

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DISERTAČNÍ PRÁCE

Plzeň, 2013

Ing. Viktor Majer

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor v oboru

Elektroenergetika

Ing. Viktor Majer

Predikce výroby elektřiny
z fotovoltaických elektráren
v liberalizované energetice

Školitel: Doc. Ing. Pavla Hejtmánková Ph.D.
Datum státní doktorské zkoušky: 15. 12. 2011
Datum odevzdání práce: 31. 5. 2013

V Plzni, 2013

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou predikce výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren v liberalizované energetice. Klade za cíle popsat současný stav liberalizované energetiky a také navrhnout prediktor výroby elektřiny na základě dostupné předpovědi oblačnosti ze všech fotovoltaických elektráren v České republice. Návrh tohoto prediktoru je odpovědí na prudký rozvoj výstavby těchto zdrojů, který nastal v posledních několika letech. Spolu s vyčíslením chyby dává přehled o očekávané výrobě a může být použit jak pro obchodníka s elektřinou, tak i pro ostatní účastníky trhu, případně díky znalosti chyby predikce také pro plánování a řízení provozu elektrizační soustavy.

Klíčová slova

Trh s elektřinou, liberalizace, časová řada, predikce, fotovoltaická elektrárna, oblačnost, MATLAB

Annotation

This thesis deals with the prediction of electricity production from photovoltaic power plants in the liberalized energy sector. The goal of this thesis is to describe the current state of the liberalized energy sector and design the predictor of the generated electricity from photovoltaic power plants for whole Czech republic. This predictor is based on available data of cloudiness. Design of this predictor is the answer on the massive development of new instalations of this type of power plants in last years. This predictor give the overview on the future amount of generated electricity and it can be used for electricity trader or for other market participants. In the case of known prediction error is there a possibility to use this predictor for planning and management power system.

Keywords

Electricity market, liberalization, time series, prediction, photovoltaic power plant, cloudiness, MATLAB.

Anmerkung

Diese Arbeit behandelt die Prognose der Energieerzeugung aus Photovoltaikkraftwerken in der liberalisierten Energetik. Zuerst wird der derzeitige Stand der liberalisierten Energetik in CZ unter besonderer Berücksichtigung der Photovoltaik beschrieben. Es wird versucht, eine Prognose der Energieerzeugung in der tschechischen Republik mittels Photovoltaik aufgrund der erreichbaren Bewölkung zu entwickeln. Diese Prognose basiert auf der schnellen Entwicklung der Photovoltaiksysteme in den letzten Jahren. Außerdem wurde eine Fehleranalyse von möglichen Prognosefehlern erstellt. Die entwickelte Prognose kann genutzt werden für eine verbesserte Planung, Steuerung und Kontrolle des Energiesystems der tschechischen Republik. Außerdem kann sie für Aktivitäten des Energiemarktes wie Trading, Boerse etc verwendet werden.

Schlüsselwörter

Energiemarkt, Liberalisierung, Zeitreihe, Prediktion, Photovoltaikkraftwerken, Bewölkung, MATLAB

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím legálního softwaru a uvedených literárních pramenů a odborných publikací.

V Plzni dne 31. 5. 2013

Viktor Majer

Poděkování

Tímto chci poděkovat paní Doc. Ing. Pavle Hejtmánkové Ph.D., svojí školitelce, za její odborné vedení, ochotu, vstřícnost a za poskytnutí cenných připomínek a rad týkajících se obsahu práce a zpracování textu. Dále pak Ing. Andree Zápotocké, Ph.D. a Ing. Petru Janečkovi, Ph.D. za cenné rady a konzultace v průběhu psaní práce.

Předmluva

Tato disertační práce se zabývá problematikou predikce výroby elektřiny v liberalizované energetice. Významnou změnou na poli energetiky byl přechod od státem řízené a vlastněné energetiky k tržnímu prostředí. Tento proces zvaný liberalizace proběhl v několika krocích, kdy dnes si může odběratel zvolit svého dodavatele elektřiny. S liberalizovanou energetikou také souvisí způsob podpory obnovitelných zdrojů, který je prováděn pomocí výkupních cen a garancí jejich výše a trvání.

Vzhledem k celospolečenským cílům zvýšit podíl výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, byly v České republice v minulých letech poměrně výrazně navýšeny výkupní ceny elektřiny z fotovoltaických elektráren, což ve svém důsledku způsobilo prudký nárůst výstavby těchto zdrojů. Jelikož je výroba elektřiny z fotovoltaických elektráren silně závislá na aktuálních klimatických podmínkách, je tedy podobně jako počasí značně proměnlivá. Pokud je těchto elektráren v soustavě více, objevuje se potřeba určení budoucí výroby elektřiny z těchto zdrojů. Proto je cílem této práce navrhnout a otestovat prediktor vyrobené elektřiny z fotovoltaických elektráren pro celou Českou republiku tak, aby bylo možné na základě dostupné předpovědi počasí určit očekávanou hodnotu výroby. Důležité je také určit, v jakém rozmezí se bude predikovaná hodnota nacházet, neboli je vhodné stanovit nepřekročitelné meze predikce.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	12
Seznam obrázků	15
Seznam tabulek	17
1 Úvod	18
1.1 Současný stav problematiky	19
1.2 Stanovené cíle	19
2 Obchodování s elektřinou v liberalizovaném prostředí	20
2.1 Elektroenergetický systém	20
2.2 Vertikálně integrovaný systém	21
2.3 Liberalizace energetiky v ČR	21
2.4 Model trhu s elektřinou v ČR	22
2.5 Účastníci trhu s elektřinou	24
2.5.1 Výrobci	24
2.5.2 Provozovatelé distribučních soustav	25
2.5.3 Provozovatel přenosové soustavy	26
2.5.4 Operátor trhu s elektřinou	26
2.5.5 Obchodník s elektřinou	28
2.5.6 Koneční zákazníci	28
2.6 Burza	30
2.7 Struktura ceny za elektřinu	32
2.8 Energetický regulační úřad	33
2.9 Typy obchodů na trhu s elektřinou v ČR	33
2.9.1 Obchodování na blokovém trhu	34
2.9.2 Pokrývání odběrových diagramů	35
2.9.3 Obchod s podpůrnými službami	36
2.10 Problematika odchylky	37
2.11 Predikce spotřeby	39
3 Rozvoj fotovoltaiky v liberalizovaném trhu s elektřinou v ČR	44
3.1 Legislativní rámec	44
3.2 Rozvoj FVE v ČR	45
3.3 Přírodní podmínky pro instalace FVE v ČR	46
4 Analýza použitých dat	47
4.1 Data z referenční FVE	47
4.2 Souhrnná data výroby z oblastí v ČR	51
4.3 Data oblačnosti	52
4.3.1 Data měřené oblačnosti	52
4.3.2 Data předpovídané oblačnosti	53

4.4	Alternativní data předpovědi oblačnosti	53
4.5	Data časů východu a západu slunce	55
5	Možnosti predikce výroby elektřiny z FV elektráren	56
5.1	Možnosti dlouhodobé predikce	56
5.2	Možnosti krátkodobé predikce	56
5.3	Časové řady v energetice	57
5.4	Modelování a analýza časových řad	58
5.4.1	Dekompoziční metoda	58
5.4.2	Box-Jenkins metodologie	59
5.4.3	Lineární dynamické modely	60
5.4.4	Spektrální analýza časových řad	60
5.5	Využití neuronových sítí pro predikci výroby FVE	60
5.5.1	Umělý neuron	61
5.5.2	Feed forward síť	62
5.5.3	Učení neuronové sítě	63
5.5.4	Simulace modelu FVE s využitím neuronových sítí	63
5.6	Využití matematického modelu FVE pro predikci	65
6	Návrh prediktoru založeném na dostupné předpovědi oblačnosti pro jednu FVE	69
6.1	Použitý matematický aparát	69
6.2	Definice prediktoru pro jednu fotovoltaickou elektrárnu	70
6.3	Metodika výpočtu	71
6.4	Stanovení denních diagramů pro jasnou oblohu	72
6.5	Stanovení korekčních koeficientů pro jednotlivé třídy oblačnosti	76
6.6	Korekce denních diagramů pro jednotlivé třídy oblačností	78
6.7	Testování prediktoru a definice chyb	78
6.8	Využití naměřených dat oblačnosti jako vstup prediktoru	80
7	Prediktor výroby elektřiny z FVE pro celou ČR	81
7.1	Metodika výpočtu	81
7.2	Přepočítání DD_{REF} na DD_{oblast}	82
7.2.1	Stanovení korekce středu denního diagramu	83
7.2.2	Stanovení koeficientu maximálního výkonu	84
7.2.3	Stanovení korekce východu a západu	85
7.3	Tvorba denních diagramů pro jednotlivé oblasti	85
7.3.1	Volba zástupného místa oblasti	86
7.4	Testování prediktoru a definice chyb	87
8	Závěr	88
8.1	Další směr výzkumu	89
8.2	Vlastní přínos práce	89

