zatížen náhodnou složkou, vlivem které vznikají odchylky odhadovaných hodnot od těch skutečných. V první řadě bude změřena přesnost odhadu v rámci zdrojových dat, podle kterých model vznikl. Takovými daty jsou už dříve představené meziměsíční změny průměrných měsíčních hodnot jednotlivých proměnných Y , X_1 , X_2 a X_3 . V další části dojde k aplikaci modelu na datech z roku 2021, v rámci, které budou porovnány skutečné hodnoty výroby elektřiny z plynu s hodnotami prognózovanými modelem. Pro oba případy bude spočítán ukazatel přesnosti prognózy Thailovo U , které určuje míru přesnosti prognózy relativně k naivní metodě prognózy. Naivní metoda je nejjednodušší prognostickou metodou a spočívá v odhadu následující hodnoty jako hodnoty předešlé. Například pokud jedno období bude proměnná o hodnotě 5 000, naivní metoda odhadne hodnotu proměnné pro další období shodně jako 5 000.

Ověření na datech z let 2017 až 2019

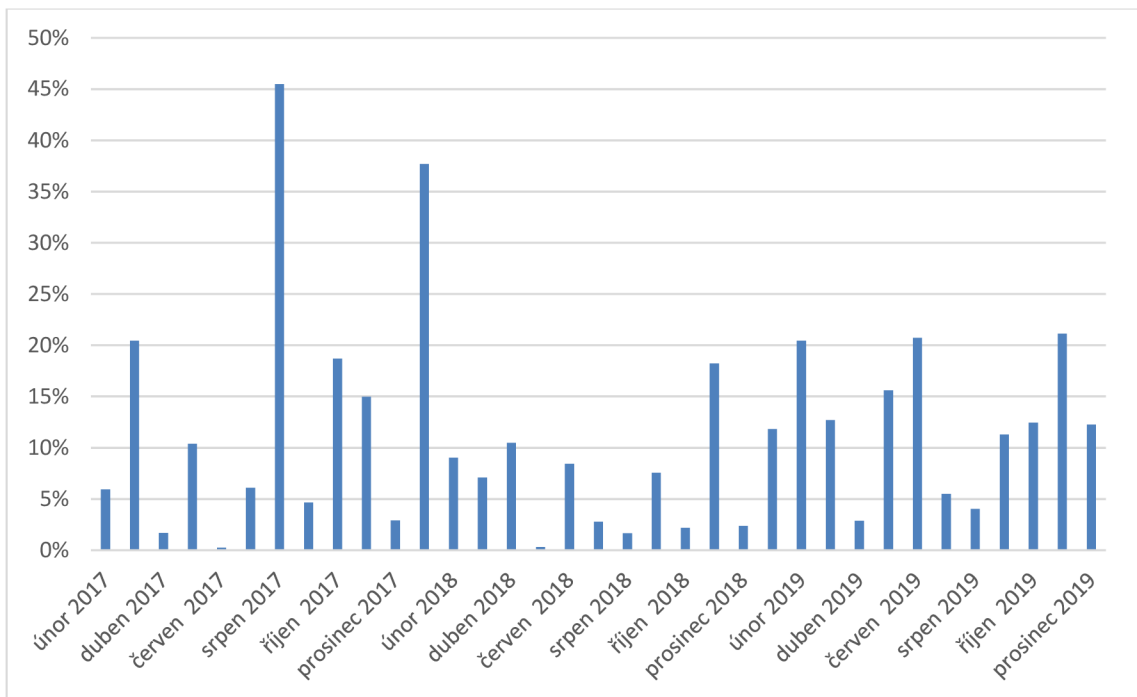
Graf 15 zobrazuje vývoj porovnání skutečných hodnot proměnné Y a hodnot odhadovaných v rámci let 2017 až 2019.



Graf 15: Porovnání skutečných a odhadovaných hodnot proměnné Y (zdroj: vlastní zpracování)

Pohledem na graf lze říct, že model odhadl vcelku správně velkou část průběhu. Největší chybovost modelu spočívá v nepodchycení extrémních změn výroby plynu v srpnu 2017, kdy model předpokládal sice pokles o 8 %, ale skutečný pokles byl o 42 %. Další výraznou odchylkou byl leden 2018, kdy skutečná výroba z plynu vzrostla o 78 % ale model předpověděl zvýšení jen o 22 %. Obě zmíněné situace nastali vlivem faktorů, které nejsou obsaženy pro model a model je tak vnímá jako náhodnou složku. Tato vychýlení ovlivní měřenou přesnost v modelu a model tak bude vlivem nich působit o něco nepřesněji. Pokud by bylo odhlédnuto od těchto dvou výraznějších nepřesností, model by byl velmi přesný a dosahoval by skvělých výsledků. Ovšem i se započítáním obou daných chyb se stále jedná o dobrý výsledek vzhledem k tomu, že model v drtivé většině případů správně určí, zdali dojde k růstu či poklesu výroby z plynu, ale v čem se mýlí je výše daného růstu či poklesu.