9	Resume	91
	Reference	92
	Vlastní publikace	94
A	Přílohy	96
A.1	Ukázka dat z FEL-CVUT	96
A.2	Ukázka předpovědi z webu CHMI	96
A.3	Korekce středů pro jednotlivé oblasti	98
A.4	Zastoupení jednotlivých meteostanic v rámci krajů a oblastí	99
A.5	Příklad vypočtených DD_{oblast}	100

Seznam symbolů a zkratek

ACF	Autokorelační funkce
$AR(p)$	Autoregresivní proces
C_t	Cyklická složka časové řady
C_3	Materiálová konstanta
C_1	Materiálová konstanta
Δ_{model}	Chyba neuronové sítě
Δ_{model}	Chyba modelu článku
$\Delta E_{FVE-METEOmerene}(t)$...	Chyba predikce v čase t z poslední změřené hodnoty oblačnosti
DZ	Distribuovaný zdroj
DS	Distribuční soustava
DD_{oblast}	Vypočtený denní diagram pro jasné dny pro oblast
$DD_{REF}(t)$	Vypočtený denní diagram výroby FVE pro jasné dny
$\Delta E_{FVE-METEOpredpoved}(t)$.	Chyba predikce v čase t z předpovědi oblačnosti
δ	Horizont plánování
e	Konstanta pro základní elementární náboj
ERU	Energetický regulační úřad
ES	Elektrizační soustava
$E_{FVE,METEOmereni}(t)$	Hodnota predikce
$E_{FVE}(t)$	Hodinový průměr vyrobené elektřiny z FVE
$\eta_{FVE}(\tau)$	Účinnost FVE při teplotě τ
$E_{osvit}(\tau)$	Osvit FVE při teplotě τ
$E_{FVE-namerene}(t)$	Hodinový průměr vyrobené elektřiny z FVE
$E_{FVE-predikovane}(t)$	Očekávaná hodnota vyrobené elektřiny z FVE
ϵ_t	Náhodná složka časové řady
$E(X)$	Střední hodnota náhodné veličiny
FVE	Fotovoltaická elektrárna
$f(P)$	Aktivační funkce
$I(d)$	Integrační proces
I_{SC}	Proud nakrátko, který v sobě zahrnuje solární záření G_a a teplotu článku t^C
k_s	Koeficient korekce středu
k_{max}	Koeficient korekce maximálního výkonu
k_{vz}	Koeficient východu a západu slunce
k_{OBL}	Korekční koeficient pro danou oblačnost dle předpovědi
k_1	Váha oblačnosti pro předpovědi
k_2	Váha oblačnosti pro předpovědi
k	Boltzmanova konstanta

K_1	Materiálová konstanta
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
m	Idealizující konstanta korekce V-A charakteristiky článku
$MA(q)$	Proces klouzavých průměrů
MCP	Model neuronu McCulloch-Pitts
μ	Střední hodnota náhodné veličiny
O^i	Individuální odchylka subjektu zúčtování
O^i	Individuální odchylka subjektu zúčtování
O_1	Mez předpovědi oblačnosti
O_2	Mez předpovědi oblačnosti
O_k^i	Plánovaná roční spotřeba i-tého zákazníka
OKO	Organizované krátkodobé obchodování
OTE	Operátor trhu s elektřinou
OZE	Obnovitelné zdroje
PpS	Podpůrné služby
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PS	Přenosová soustava
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
$P_{FVE-neuron}$	Predikovaný výkon FVE pomocí neuronové sítě
$P_{FVE-skut}$	Změřená hodnota výkonu
$PACF$	Parciální autokorelační funkce
P	Označení potenciálu u neuronové sítě
$P_{FVE-model}$	Predikovaný výkon FVE počítaný pomocí matematického modelu
p_n	Pravděpodobnost
$P_{FVE,normovane}(t)$	Normovaný okamžitý výkon FVE v čase t
$P_{FVE}(t)$	Je okamžitý výkon FVE v čase t
$P_{FVEoblast}$	Výkon v oblasti
P_{FVE}	Predikce jako očekávaná hodnota vyrobené elektřiny z FVE
$P_{FVE}(\tau)$	Okamžitý výkon FVE při teplotě τ
p, q	Řád modelu
r	Pearsonův korelační koeficient
S_t	Sezónní složka časové řady
S_V	Vyrobená elektřina od všech výrobců v dané soustavě
S_S	Spotřeba elektřiny
S_Z	Ztráty v přenosových a distribučních sítích
S_R	Rezervní výkon

S_{xy}	Je kovariance proměnných X a Y
x	Směrodatná odchylka proměnné X
S_y	Směrodatná odchylka proměnné Y
σ^2	Rozptyl
σ	Směrodatná odchylka
T_t	Trendová složka časové řady
TDD_t^h	Hodnota t -tého druhu TDD v hodině h roku
TDD_{pt}^d	Denní průměr přepočteného TDD
TDD_{nt}^d	Denní průměr normálového TDD
TDD	Typový diagram dodávky
TDD_n	Typový diagram dodávky při normální teplotě
TDD_{skut}	Typový diagram přepočtený na skutečnou teplotu
T^C	Termodynamická teplota, které odpovídá aktuální teplotě článku t^C
T^{C0}	Termodynamická teplota
U_{0C}	Napětí naprázdno, který v sobě zahrnuje solární záření G_a a teplotu článku t^C
U_t	Tepelné napětí, které odpovídá teplotě článku
W^{sml}	Celková smluvená dodávka nebo odběr
W^{skut}	Skutečný odběr naměřený v předávacích místech subjektu zúčtování
W^{reg}	Regulační práce dodaná do ES v předávacích místech subjektu zúčtování
W_n	Označení váhy neuronové sítě
X_n	Označení vstupu neuronové sítě
X	Označení náhodné veličiny
y_t	Formální zápis časové řady

Seznam obrázků

2.1	Energetický systém	20
2.2	Vertikálně integrovaný systém [1]	21
2.3	Umístění trhu [1]	21
2.4	Zjednodušený model fungování liberalizovaného trhu s elektřinou [1]	22
2.5	Model trhu s elektřinou [1]	24
2.6	Rozdělení instalovaného výkonu v ČR [2]	25
2.7	Komunikace mezi subjekty na trhu s elektřinou [1]	27
2.8	Průběh spotřeb jednotlivých kategorií zákazníků v roce 2010 [2]	30
2.9	Schéma burzovního obchodování [1]	32
2.10	Struktura ceny za elektřinu	33
2.11	Průběh spot market indexů pro leden 2011 [3]	35
2.12	Odběrový diagram ideálního odběratele [4]	35
2.13	Odběrový diagram – vyšší spotřeba v pracovním týdnu [4]	36
2.14	Specifický odběrový diagram [4]	36
2.15	Vznik odchylky [1]	37
2.16	Normalizovaný typový diagram dodávky [1]	41
2.17	Vztah skutečné teploty a zatížení [1]	42
3.1	Vývoj výkupních cen a instalovaného výkonu v OZE v ČR	45
3.2	Důsledky rozvoje FVE v ČR	45
3.3	Přírodní podmínky pro FVE v ČR [5]	46
4.1	Průběhy z analyzované FVE	48
4.2	Analýza dat FVE	48
4.3	Závislost výkonu FVE na oblačnosti	50
4.4	Průběh výkonu FVE v různých dnech roku	50
4.5	Působnost jednotlivých distribučních společností na území ČR [2]	51
4.6	Instalovaný výkon v jednotlivých oblastech	51
4.7	Seznam meteostanic	53
4.8	Analýza dat FVE	54
4.9	Srovnání naměřených a predikovaných dat	55
4.10	Doba mezi východem a západem slunce	55
5.1	Výstupy z databáze PVGIS	57
5.2	Box-Jenkins algoritmus	60
5.3	Schéma biologického neuronu [6]	61
5.4	Model neuronu [6]	62
5.5	Funkce sigmoid	62
5.6	Síť typu feed-forward [6]	63
5.7	Použitá neuronová síť [7]	64

5.8	Srovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami výkonu při použití průměrných denních teplot	64
5.9	Srovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami výkonu při použití reálných teplot článku	65
5.10	Model fotovoltaického článku článku [27]	66
5.11	Srovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami výkonu při použití reálných teplot článku	68
5.12	Srovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami výkonu při použití průměrných teplot pro dané místo	68
6.1	Prediktor FVE	72
6.2	Sluneční dni ze všech naměřených dat	73
6.3	Rozložení reprezentativních bodů během dne	74
6.4	Ukázka prokládání křivky č. 6	74
6.5	Obalové křivky ze slunečních dní	75
6.6	Křivky slunečních dní	75
6.7	Porovnání skutečně naměřených dat a vypočtených denních diagramů	76
6.8	Průběhy normovaných dat	77
6.9	Histogramy četností normovaných výkonů	77
6.10	Statistiky normovaných dat v třídách oblačnosti	78
6.11	Porovnání skutečné výroby a predikce	79
6.12	Chyby predikce	79
7.1	Prediktor FVE pro celou ČR	81
7.2	Porovnání denního diagramu pro referenční elektrárnu a pro oblast	82
7.3	Koeficient středu pro E.ON.-východ	84
7.4	Koeficient maxima pro E.ON.-východ	84
7.5	Koeficient roztažení křivky	85
7.6	Srovnání denních diagramů před a po korekcích	86
7.7	Vypočtené DD_{oblast}	86
7.8	Chyby predikce pro celou ČR	87
A.1	Vypočtené DD_{oblast}	100
A.2	Vypočtené DD_{oblast}	100

Seznam tabulek

2.1	Typové diagramy dodávky [8]	41
4.1	Způsoby vyjádření oblačnosti	52
5.1	Rozdíl skutečně vyrobené elektřiny oproti modelu	65
A.1	Korekce středů pro jednotlivé oblasti	98
A.2	Data oblačnosti	99

1 Úvod

Energetika prošla za posledních 20 let poměrně bouřlivým rozvojem. Mezi nejvýznamnější změny patří především liberalizace energetiky, a dále pak také prudký rozvoj obnovitelných zdrojů, a to především fotovoltaických elektráren.

Proces liberalizace, tedy přechod od státem vlastněných energetik k tržnímu prostředí, byl odstartován vydáním energetického zákona 458/2000 Sb. Tento zákon definoval nová pravidla a spolu s dalšími zákony a vyhláškami tvoří legislativní rámec obchodování s elektřinou.

Z možných variant modelů trhu s elektřinou si Česká republika zvolila režim přístupu třetích stran k sítím za regulované ceny. Přenos a distribuce zůstaly regulovány, protože tvoří přirozený monopol a bylo by obtížné v této oblasti vytvořit konkurenční prostředí. Samotný trh tedy vznikl na straně výrobce, který může prodávat svoji vyrobenou elektřinu. Další možností pro výrobce je nabízet elektřinu ve formě podpůrných služeb, kdy jediným poptávajícím je provozovatel přenosové soustavy společnost ČEPS a. s., který má dle zákona povinnost řídit soustavu na úrovni přenosové soustavy. V podstatě se na trhu objevují dvě komodity, a to silová elektřina a elektřina ve formě podpůrných služeb.

Následkem liberalizace vznikly nové subjekty, jako jsou Energetický regulační úřad, provozovatelé distribučních soustav, provozovatel přenosové soustavy a Operátor trhu s elektřinou. ERU určuje podmínky regulace jednotlivým subjektům pomocí svých cenových rozhodnutí, OTE se stará o znovu sjednocení obchodních a fyzických toků elektřiny, tedy o zúčtování odchylek.

Další důležitou změnou v energetice je masivní rozvoj fotovoltaiky. Její rozvoj pomalu započal od roku 2002, kdy byla výkupní cena elektřiny stanovena na 6 Kč/kWh. To samo o sobě nepřineslo výrazný nárůst instalací, protože ekonomická rentabilita výstavby byla velice nízká. Nicméně od roku 2000 do roku 2008 byly FVE podporovány pomocí investičních dotací. Po roce 2006 byly výkupní ceny FVE nastaveny tak, aby návratnost investice do výstavby tohoto zdroje byla 15 let. Od tohoto roku je také patrný nejvýznamnější nárůst nových instalací těchto zdrojů.

Tento prudký rozvoj nových instalací FVE sebou nese potřebu dopředu stanovit množství vyrobené elektřiny, přičemž tato informace je nutná jak pro potřeby řízení soustavy, tak i pro obchod s elektřinou.

Hlavním cílem této práce je tedy analyzovat současný stav trhu s elektřinou v České republice a dále navrhnout prediktor výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren, který umožní stanovit, jaké bude vyráběné množství elektřiny ze všech FVE v České republice v horizontu několika dní dopředu a také určit, s jakou pravděpodobností bude tohoto výkonu dosaženo, neboli stanovit nepřekročitelné meze predikce výroby z FVE. Podstatnou vlastností navrhovaného prediktoru je využití veřejně dostupných dat předpovídaného či měřeného počasí.

1.1 Současný stav problematiky

V minulosti došlo v energetice k několika významným změnám. Jedna z významných změn byla liberalizace energetiky, neboli zavedení tržních principů. Proces liberalizace energetiky probíhal v několika fázích, přičemž od roku 2006 mají i domácnosti, jakožto nejmenší odběratelé, možnost volby svého dodavatele elektřiny. Tato problematika je poté dále rozebrána v kapitole 2.

Další významnou změnou v energetice byl prudký rozvoj výstavby fotovoltaických elektráren, který sebou nese potřebu určit budoucí výkon či výrobu z těchto zdrojů. Znalost budoucího vyrobeného množství elektřiny, s tím související minimalizace odchylky, neboli rozdíl mezi predikovanou hodnotou výroby elektřiny a změřenou hodnotou, je podstatná pro většinu subjektů na trhu s elektřinou. Provozovatel přenosové soustavy potřebuje v přípravě provozu definovat správné množství nakupovaných podpůrných služeb, obchodník potřebuje vědět, jaké množství elektřiny může prodat.

Většina dnes publikovaných prací, která se zabývá predikcí výroby z obnovitelných zdrojů, využívá jako výpočetní nástroj neuronové sítě či jiné algoritmy. Popis těchto postupů a možností je pak náplní kapitoly 5.

1.2 Stanovené cíle

Základním cílem této práce je poskytnout stručný přehled principů fungování liberalizovaného trhu v České republice, jeho historii, subjekty a vztahy mezi nimi. Jelikož obchodovatelnou komoditou na trhu je kromě elektřiny ve formě podpůrných služeb také silová elektřina, tak je podstatná znalost jejího budoucího vyráběného množství a také cena, za kterou je jí možno obchodovat.

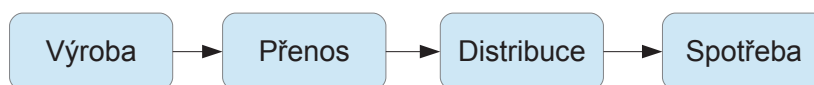
V souvislosti s prudkým rozvojem nových instalací fotovoltaických elektráren v České republice je nutné s dostatečnou přesností predikovat budoucí výrobu elektřiny z těchto zdrojů. Proto je hlavním úkolem této práce navrhnout prediktor výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren pro celou Českou republiku, který může sloužit pro obchodníka s elektřinou, ale také i pro další subjekty. Součástí prediktoru pak bude také definice a vyčíslení chyb predikce, které jsou klíčové pro vymezení intervalu, ve kterém se budoucí hodnota bude nacházet.

2 Obchodování s elektřinou v liberalizovaném prostředí

Úvodem do problematiky obchodování s elektřinou v liberalizovaném prostředí je nutno definovat základní pojmy a termíny týkající se této oblasti.

2.1 Elektroenergetický systém

Energetický systém, nebo také elektrizační soustava jsou definovány jako, vzájemně propojený soubor výrobních, přenosových, distribučních a spotřebních zařízení, přičemž všechna zařízení se vzájemně ovlivňují.[9] Tento popis lze také vyjádřit pomocí následujícího obrázku, který zahrnuje čtyři výše zmíněné základní části.



Obr. 2.1: Energetický systém

Energetický systém musí splňovat celou řadu funkcí, přičemž mezi základní patří především:

- zajištění dostatečného množství elektřiny v požadovaném čase
- zajištění kvality elektrické energie
- zajištění spolehlivosti dodávky elektrické energie
- minimalizaci nákladů a vlivů ES na životní prostředí

Pro zajištění dostatečného množství elektřiny v každém okamžiku platí základní bilanční rovnice:

$$S_V = S_S + S_Z + S_R \quad (2.1)$$

Kde:

S_V – vyrobená elektřina od všech výrobců v dané soustavě

S_S – spotřeba elektřiny

S_Z – ztráty v přenosových a distribučních sítích

S_R – rezervní výkon

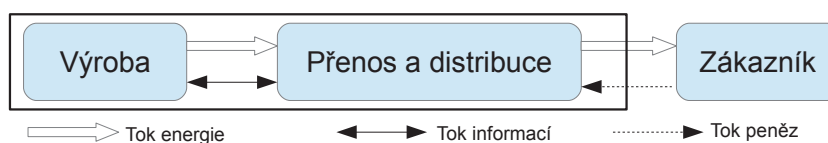
Tato rovnice říká, že v každém okamžiku se vyrobená elektřina musí rovnat spotřebované. Jelikož není možné naprosto přesně stanovit výrobu i spotřebu v určité lokalitě, je nutno mít dostatek rezervního nebo také regulačního výkonu pro zajištění vyrovnané bilance.[1]

2.2 Vertikálně integrovaný systém

Před počátkem liberalizace energetiky v každém státě Evropy zajišťovala jedna státní společnost všechny oblasti od výroby přes přenos až po distribuci elektřiny. Jelikož je elektřina považována za veřejný statek a její dostupnost je klíčová pro fungování celého státu, bylo proto vhodné, že jedna společnost řídila a vlastnila celý systém. Stát tedy reguloval přísun prostředků do sektoru, rozhodoval o investicích.