Konkrétní výši vychýlení odhadu od skutečnosti v podobě absolutní chyby odhadu zobrazuje graf 16.



Graf 16: Absolutní procentní chyba odhadu (zdroj: vlastní zpracování)

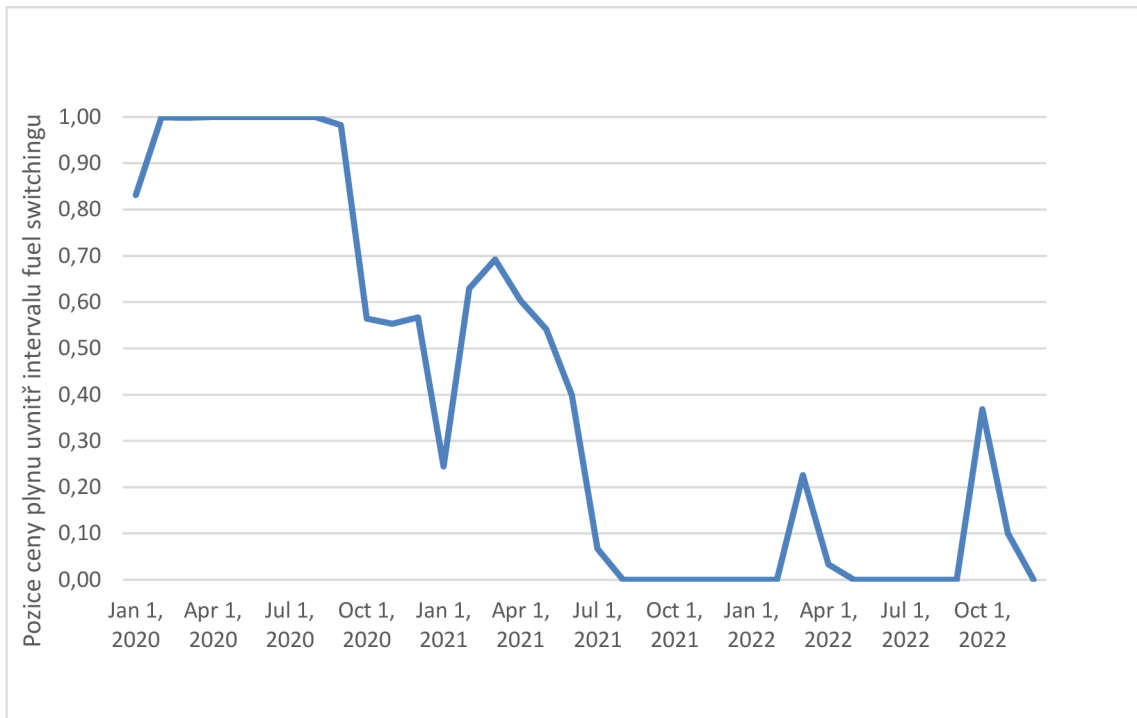
V grafu lze vidět hodnotu absolutní procentní chyby, která je mezi odhadem modelu a skutečností. Jak vyplynulo z grafu 15, největší odchylka je v srpnu 2017 a únoru 2018. Model ale byl po zbytek sledovaného období poměrně přesný, jeho chyba se pohybovala na úrovni nulové chyby až po 20 % odchylku. Průměrná absolutní procentní chyba odhadu vyšla 11,15 %.

Theilovo U pro roky 2017 až 2019 vyšlo 0,7565. To je nižší hodnota než 1 a model tedy odhaduje kvalitněji než naivní metoda.

Ověření na datech z roku 2021

Než bude řeč o samotném ověření modelu na datech z roku 2021 je žádoucí zmínit, proč byl vybrán právě tento rok. Ověření původně proběhlo na datech z let 2020 až 2022, ale z výsledků daného ověření vyšlo najevo, že model z velké části není schopen správně pracovat s daty z let 2020 a 2022. Je to způsobeno bezprecedentní situací na evropském energetickém trhu včetně těsně spojeného trhu německého. Pandemie koronaviru v roce 2020 a energetická krize způsobená mnoha faktory včetně války na Ukrajině způsobili až surrealistický vývoj hodnot některých ukazatelů použitých při stanovování faktorů použitých v modelu. Například u proměnné X_3 , která představuje relativní konkurenceschopnost uhlí a plynu, bylo dříve zmíněno, že je pro funkci modelu žádoucí,

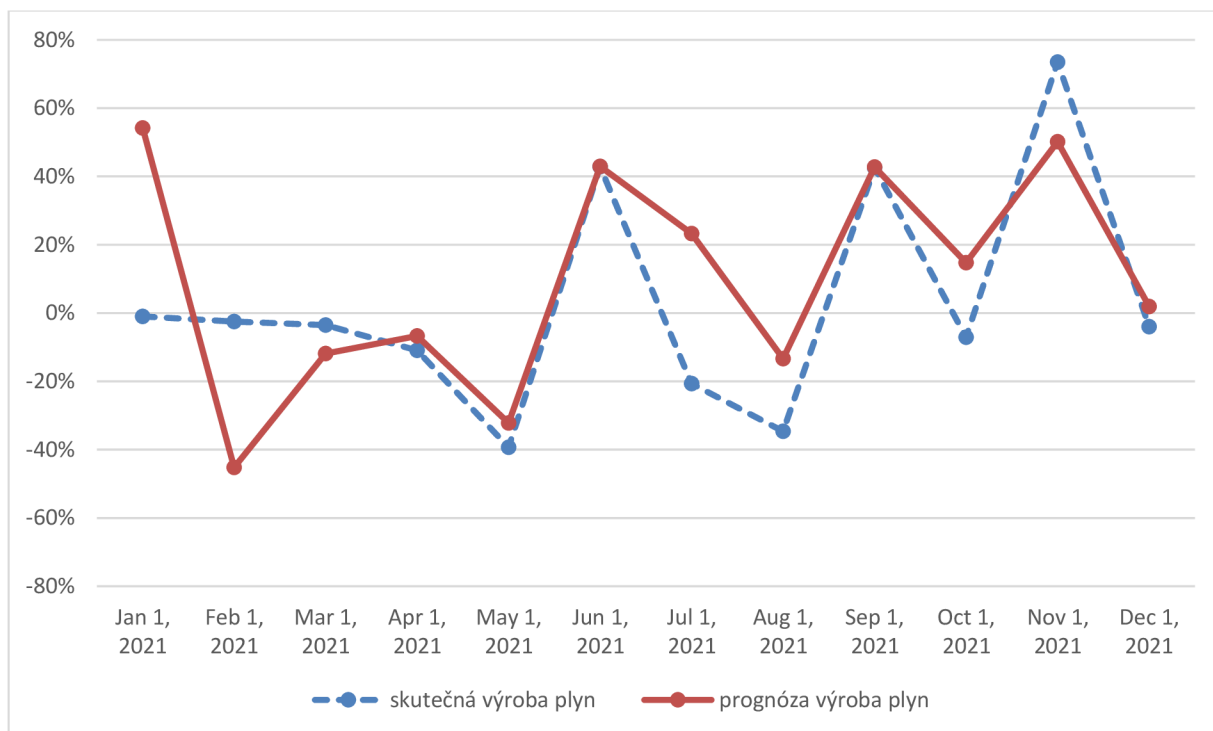
aby se tato proměnná pohybovala převážně uvnitř intervalu pro fuel-switching a nenabývala extrémních hodnot 0 a 1. Hodnoty X_3 v rámci let 2020 až 2022 popisuje graf 17.



Graf 17: Vývoj proměnné X_3 během let 2020 až 2022 (zdroj: vlastní zpracování)

Z grafu je patrné, že proměnná X_3 nabývá velkou část roku 2020 hodnotu 1 a velkou část roku 2022 hodnotu 0. Tato skutečnost značně limituje aplikaci modelu na zmíněné roky a v mnoha případech proměnná X_3 nejenže nepřispívá k správnému odhadu ale dokonce odhad více zpřesňovala. Z toho důvodu byl jako rok k ověření vybrán rok 2021, který má většinu měsíců hodnotu X_3 odlišnou od okrajů intervalu. Využití modelu pro odhad množství vyrobené z plynu je nadále podmíněno tím, že dané odhadované období má většinu času hodnotu relativní konkurenceschopnosti uhlí a plynu odlišnou od hodnot 0 a 1.