Tato struktura se nazývá vertikálně integrovaný systém, který je možno charakterizovat následujícími body:

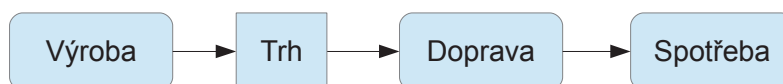
- centralizace společnosti zabývající se technologií přeměn – transportu
- distribuce a užití elektrické energie a jejího řízení
- maximalizace technických parametrů
- jeden nebo maximálně dva produkty společnosti
- neexistence konkurence
- jednotná cenová politika [1]



Obr. 2.2: Vertikálně integrovaný systém [1]

2.3 Liberalizace energetiky v ČR

Zkušenosti ve světě ukázaly, že otevřením části odvětví, kde je možná konkurence, dochází k optimalizaci nákladů a hlavně také snížení cen. V energetickém odvětví není možné vytvořit konkurenční prostředí ve všech oblastech, protože dopravní infrastruktura tvoří jeden celek, který je vhodné nechat spravovat jedním subjektem. Proto je vhodné vytvořit konkurenční prostředí na úrovni výroby elektřiny. [1]



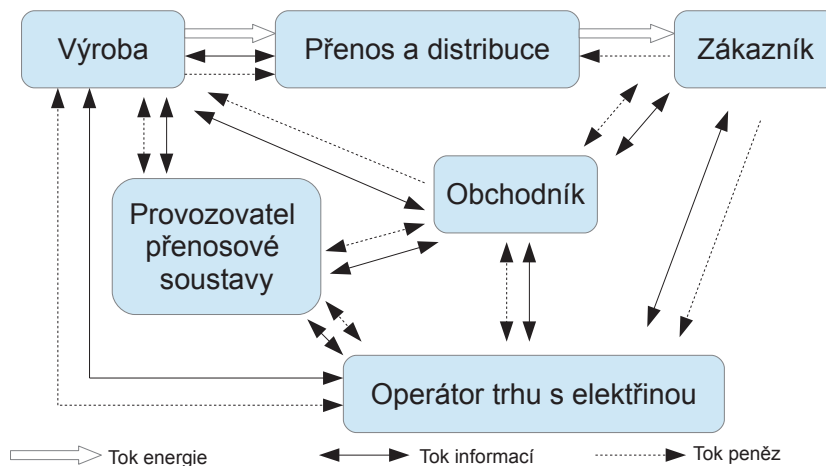
Obr. 2.3: Umístění trhu [1]

Samotný proces liberalizace, tj. přechod od vertikálně integrované společnosti k tržnímu prostředí, je možný po splnění několika základních kroků:

- jednotná cenová politika
- nutná existence legislativy

- privatizace sektoru energetiky
- vytvoření konkurenčního prostředí
- existence nových informačních technologií
- nutnost průhlednosti trhu s energií, průhlednost toku financí

Z hlediska legislativy je nutno zmínit důležitý zákon 458/2000 Sb., který spolu s doplňujícími vyhláškami odstartoval postupnou liberalizaci trhu s elektřinou v ČR. Na základě již zmíněného zákona vznikly na trhu s elektřinou další subjekty, které zajišťují jeho fungování. Zjednodušený model fungování trhu pak ukazuje Obr. 2.4. Do procesu vstupuje



Obr. 2.4: Zjednodušený model fungování liberalizovaného trhu s elektřinou [1]

obchodník, který má možnost nakoupit od výrobců požadované množství elektřiny a tu následně s marží prodat. V tomto systému musí fungovat někdo, kdo bude vyhodnocovat uskutečňované obchody. Tím je Operátor trhu s elektřinou. Dále je nutno soustavu řídit tak, aby v každém okamžiku byla vyrovnána bilance elektřiny v soustavě. To je činností provozovatele přenosové soustavy.

2.4 Model trhu s elektřinou v ČR

Česká republika si z možných modelů fungování zvolila model trhu TPA – third part access. Tento model je decentralizovaný a vychází z faktu, že přenosová soustava a regionální distribuční společnosti jsou přirozené monopoly, a proto je na tomto poli vyloučena konkurence. Umožňuje tedy přístup třetích stran k sítím za podmínek regulovaných cen, které stanovuje svými cenovými rozhodnutími ERU. Dochází tím tedy k oddělení sítí od konečné dodávky a výroby. Vyčleňují se zde samostatné činnosti od výroby až ke spotřebě:

- výroba elektřiny
- doprava elektřiny
 - přenosovou sítí

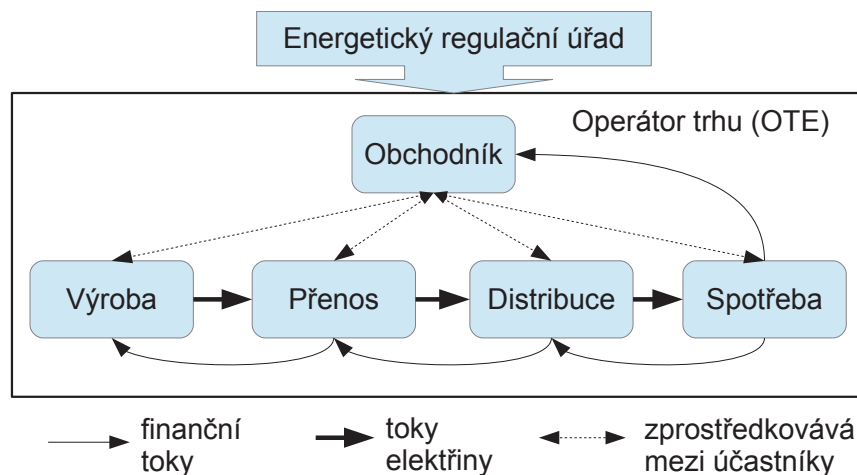
- distribuční síť
- systémové služby
- dodávka elektřiny

U dvoustranných smluv se oddělila funkce vlastního fyzického dodání elektřiny od funkce dodavatele, který zajistí dodání elektřiny od výrobce a její vyúčtování zákazníkovi. Nakonec zajistí, aby všechny subjekty po cestě (PPS, PDS) elektřiny dostaly svůj podíl peněz. Tímto se platba za elektřinu u koncového zákazníka dělí na tyto části:

- platba za smlouvenou vyrobenou elektřinu (u výrobce)
- platba za dopravu
 - přenosovou soustavou
 - distribuční soustavou
- platba za systémové služby (udržení kvality elektřiny i při kolísání odběru)
- platba za odchylku skutečné spotřeby od objednaného množství
- platba za vlastní dodávku (obsahuje marži dodavatele)

Z těchto částí jsou regulované ceny za použití sítí a platby za systémové služby, jejich ceny určuje ERU. Ostatní položky jsou časově proměnné a obecně jsou od každého výrobce jiné. Zákazník může v daném okamžiku získávat dodávku elektřiny od více výrobců. Rozdíl mezi množstvím elektřiny, co si zákazník usmlouvá a kolik skutečně odebere, je zajištěn provozovatelem přenosové soustavy z náhradních zdrojů poskytujících podpůrné služby. Aby bylo možné identifikovat jednotlivé podíly účastníků a správně je ocenit, je nutné stanovit dopředu sjednané diagramy odběru s jednotlivými dodavateli a zajistit měření odběru v jednotlivých hodinách. Pokud vzniknou u některé ze stran rozdíly, které uhradil dodávka poskytovatel ze zdrojů podpůrných služeb, vzniknou tímto odchylky v procesu zúčtování. Otevřením trhu pro dodávky od více dodavatelů se oddělil svět obchodních vztahů od světa skutečných dodávek. Zúčtování odchylek potom tyto procesy opět spojuje. Má zajistit finanční vyrovnání a stabilitu vztahů v energetice. [36]

Z modelu na Obr. 2.5 jsou patrné jednotlivé finanční či energetické toky. Na celý trh dohlíží ERU jakožto regulátor a určovatel podmínek. Spotřebitel si může nakoupit elektřinu od obchodníka a ten pak musí zaplatit regulované ceny těm, přes jejichž vedení elektřina prošla, a také výrobcí za vyrobenou elektřinu. Další možností je, že si zákazník nakoupí elektřinu od výrobce sám.



Obr. 2.5: Model trhu s elektřinou [1]

2.5 Účastníci trhu s elektřinou

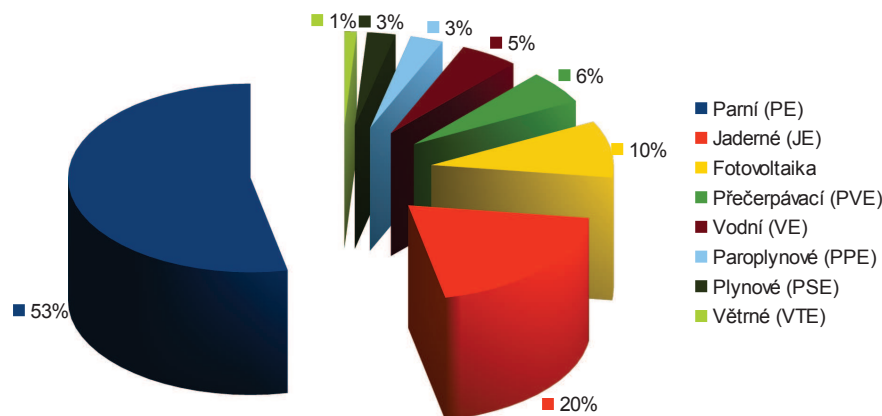
Dle § 22 energetického zákona jsou za účastníky trhu považováni výrobci, provozovatel přenosové soustavy, provozovatelé distribučních soustav, operátor trhu, obchodníci s elektřinou a koneční zákazníci. Účastníky trhu s elektřinou v České republice můžeme rozdělit obecně na regulované, neregulované a ostatní. Vzhledem k použitému modelu trhu s elektřinou v ČR jsou regulovanými subjekty vlastníci a provozovatelé přenosové a distribuční soustavy. Tedy provozovatel přenosové soustavy a provozovatelé distribučních soustav. Mezi neregulované subjekty je pak možno zařadit výrobce elektřiny, obchodníky s elektřinou a konečné zákazníky. Mezi ostatní lze pak zařadit regulátora, což je Energetický regulační úřad, který určuje pomocí svých cenových rozhodnutí ceny za regulované položky a v podstatě určuje pravidla trhu. Dalším účastníkem je pak Operátor trhu s elektřinou, který vyhodnocuje toky energií a stará se o zúčtování odchylek. Posledním důležitým článkem je burza, která umožňuje obchodování jednotlivých energetických komodit a tvoří v podstatě platformu pro obchodování. [29]

2.5.1 Výrobci

Výrobcem je dle zákona 458/2000 Sb. fyzická či právnická osoba, která vyrábí elektřinu a je držitelem licence na výrobu elektřiny. Jedná se o licenci skupiny číslo 11. Definice práv a povinností každého výrobce je pak možno nalézt v § 23 výše zmíněného zákona. Další vyhlášky a nařízení se týkají především životního prostředí a s tím související modernizací elektráren. (U tepelných odsíření atd.) U výrobců je dále nutno zmínit, zda je výrobce subjekt zúčtování s odpovědností za odchylku, nebo odpovědnost za odchylku za něj nese někdo jiný (obchodník). Zisk těchto výrobců pak vzniká prodejem elektřiny konečným zákazníkům, obchodníkům nebo případně i PPS, kterému může například prodávat elektřinu ve formě podpůrných služeb.

Rozdělení výroben (elektráren) lze dle legislativy provést různými způsoby. Například dle instalovaného výkonu, dle typu zdroje, dle vlastníka, dle připojení výrobní do PS nebo

DS a dalších. Na Obr. 2.6 je znázorněno rozdělení instalovaného výkonu ČR, dle typu zdroje. Z hlediska vlastnického je dominantním vlastníkem výroben elektřiny polostátní společnost ČEZ.



Obr. 2.6: Rozdělení instalovaného výkonu v ČR [2]

Specifickou skupinou výrobců tvoří výrobci elektřiny z obnovitelných zdrojů, která je státem podporována a v podstatě regulací upravena. Výrobce elektřiny z OZE má možnost si vybrat mezi dvěma druhy podpory:

- zelený bonus
- režim pevných výkupních cen

V prvním režimu výrobce nabídne elektřinu obchodníkovi za dohodnutou cenu a k této ceně je mu pak vyplacen tzv. zelený bonus, jehož výše je stanovována cenovým rozhodnutím ERU.

V režimu pevných výkupních cen je elektřina od výrobce vykupována za pevně stanovenou cenu, která je stanovována taktéž pomocí cenových rozhodnutí ERU.

Jak již bylo řečeno, výrobce má možnost si mezi těmito druhy podpory vybrat, přičemž obecně lze říci, že zisky v režimu pevných výkupních cen jsou obecně nižší, než v režimu zelených bonusů. Je to vykoupenu určitou vyšší mírou jistoty v režimu pevných výkupních cen.

2.5.2 Provozovatelé distribučních soustav

Z bývalých lokálních energetik vznikly po liberalizaci tři významné distribuční společnosti a několik lokálních. Jsou to:

- ČEZ Distribuce, a. s.
- E.ON Distribuce, a. s.
- PREdistribuce, a. s.

Tito distributoři spravují distribuční soustavu, což je soubor vzájemně propojených vedení a zařízení 110 kV, s výjimkou vedení patřící přenosové soustavě a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV nebo 35 kV sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území České republiky, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. [10] Provozovatel DS je fyzická nebo právnická osoba, která má licenci na distribuci elektřiny. Jeho povinností je distribuovat elektřinu koncovým zákazníkům a připojit k DS každého, kdo splňuje pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS).

Seznam ostatních lokálních distributorů lze pak nalézt na stránkách Energetického regulačního úřadu.

2.5.3 Provozovatel přenosové soustavy

Jediným provozovatelem přenosové soustavy je státní společnost ČEPS a. s., která je přirozeným monopolem a má výhradní licenci na přenos elektrické energie v České republice. Mezi jeho hlavní činnosti patří přenos elektřiny v rámci ČR i v rámci mezinárodní spolupráce. Dále ČEPS řídí provoz přenosové soustavy, což je soubor rozvodných zařízení a vedení 400, 220 a 110 kV. Samotné řízení soustavy provádí pomocí takzvaných systémových služeb, které představují soubor činností, kterými PPS zajišťuje kvalitu a spolehlivost dodávky elektřiny na úrovni PS a plnění mezinárodních závazků. Patří mezi ně čtyři základní, a to:

1. udržování kvality elektřiny
2. udržování výkonové rovnováhy v reálném čase
3. obnovení provozu
4. dispečerské řízení

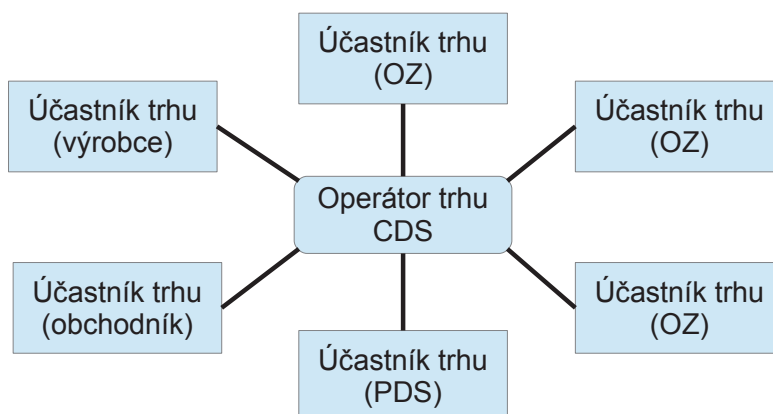
Aby byl PPS schopen zajistit výše uvedené systémové služby, nakupuje od jednotlivých výrobců takzvané podpůrné služby. Přesná specifikace jednotlivých systémových a podpůrných služeb je popsána v dokumentu Kodex přenosové soustavy, který je volně ke stažení na stránkách <http://www.ceps.cz> [11]

2.5.4 Operátor trhu s elektřinou

Operátor trhu s elektřinou vznikl v roce 2001 následkem liberalizace trhu s elektřinou na základě zákona 458/2000 Sb. Z hlediska vlastnické struktury se jedná o akciovou společnost založenou státem, kdy jediným jejím akcionářem je stát. Činnost OTE je striktně omezena na činnost danou licencí skupiny 15 z důvodu zamezení využívání znalostí a informací operátora o trhu s elektřinou v ČR. Je požadována nezávislost od ostatních účastníků trhu.

OTE zahájil svoji činnost v roce 2002, kdy převzal od společnosti ČEPS činnost finančního vypořádání odchylek mezi subjekty. Postupem času se jeho činnosti rozrostly na finanční zajištění jednotlivých subjektů, organizování trhu s elektřinou a plynem a poskytování technického zázemí pro změnu dodavatele. Na základě legislativy lze veškeré jeho činnosti v krátkosti shrnout do následujících bodů:

- organizování krátkodobého trhu s plynem a krátkodobého trhu s elektřinou a ve spolupráci s provozovatelem přenosové soustavy vyrovnávacího trhu s regulační energií
- vyhodnocování odchylky za celé území České republiky a toto vyhodnocení předávat jednotlivým subjektům zúčtování a provozovateli přenosové nebo přepravní soustavy a zajistit jejich vyúčtování
- zpracování a zveřejňování měsíční a roční zprávy o trhu s elektřinou a plynem
- predikce očekávané spotřeby elektřiny a plynu a způsob zajištění rovnováhy mezi nabídkou a poptávkou po elektřině a plynu
- zajišťování a poskytování účastníkům trhu s elektřinou nebo plynem skutečné hodnoty dodávek a odběrů elektřiny nebo plynu
- zajišťování zpracovávání typových diagramů dodávek v součinnosti s provozovateli distribučních soustav
- správa veřejně přístupného rejstříku obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů



Obr. 2.7: Komunikace mezi subjekty na trhu s elektřinou [1]

Obr. 2.7 znázorňuje komunikaci mezi OTE a subjekty na trhu, kdy veškeré informace od jednotlivých účastníků jsou spravovány v centrálním datovém skladu OTE.