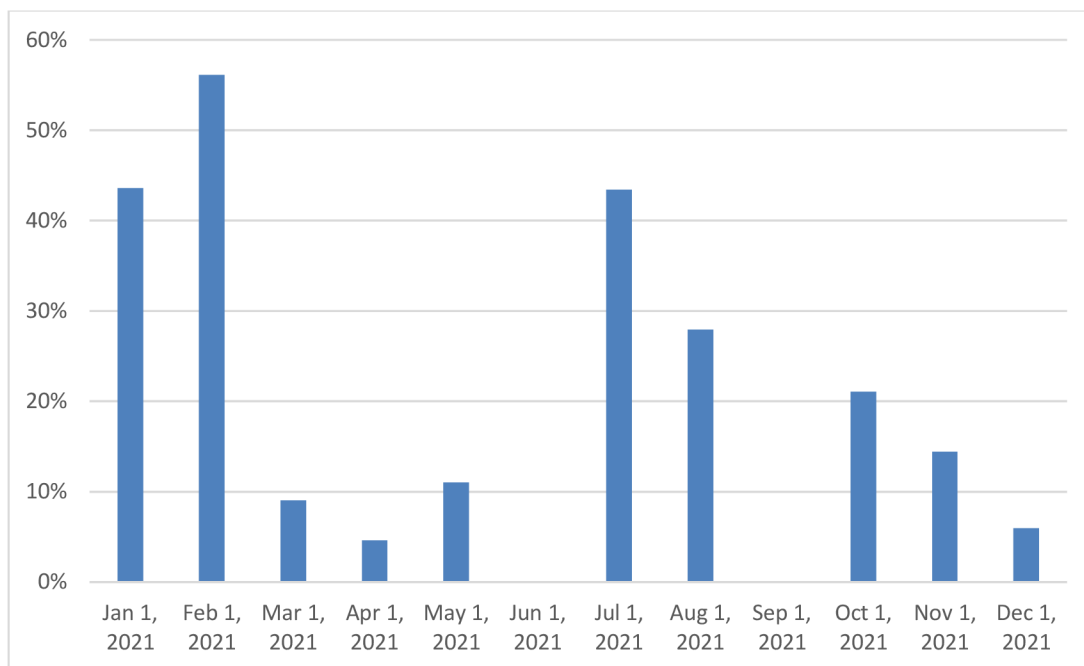
Ověření prognostické aplikovatelnosti modelu na datech z roku 2021 přibližuje graf 18.



Graf 18: Vývoj skutečné výroby z plynu a odhadované hodnoty v rámci roku 2021 (zdroj: vlastní zpracování)

Největší nepřesnost v odhadech modelu je patrná ze začátku roku 2021, kdy model předpokládal výrazný růst spotřeby z plynu v lednu a pak prudký pokles během února, během ledna ale nedošlo k žádnému růstu, následkem čehož nedošlo ani k poklesu. Jinými slovy model přepokládal vysoký růst v lednu s vyrovnáním do původních hodnot během února a března, ale ve skutečnosti už k samotnému růstu nedošlo a nebylo tedy k dispozici nadproporcionálně velké množství, které by mohlo během února a března klesat. Se zbytkem si roku si model poradil o poznání lépe.

Výši vychýlení odhadu od skutečnosti v jednotlivých měsících ukazuje graf 19.



Graf 19: Absolutní procentuální chyba odhadu pro rok 2021 (zdroj: vlastní zpracování)

Z grafu je patrná přítomnost měsíců, kdy odhad byl velmi blízký skutečnost, ale pak tu jsou i měsíce, které mají vychýlení v desítkách procent. Průměrná absolutní procentuální chyba je 19,8 %. Způsobeno je to skutečností, že ačkoli byl rok 2021 lepším rokem pro ověření modelu, stále v sobě vykazoval určitou míru problémů, které postihli i roky 2020 a 2022. S tímhle ohledem je přesnost modelu dostačující.

Theilovo U pro přesnost modelu v roce 2021 je 0,94. To je menší hodnota než 1 a model tedy přináší určitou hodnotu užítku při prognózování.

Využití modelu v rámci budoucích scénářů

Možné využití modelu spočívá v predikci množství elektřiny vyrobené z plynu v libovolném období, za předpokladu, že jsou do modelu zadány hodnoty ostatních faktorů. Protože model není sestaven na základě samotných hodnot výše faktorů, ale na základě jejich relativní změně, je nutné v rámci budoucího scénáře zadat právě změny v rámci faktorů. Dále je pro správnou funkci modelu nezbytné, aby se hodnota relativní konkurenceschopnosti pohybovala velkou část období daného scénáře mimo extrémní okraje intervalu. Zároveň model bude přesnější, pokud se povaha scénáře nebude drasticky lišit od období, na základě kterého model vznikl.

Pro lepší představení funkce modelu v rámci budoucích scénářů bude uveden příkladový scénář, pro které model učiní predikci proměnné Y.

Je předpokládán trh, v rámci, kterého byly změřeny případně jsou předpovídány následující hodnoty zobrazené v tabulce 15:

Tabulka 15: Hodnoty proměnných hypotetického scénáře (zdroj: vlastní zpracování)

Proměnná	období 1	období 2	změna mezi obdobími	koeficienty modelu
Y plyn výroba	7 500 MW	?	?	-1,06
X1 poptávka	65000 MW	61000 MW	-6 %	3,71
X2 nízkoemisní	32000 MW	32500 MW	2 %	-1,59
X3 rel. kon.	0,73	0,65	-0,08	-0,79

Proměnná Y pro období 2 je neznáma, model určí predikci pro proměnnou Y v období 2.