Závěrem lze říci, že OTE tvoří důležitou součást liberalizovaného trhu a v podstatě funguje jako spojovací článek při vypořádání finančních a energetických toků. [1] [3]

2.5.5 Obchodník s elektřinou

Obchodníkem s elektřinou je fyzická či právnická osoba, která je držitelem licence na obchod s elektřinou a nakupuje elektřinu za účelem jejího prodeje. Následkem liberalizace se na trhu objevila celá řada nových společností, které mají licenci na obchod. Obchodník může být také vlastníkem licence na výrobu a distribuci v lokální distribuční síti, což může být výhodné u větších společností, které si mohou nakupovat elektřinu pro zásobování vlastní lokální distribuční společnosti.

Jedno z možných rozdělení obchodníků lze provést podle toho, zda jsou nebo nejsou subjekty zúčtování. Ti, kteří nejsou subjekty zúčtování, lze považovat za překupníky. Převážná většina obchodníků jsou subjekty zúčtování z důvodu možného většího uplatnění na trhu s elektřinou. Jejich příjmy tvoří jen marže za překupování elektřiny, ale i příjem díky odpovědnosti za odchylku subjektů, které nejsou subjekty zúčtování (výrobci, koneční zákazníci a obchodníci).

Je důležité zmínit odchylku ve vztahu k obchodníkům. Samotná problematika odchylky je popsána v kapitole 2.10. OTE vyhodnocuje každou hodinu odchylku jednotlivých subjektů a provádí její zúčtování. Cílem každého obchodníka je proto zmenšit odchylku a tím snížit náklady na její zaplacení. Z tohoto důvodu je otázka kvalitní predikce spotřeby daného subjektu pro obchodníka klíčová. Obchodníci (subjekty zúčtování) mají více možností, jak obchodovat s elektřinou. Mohou mít přístup na organizovaný krátkodobý trh, případně na vyrovnávací trh, na kterém mohou vylepšit svoji bilanci. Další možností jsou pak přeshraniční obchody, které však vyžadují splnění určitých požadavků.

Přes všechny výhody subjektu zúčtování jsou zde také negativa spojená s nutným značným kapitálem pro samotný vstup na trh. Obchodník skládá OTE kauci, která slouží pro krytí závazků vůči OTE.[1],[12]

2.5.6 Koneční zákazníci

Koneční zákazníci představují největší procento subjektů na trhu. Jejich rozdělení lze provést mnoha způsoby, přičemž nejsnazší je podle druhu měření. Touto problematikou se zabývala vyhláška č. 218/2001 Sb., která je v současné době nahrazena vyhláškou č. 82/2011 Sb. Dle této vyhlášky je možno měření nově rozdělit do 4 kategorií, podle toho o jaký typ se jedná a kde je umístěno.

A)

- Předávací místa mezi přenosovou soustavou a distribuční soustavou a mezi distribučními soustavami s napětím vyšším než 1 kV.
- Odběrná místa zákazníků s odběrem elektřiny z přenosové soustavy.
- Odběrná místa zákazníků s odběrem elektřiny z distribuční soustavy s napětím vyšším než 52 kV.

- Odběrná místa zákazníků s odběrem elektřiny z distribuční soustavy s napětím od 1 kV do 52 kV včetně a s rezervovaným příkonem nad 250 nebo 400 kW.

B)

- Předávací nebo odběrná místa mezi jednotlivými distribučními soustavami s napětím do 1 kV s nepřímým měřením.
- Předávací místa výrobců elektřiny s napětím do 1 kV a s instalovaným výkonem výroby elektřiny nad 30 kW připojených k distribuční soustavě nebo do odběrného místa zákazníka nebo do předávacího místa jiné výroby elektřiny.
- Odběrná místa zákazníků s odběrem elektřiny z distribuční soustavy s napětím od 1 kV do 52 kV včetně a s rezervovaným příkonem do 250 kW nebo 400 kW včetně.
- Odběrná místa zákazníků s odběrem elektřiny z distribuční soustavy s napětím do 1 kV s rezervovaným příkonem od 100 kW nebo s hlavním jisticím prvkem o jmenovitém proudu od 200 A, a to od první změny dodavatele elektřiny.

S)

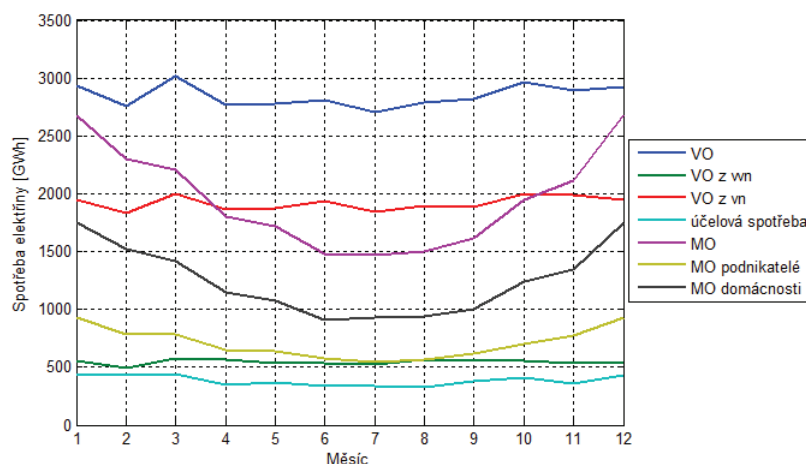
- Odběrná místa zákazníků s odběrem elektřiny z distribuční soustavy, kde není technicky vhodné instalovat měření typu A nebo měření typu B.
- Předávací místo výrobců elektřiny s instalovaným výkonem výroby elektřiny do 30 kW včetně, připojených k distribuční soustavě nebo do odběrného místa zákazníka nebo do předávacího místa jiné výroby elektřiny, kde není technicky vhodné instalovat měření typu A nebo měření typu B.

C)

- Pro odběrná místa ostatních zákazníků, kde není ekonomické instalovat výše uvedené typy měření.

Z hlediska vyhodnocování měřených údajů je stanoven základní měřicí interval pro měření typu A a B jedna čtvrt hodina a základní vyhodnocovací interval jedna hodina. Základní interval pro zpracování a přenos naměřených údajů je pro měření typu A jeden kalendářní den, pro B pak jeden měsíc. U měření typu S je základní interval pro zpracování a přenos naměřených údajů pro měřicí zařízení jeden měsíc. U měření typu C je pak zpracování a přenos údajů prováděn nejméně jedenkrát za rok. [13], [14]

Nejvíce zákazníků spadá do kategorie C, přičemž z hlediska spotřeby jsou největšími spotřebiteli elektřiny zákazníci typu A a B. Průběh spotřeb elektřiny pro jednotlivé kategorie odběratelů pro rok 2010 je ukázán na Obr. 2.8.



Obr. 2.8: Průběh spotřeb jednotlivých kategorií zákazníků v roce 2010 [2]

2.6 Burza

Burza tvoří důležitý článek při obchodování s elektřinou. Spíše než jako o účastníku trhu lze o ní hovořit jako o prostředníku nebo platformě pro obchodování. Pro obchodování s elektřinou, případně s dalšími energetickými produkty existují speciální energetické burzy.

V ČR existuje Power Exchange Central Europe, a.s. (PXE) – www.pxe.cz, která vznikla v roce 2007 a umožňuje obchodování s elektrickou energií s místem dodání v Česku, na Slovensku a v Maďarsku. Burza poskytuje anonymní obchodování se standardizovanými produkty se zajištěným vypořádáním a je dceřinou společností Burzy cenných papírů Praha.

Předmětem obchodu na PXE je elektřina o hodinovém výkonu 1 MW ve všech hodinách všech dnů sjednaného dodávkového období. Samotné obchodování je prováděno pomocí elektronického systému burzy, kdy účastníci obchodují pomocí objednávek zadávaných do tohoto systému. Mezi obchodované produkty patří:

- Komoditní futures s fyzickým vypořádáním
 - závazek dodání/zaplacení určitého počtu MWh po celou dobu daného dodávkového období
 - roční, čtvrtletní a měsíční
 - CZ, SK, HU
- Komoditní futures s finančním vypořádáním
 - závazek finančního vyrovnání cenových rozdílů předmětu obchodu po celou dobu daného dodávkového období
 - roční, čtvrtletní a měsíční
 - CZ
- Spotové kontrakty

- závazek dodání/zaplacení určitého počtu MWh pro konkrétní dodávkový den
- denní a hodinové
- CZ, HU