Dosažením koeficientů a hodnot faktorů do rovnice modelu je získána následující hodnota proměnné Y = 5 542 MW.

Změna mezi obdobími pro Y = - 26 %. Pokud se tedy ve výše popsaném scénáři očekává snížení poptávky asi o 6 %, zároveň má dojít k zvýšení produkce z nízkoemisních zdrojů přibližně o 2 % a relativní konkurence schopnost klesne v rámci intervalu o 0,08, model přepokládá snížení výroby plynových elektráren o 26 %.

Konfidenční intervaly pro hladinu významnosti 5 % jsou v tabulce 16.

Tabulka 16: Konfidenční intervaly (zdroj: vlastní zpracování)

<i>Dolní 95,0 %</i>	<i>Horní 95,0 %</i>
-32,2713	-20,5502

Pokud by hodnota Y pro období 1 byla 7 500 MW, v následujícím období model přepokládá výrobu z plynu v hodnotě 5 542 MW. S 95% jistotou lze říci, že se skutečná hodnota změny proměnné Y mezi obdobími bude pohybovat v intervalu od -32,27 % až do -20,55 %. Šance, že hodnota změny Y bude nižší než -32,27 % je 2,5 %. Stejně tak pravděpodobnost, že hodnota změny Y bude vyšší než -20,55 % jsou 2,5 %.

4.3 Vyhodnocení návrhové části práce

V rámci návrhové části práce bylo vytvořeno řešení regresního modelu, které vysvětluje vztah zkoumaného množství elektrické energie vyrobené v plynových elektrárnách

s faktory ovlivňujícími toto množství. Zmíněnými faktory byla celková poptávka po elektřině na trhu, která zahrnuje spotřeba elektřiny na zkoumaném území a čistý vývoz. Dalším faktorem je množství elektřiny vyprodukované z nízkoemisních zdrojů, kam spadají obnovitelné zdroje (větrné, solární, biomasa aj.) a jaderné elektrárny. Třetím faktorem byla relativní konkurenceschopnost uhlí a plynu, která nabývá podoby hodnot v intervalu od 0 do 1, kdy při nulové hodnotě má zemní plyn největší konkurenční výhodu, zatímco při 1 má uhlí relativní výhodu oproti plynu. Během tvorby řešení modelu byla jako faktor vyřazena produkce elektřiny z hnědého uhlí, jejíž p-hodnota překračovala nejvyšší přípustnou hodnotu na zvolené hranici významnosti a vykazovala tak slabý vliv na hledanou proměnnou.

Data byla v modelu použita v podobě meziměsíčních změn průměrných měsíčních hodnot a tyto hodnoty byly vyjádřeny v procentech. Díky tomu je možné porovnat snadno vliv jednotlivých faktorů navzájem mezi sebou. Z výsledné rovnice řešení regresního modelu vyplývá, že největší vliv má celková poptávka na trhu. Změna celkové poptávky trhu o 1 % dokáže změnit produkci plynových elektráren o 3,7 %. Druhý nejvlivnější faktor je produkce z nízkoemisních zdrojů, směr vlivu je negativní, tudíž zvýšení produkce z nízkoemisních zdrojů o 1 % způsobí snížení produkce z plynu o 1,59 %. Relativní konkurenceschopnost uhlí a plynu způsobem, jakým byla koncipována v této práci, má také negativní směr dopadu na zkoumanou proměnnou. Zvýšení relativní konkurenceschopnosti o 0,01 v rámci intervalu způsobí snížení produkce z plynu o 0,79 %. Samotná relativní konkurenceschopnost uhlí a plynu byla spočítána jako pozice ceny plynu v rámci intervalu fuel-switchingu, kdy pro interval fuel-switchingu byly vypočítány horní a spodní hranice, do kterých vstupují další proměnné jako cena zemního plynu, cena uhlí, cena emisních povolenek a kurz eura a dolaru.

Výsledný regresní model má hodnotu koeficientu determinace asi 0,63, což se dá interpretovat jako situace, kdy zvolené faktory jsou schopny vysvětlit 63 % změn proměnné Y. Zbývající část do 100 % tvoří náhodná složka, což jsou všechny vlivy nepopsané modelem. Problém s vlivy, které model nepopisuje je ten, že může být velmi obtížné je identifikovat, změřit, případně pro ně najít či získat relevantní data. Při hledání možných faktorů, které ovlivňují množství produkce z plynu, bylo uvažováno mnohem více potenciálních proměnných, které by s výslednou proměnnou mohly souviset. Bohužel v mnoha případech bylo mimo možností této diplomové práce dané faktory

zařadit do modelu z důvodu neexistence či nedostupnosti nutných dat. Například zajímavý by mohl být instalované kapacity plynových elektráren či dostupné kapacity, což by byla instalovaná kapacita snížená o odstávky. Bohužel se nepodařilo nalézt data, která by byla smysluplně propojitelná v rámci jednoho modelu. Je nutné zmínit, že výše zmíněné náhodné vlivy mohou být svým významem limitně blízké nule a může jich být nekonečné množství, velmi to závisí na konkrétním problému, který regresní model řeší. Už z principu je tak v podstatě nemožné vytvořit model, který popisuje dokonale zkoumané množství elektřiny vyrobené v plynových elektrárnách, který by měl vysvětlovat změny dané vysvětlované proměnné ze 100 %. Z toho důvodu je model vysvětlující 63 % dobrý výsledek v rámci možností této diplomové práce. Nicméně není pochyb o tom, že zkušený tým lidí s odpovídajícími zdroji by dokázal vytvořit model, který by vysvětloval proměnnou Y mnohem, mnohem přesněji.

Samotné ověření přesnosti predikce modelu ukázalo, že přesnost modelu hodně závisí na „normálnosti“ sledovaného období. Při pokusu o aplikaci modelu na období roku 2020 nebo 2022, která byla v rámci elektroenergetického trhu v Evropě plná bezprecedentních situací vzniklých pandemií koronaviru, války na Ukrajině a energetické krize, model byl nepřesný. Z toho je vyvozeno, že pro přesný odhad proměnné v takových obdobích by vyžadovalo úplné změnění koncepce celého modelu a jeho kompletního přepracování, pravděpodobně s použitím jiných metod. Výsledný model vytvořený v rámci této práce funguje, ale pouze v určitém kontextu. V kontextu toho, že hodnoty relativní konkurenceschopnosti uhlí a plynu nejsou extrémní a že se poměr velikosti jednotlivých faktorů drasticky neliší od zdrojových dat v období 2017 až 2019. S tím souvisí skutečnost, že schopnost modelu predikovat množství elektřiny vyrobené z plynu bude postupem času klesat, protože se očekává jakási přirozená změna a vývoj v energetickém světě. Například v Německu se očekává nebo už dokonce nastává úplné vyřazení jaderných elektráren, to zásadně změní množství elektřiny z nízkoemisních zdrojů. Na druhou stranu je stále více produkce elektřiny z obnovitelných zdrojů, to má opět vliv na proměnnou představující produkci z nízkoemisních zdrojů. Pro správnou funkci modelu i ve vzdálenější budoucnosti by bylo nutné model překalibrovat na aktuálnějších datech. Za jak dlouho by to mělo být? Jak přesně bude model spolehlivý v budoucích letech? To je v současnosti těžké odhadnout, je možné, že zjištěné vztahy mezi proměnnými budou platit ještě několik let. Je také možné, že na určitém území platit přestanou vlivem určité

nenadále události a pak se zase vrátí po původní podobě. Anebo se celý trh rapidně změní a model bude rychle nepřesný. V takovém případě by bylo nutné model upravit nejen na nových datech, ale i pečlivě zvážit začlenění nových faktorů, které by v budoucnu mohli mít silný vliv.

ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce byla tvorba ekonometrického modelu, který popisuje vztah množství elektrické energie vyrobené v plynových elektrárnách a jiných faktorů, které toto množství ovlivňují. Model byl zpracován na datech německého trhu v období let 2017 až 2019, před koronavirovou pandemií a následující energetickou krizí.

Práce byla rozdělena do několika částí. V první části byla popsána metodika a cíl diplomové práce, včetně dílčích, parciálních cílů. Po ní následovala druhá část, a to teoretická východiska práce, ve kterých bylo představeno prostředí evropského a německého energetického trhu, včetně jeho členění, historie a vazeb mezi různými způsoby výroby elektrické energie. Další část teoretických východisek práce se zaměřila na představení základních pojmů a východisek v rámci ekonometrického modelování, a to především regresních modelů.