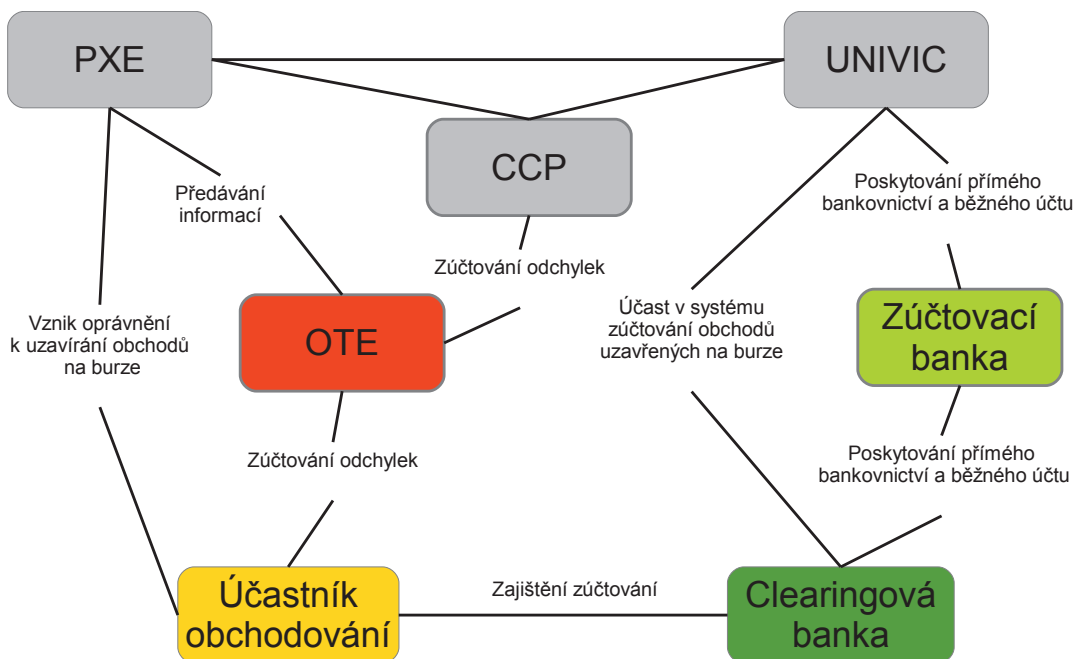
Dále jsou produkty rozlišeny dle typu dodávky na BASE LOAD a PEAK LOAD. [15] Důležité je také zmínit samotné podmínky pro účast na obchodování na PXE. Účastníkem této burzy musí být česká právnická osoba a musí být plátcem DPH. Další podmínkou je vlastnictví licence na obchod s elektřinou a také nutnost být subjektem zúčtování v systému OTE. Dále musí mít účastník uzavřenou smlouvu s některou z clearingových bank, které mohou vypořádávat obchody na PXE a také mít uzavřenou smlouvu s PXE.

Základními účastníky burzovních obchodů jsou účastníci obchodování a samotná burza. Další subjekty se spolupodílejí na burzovním obchodování a jsou to:

- Univyc, a. s. – dceřiná společnost Burzy cenných papírů Praha, která zajišťuje evidenci uzavřených obchodů, zúčtování obchodů a spravuje maržové vklady i clearingový fond
- CCP (Central Counterparty, a. s.) – dceřiná společnost Burzy cenných papírů Praha, která vykonává funkci centrální protistrany v procesu zúčtování a fyzické dodávky
- zúčtovací banka – vede účty (v EUR) společnosti Univyc a clearingovým bankám s cílem zúčtovat závazky a pohledávky, které plynou z burzovních obchodů
- clearingové banky – jsou banky účastníků obchodování, které mají uzavřeny zvláštní smlouvy s Univyc a zúčtovací bankou na zúčtování burzovních obchodů
- OTE – zajišťuje evidenci burzovních obchodů jednotlivých účastníků (subjektů zúčtování) a organizuje denní trh s elektřinou, na který mohou účastníci PXE vstupovat prostřednictvím obchodovacího prostředí PXE [15]

Jednotlivé smluvní vztahy mezi subjekty burzovního obchodování jsou pak ukázány na Obr. 2.9. Jak již bylo zmíněno u obchodníků, pro zajištění zúčtování je povinen každý účastník složit finanční záruky. PXE není jedinou platformou pro obchodování. Níže zmíněné burzy jsou příkladem dalších možných v rámci Evropy.

- European Energy Exchange AG – www.eex.com
- EPEX Spot – www.epexspot.com
- Nord Pool Spot AS – www.nordpoolspot.com
- Nord Pool ASA – www.nordpool.com
- Powernext – www.powernext.fr
- APX – www.apxgroup.com



Obr. 2.9: Schéma burzovního obchodování [1]

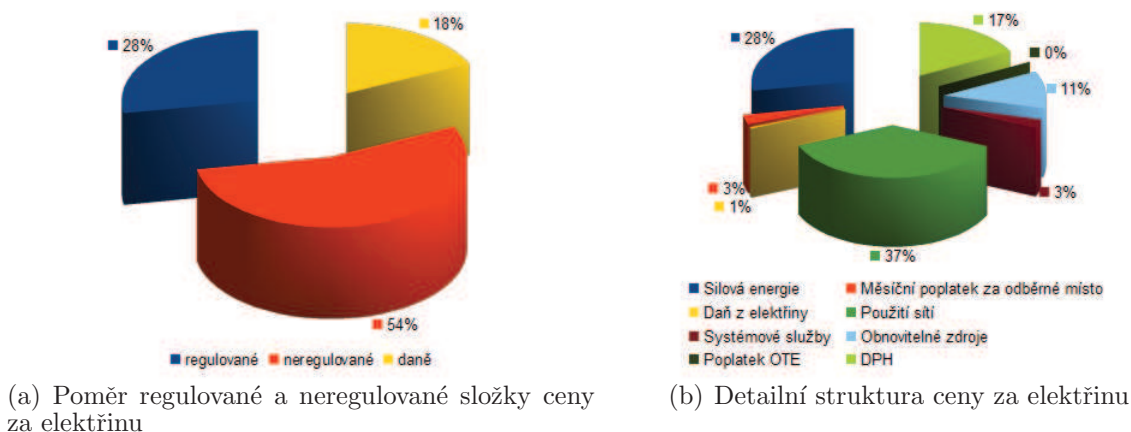
2.7 Struktura ceny za elektřinu

Cena za elektřinu se v současnosti skládá ze tří hlavních částí, a to:

- regulovaná část
 - plat za příkon
 - cena za distribuované množství elektřiny
 - cena za systémové služby
 - platba za činnost OTE
 - příspěvek na OZE, KVET, DZ
- neregulovaná část
 - stálý plat za dosávku elektřiny
 - cena silové elektřiny
- daně
 - daň z elektřiny
 - daň z přidané hodnoty

Podíl jednotlivých složek se liší podle velikosti celkově spotřebované elektřiny. Při srovnávání struktury ceny je vždy nutné přesně definovat, jak velký je celkový odběr, druh tarifu, jistič, region a další.

Pro ukázkou struktury výsledné roční ceny za elektřinu jsem vybral domácnost, která používá sazbu D02d s jističem do 1x25 A nebo do 3x10 A v regionu Plzeň-jih s roční spotřebou 3200 kWh. Struktura ceny je pak patrná z Obr. 2.10, přičemž Obr. 2.10(a) znázorňuje rozdělení mezi regulovanou, neregulovanou složku ceny a složku daní. Je patrné, že silová elektřina v tomto konkrétním případě tvoří jen 28 % z celkové roční platby za elektřinu. Další významnou složku na Obr. 2.10(b) tvoří příspěvek na OZE, který tvoří 11 % roční platby za elektřinu. Tento poplatek je nejvíce rostoucí v posledních letech a je dále rozebrán v kapitole 3.2.[16]



Obr. 2.10: Struktura ceny za elektřinu

2.8 Energetický regulační úřad

Energetický regulační úřad vznikl na základě vydání zákona č. 458/2000 Sb. 1. ledna 2001. Mezi jeho hlavní činnosti patří regulace v energetickém odvětví. Kromě elektřiny pokrývá i oblast plynárenství a teplárenství. Mimo jiných činností se stará o podporu hospodářské soutěže, podporu využívání obnovitelných a druhotných zdrojů energie a v neposlední řadě o ochranu zájmu spotřebitelů v oblastech energetiky, kde není možná konkurence. Jednou z jeho důležitých činností je vydávání licencí pro výrobu přenos i distribuci, pro kterou je oprávněn dle výše zmíněného zákona.

Od vzniku regulačního úřadu se postupně měnila metodika regulace cen, které byly určovány pro určité regulační období. V současné době se nacházíme ve III. regulačním období 2010–2014. Samotnou metodiku regulace je možno nalézt v dokumentu, který je dostupný na internetových stránkách ERU [2]. Dalšími důležitými dokumenty vydávanými ERU jsou cenová rozhodnutí, kterými úřad konkrétně stanovuje dané regulované ceny. [2]

2.9 Typy obchodů na trhu s elektřinou v ČR

Obchodovatelné komodity na trhu lze rozdělit do dvou skupin. V prvním případě se jedná o tzv. silovou elektřinu, což je dodávka výrobců ke spotřebitelům, a dále o elektřinu ve formě podpůrných služeb, kde jediným poptávajícím je provozovatel přenosové soustavy společnost ČEPS, která tyto služby využívá pro řízení a regulaci soustavy.

Další rozdělení je možné provést dle času uzavírání kontraktů a týká se jen silové elektřiny. Způsob nakupování podpůrných služeb je zmíněn v kapitole 2.9.3. Obchody s elektřinou můžeme rozdělit podle času uzavírání na několik typů:

- dvoustranné obchody
- obchody uzavřené na OKO
- obchody uzavřené na vnitrodenním trhu

Dvoustranné obchody jsou všechny druhy obchodů s fyzickou dodávkou, kromě organizovaných obchodů uzavřených na krátkodobém trhu s elektřinou (OKO).