Po teoretických východiscích práce následovala analytická část, ve které byli představeny potenciální faktory ovlivňující množství produkované elektrické energie v plynových elektrárnách. Pomocí určení potenciálních faktorů a shromážděním dat o jednotlivých faktorech v souladu s vytyčeným obdobím let 2017 až 2019 byl sestaven vícenásobný lineární regresní model, který potvrdil existující vazbu množství produkce elektřiny v plynových elektrárnách na ostatní proměnné, a to konkrétně na celkovou poptávku po elektřině na trhu, na množství elektřiny vyrobené z nízkoemisních zdrojů a na relativní konkurenceschopnosti uhlí a plynu. Model je tak schopen predikovat množství produkované elektřiny s použitím zemního plynu jako paliva. Ve čtvrté části je shrnutí poznatků a výsledků práce, včetně možného využití výsledků práce a limitů těchto výsledků.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1) Co je to primární energie?. Protherm [online]. 2022 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.protherm.cz/pro-nase-zakazniky/technicka-podpora/slovnicek-pojmu/primarni-energie-2117128.html>
- 2) Elektroenergetika – Výroba energie. Moje energie [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <http://www.mojeenergie.cz/cz/elektroenergetika-vyroba-energie>
- 3) Distribution of electricity generation worldwide in 2021, by energy source. Statista [online]. [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/269811/world-electricity-production-by-energy-source/>
- 4) MOLEK, Tomáš. Uhelne kondenzační elektrárny. O Energetice [online]. 12. 7. 2015 [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/uhelne-kondenzacni-elektrarny>
- 5) Jak funguje jaderná elektrárna a jaké výhody i nevýhody přináší jaderná energie. Epet [online]. [cit. 2023-01-26]. Dostupné z: <https://www.epet.cz/jak-funguje-jaderna-elektrarna-a-jake-vyhody-prinasi-jaderna-energie/>
- 6) Větrná energie: Výhody, nevýhody a princip fungování [online]. [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.epet.cz/vetrna-energie-vyhody-nevyhody-a-princip-fungovani/>
- 7) SALAVEC, Jiří. Trh s elektřinou - specifika, účastníci trhu a rozdělení. O Energetice [online]. 9. 6. 2017 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/trh-s-elektřinou/trh-s-elektřinou>
- 8) HOŠEK, Jan. Vývoj na evropském trhu se zemním plynem. Česká národní banka [online]. 19. 4. 2022 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/o_cnb/cnblog/Vyvoj-na-evropskem-trhu-se-zemnim-plynem/
- 9) Is the European Union on track to meet its REPowerEU goals?. International Energy Agency [online]. 12. 2022 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/is-the-european-union-on-track-to-meet-its-repowerEU-goals>

- 10) HOŠEK, Jan. Trh s uhlím a jeho budoucnost. Česká márodní banka [online]. 8. 9. 2020 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/o_cnb/cnblog/Trh-s-uhlim-a-jeho-budoucnost/
- 11) EU Emissions Trading System (EU ETS). European Commission [online]. [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- 12) Facts and Figures. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Artikel/Energy/electricity-market-of-the-future-facts-and-figures.html>
- 13) HUŠEK, Roman. Ekonometrická analýza. 1. vyd. Praha: Oeconomica, 2007. 367 s. ISBN:978-80-245-1300-3.
- 14) LEJNAROVÁ, Šárka, Adéla RÁČKOVÁ a Jan ZOUHAR. Základy ekonometrie v příkladech. 2. přeprac. vyd. Praha: Nkladatelství Oeconomica, 2009. 276 s. ISBN 978-80-245-1564-9.
- 15) HINDLS, Richard, Stanislava HRONOVÁ a Jan SEGER. Statistika pro ekonomy. 5. vyd. Praha: Professional Publishing, c2004. ISBN 80-864-1959-2.
- 16) NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KRŽÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. 3., rozšířené vydání. Praha: Grada Publishing, 2021. ISBN 978-80-271-3421-2.
- 17) E.ON History. *E.ON* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.eon.com/en/about-us/e-on-history.html>
- 18) E.ON Výroční zpráva za rok 2021. *Justice.cz* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://or.justice.cz/ias/ui/vypis-sl-detail?dokument=75432119&subjektId=78570&spis=426675>
- 19) Total Load - Day Ahead / Actual. *Entso-e transparency platform* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://transparency.entsoe.eu/load-domain/r2/totalLoadR2/show>
- 20) Cross-Border Physical Flow. *Entso-e transparency platform* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/physicalFlow/show>

- 21) Actual Generation per Production Type. *Entso-e transparency platform* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show>
- 22) *Intercontinental Exchange, Inc.* [online]. [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.theice.com/index>
- 23) Market Data. *European Energy Exchange AG* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.eex.com/en/market-data>
- 24) YIN, Ping a Xitao XITAO. *Estimating R² Shrinkage in Multiple Regression: A Comparison of Different Analytical Methods* [online]. 2. 4. 2010 [cit. 2023-05-07]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00220970109600656>

SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1: Bodová odhadová funkce.....	27
Rovnice 2: Regresní analýza.....	30
Rovnice 3: Regresní funkce.....	30
Rovnice 4: Lineární odhadová funkce.....	31
Rovnice 5: Bodová odhadová funkce z metody nejmenších čtverců.....	31
Rovnice 6: Bodová odhadová funkce z metody nejmenších čtverců.....	31
Rovnice 7: Minimalizace kvadratické formy.....	31
Rovnice 8: Minimalizace kvadratické formy.....	31
Rovnice 9: Normální rovnice nejmenších čtverců.....	32
Rovnice 10: Odhadová bodová funkce minimalizující součet čtverců reziduí.....	32
Rovnice 11: Vícenásobná regrese.....	32
Rovnice 12: Klasický lineární regresní model.....	34
Rovnice 13: Odhad vektoru beta pomocí odhadové funkce.....	35
Rovnice 14: Bodová předpověď.....	35
Rovnice 15: Chyba předpovědi.....	35
Rovnice 16: Rozptyl předpovědi.....	35
Rovnice 17: Standartní chyba předpovědi.....	35
Rovnice 18: Interval spolehlivosti předpovědi.....	35
Rovnice 19: Theilův koeficient.....	36
Rovnice 20: Relativní konkurenceschopnost uhlí a plynu.....	47
Rovnice 21: Spodní hranice fuel-switchingu.....	49
Rovnice 22: Horní hranice fuel-switchingu.....	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: zdroje produkce elektrické energie v Německu (zdroj: vlastní zpracování dle (12))	21
Tabulka 2: procentuální podíl zdrojů v Německu (zdroj: vlastní zpracování dle (12))..	22
Tabulka 3: Souhrn potenciálních proměnných modelu (zdroj: vlastní zpracování)	40
Tabulka 4: Hodnoty veličin pro výpočet mezních hodnot intervalu fuel-switchingu (zdroj: vlastní zpracování)	50
Tabulka 5: Korelační matice faktorů (zdroj: vlastní zpracování)	55
Tabulka 6: Popisná statistika proměnných (zdroj: vlastní zpracování)	56
Tabulka 7: Popisná statistika změny proměnných (zdroj: vlastní zpracování)	57
Tabulka 8: Koeficienty a p-hodnoty proměnných (zdroj: vlastní zpracování)	58
Tabulka 9: Koeficienty a p-hodnoty výsledného modelu (zdroj: vlastní zpracování)....	59
Tabulka 10: Regresní statistika modelu (zdroj: vlastní zpracování).....	60
Tabulka 11: Konfidenční intervaly proměnných modelu (zdroj: vlastní zpracování)....	61
Tabulka 12: Test významnosti modelu (zdroj: vlastní zpracování).....	62
Tabulka 13: whitův test heteroskedasticity (zdroj: vlastní zpracování)	62
Tabulka 14: Durbin-watson test autokorelace (zdroj: vlastní zpracování)	63
Tabulka 15: Hodnoty proměnných hypotetického scénáře (zdroj: vlastní zpracování) .	70

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vývoj tržních cen zemního plynu od roku 2021 (zdroj: (9))	17
Graf 2: Vývoj výroby elektřiny z plynu v letech 2017–2019 (zdroj: vlastní zpracování dle (21))	41
Graf 3: Vývoj relativní změny výroby z plynu během let 2017–2019. (zdroj: vlastní zpracování dle (21))	42
Graf 4: Vývoj poptávky po elektřině na německém trhu (zdroj: vlastní zpracování dle (19) a (20)).....	43
Graf 5: Vývoj relativní změny poptávky (zdroj: vlastní zpracování dle (19) a (20)).....	44
Graf 6: Složení nízkoemisních zdrojů (zdroj: vlastní zpracování dle (21)).....	45
Graf 7: Vývoj produkce z nízkoemisních zdrojů (zdroj: vlastní zpracování dle (21)) ...	46
Graf 8: Vývoj relativní změny produkce nízkoemisních zdrojů (zdroj: vlastní zpracování dle (21)).....	47
Graf 9: Vývoj ceny plynu v intervalu fuel-switchingu (zdroj: vlastní zpracování).....	48
Graf 10: Vývoj ceny plynu, uhlí a emisních povolenek (zdroj: vlastní zpracování dle (22) a (23)).....	50
Graf 11: Vývoj vzájemné relativní konkurenceschopnosti uhlí a plynu (zdroj: vlastní zpracování).....	51
Graf 12: Vývoj relativní změny konkurenceschopnosti uhlí a plynu v letech 2017–2019 (zdroj: vlastní zpracování)	52
Graf 13: Vývoj produkce z lignitu v letech 2017–2019 (zdroj: vlastní zpracování dle (21))	53
Graf 14: Vývoj relativní změny produkce z hnědého uhlí (zdroj: vlastní zpracování dle (15))	54
Graf 15: Porovnání skutečných a odhadovaných hodnot proměnné Y (zdroj: vlastní zpracování).....	65
Graf 16: Absolutní procentní chyba odhadu (zdroj: vlastní zpracování).....	66

Graf 17: Vývoj proměnné X3 během let 2020 až 2022 (zdroj: vlastní zpracování).....	67
Graf 18: Vývoj skutečné výroby z plynu a odhadované hodnoty v rámci roku 2021 (zdroj: vlastní zpracování).....	68
Graf 19: Absolutní procentuální chyba odhadu pro rok 2021 (zdroj: vlastní zpracování)	69