Organizovaný krátkodobý trh se skládá z denního a vnitrodenního trhu. Denní trh je provozován každý den v týdnu a je na něm možno obchodovat elektřinu na 24 hodin následujícího dne. Nabídky a poptávky je možné zadávat nejpozději do 11:30 dne předcházejícího dne dodávky (den D-1). Dále pak obchody uzavřené na OKO – nabídka nebo poptávka elektřiny pro každou hodinu z 24 hodin následujícího obchodního dne v minimálním množství 1 MWh v každé hodině a poslední možností obchodování je vnitrodenní a vyrovnávací trh, který slouží k vyrovnání odchylky po uzavěrcce výše uvedených obchodů.

Vnitrodenní trh umožňuje účastníkům obchodovat až do doby 2 hodin před hodinou dodávky a je zahajován každý den v 16:00 hodin.

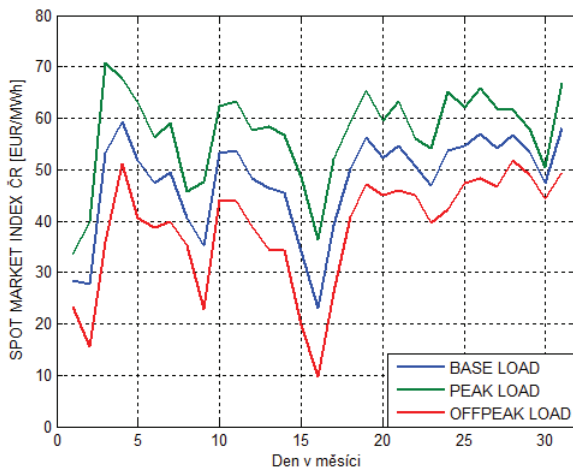
Ceny na denním trhu vznikají na základě protnutí křivek podaných nabídek na prodej a poptávek na nákup elektřiny pro každou z 24 hodin obchodního dne. V místě jejich protnutí dojde ke stanovení výsledné ceny, a to pro každou hodinu nezávisle. [36]

2.9.1 Obchodování na blokovém trhu

Dalším rozšířením organizovaného obchodu s elektřinou je organizovaný blokový trh s elektřinou, kde lze obchodovat denní bloky elektřiny, členěné na kontrakty typu BASE, PEAK a OFF PEAK, kdy blokem elektřiny se rozumí více hodin obchodovaných jako jeden celek. BASE představuje konstantní dodávku elektřiny po dobu 24 hodin, PEAK je dodávka elektřiny v pracovních dnech v době od 8 do 20 hodin a kontrakty typu OFF PEAK, což představuje dodávku v pracovních dnech v době od 0 do 8 a od 20 do 24 hod. Nejmenší obchodovatelnou jednotku představuje blok elektřiny o konstantní hodnotě dodávky elektřiny ve výši 1 MW po definovanou dobu dle typu kontraktu. Při obchodování dochází k anonymnímu spárování vložených objednávek na prodej a na koupi elektřiny s možností uzavření obchodu v období 5 dnů až 1 dne před dnem dodávky (D-5 až D-1).

Tyto produkty mají obecně různé ceny, zjednodušeně by se dalo říci, že cena bloku elektřiny BASE by měla být nižší než PEAK. Výsledná cena nakoupené elektřiny je pak závislá nejenom na množství nakoupené elektřiny, ale i na časovém intervalu dodávky či původu elektřiny.

Z Obr. 2.11 je patrné, že ceny jsou závislé nejenom na tom, o jaký blok se jedná, ale i na druhu dne, ve kterém se obchodovalo. Cena pro všechny bloky je nejnižší v neděli,

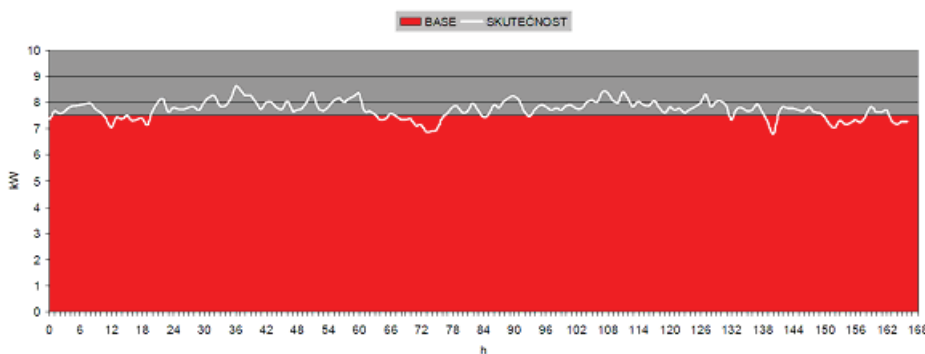


Obr. 2.11: Průběh spot market indexů pro leden 2011 [3]

čemuž odpovídají pořadová čísla dní 2, 9, 16, 23 a 30. Předchozí hypotéza, že bloky PEAK jsou obecně dražší než BASE, jsou na grafu patrné také. Blok OFFPEAK LOAD vychází jako nejlevnější. [12] [4]

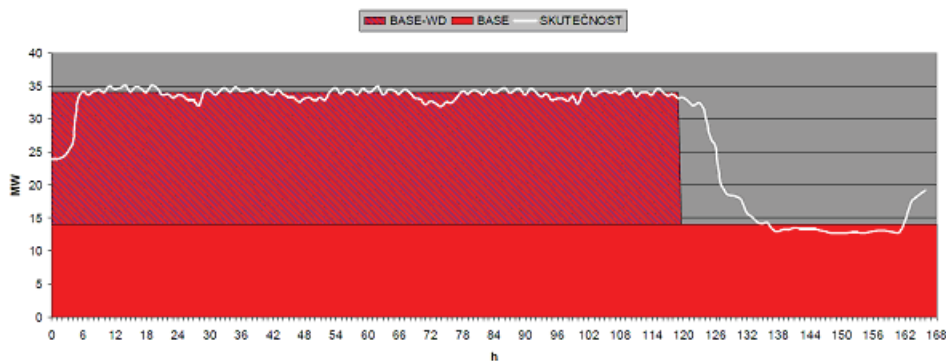
2.9.2 Pokrývání odběrových diagramů

Cílem odběratele je nakoupit elektřinu s co nejnižšími náklady, a to buď sám, nebo pomocí obchodníka. Každý odběratel je charakterizován svým odběrovým diagramem, jehož průběh je závislý na tom, jaké druhy spotřebičů využívá, o jaký druh provozu se jedná a jaké je rozložení směn aj. Z tohoto pohledu je pak také možné odběratele rozdělit podle charakteristického průběhu jejich diagramu zatížení. Na následujících obrázcích jsou ukázány tři odběrové diagramy a jejich pokrytí bloky elektřiny.



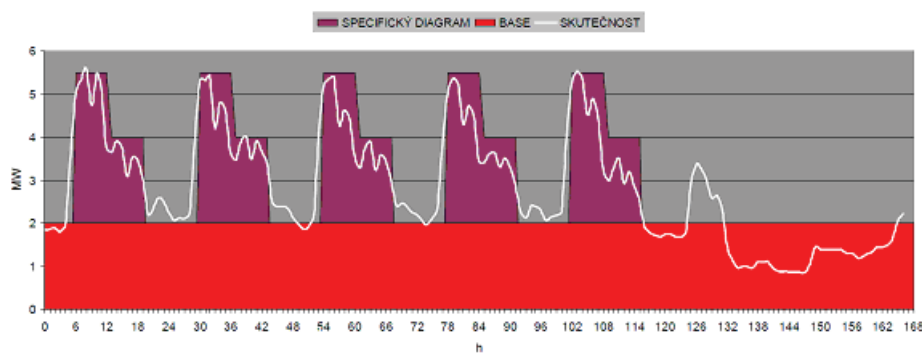
Obr. 2.12: Odběrový diagram ideálního odběratele [4]

Ideálním odběratelem by byl ten, jehož odběr elektřiny byl v čase konstantní. Nevznikala by žádná odchylka. Takový diagram (viz Obr. 2.12) je potom jednoduše pokryt produktem typu BASE a dále je snadné predikovat jeho budoucí vývoj.



Obr. 2.13: Odběrový diagram – vyšší spotřeba v pracovním týdnu [4]

Diagram na Obr. 2.13 představuje zvýšený odběr v pracovních dnech a snížený o víkendu. Pro jeho pokrytí je možno použít blok BASE a blok BASE-WD.



Obr. 2.14: Specifický odběrový diagram [4]

Poslední diagram na Obr. 2.14 se vyznačuje značnými odběrovými špičkami a je tedy poměrně specifický a v konečném důsledku i dražší než vyrovnaný odběr.

2.9.3 Obchod s podpůrnými službami

Provozovatel přenosové soustavy je společnost ČEPS a. s., která má ze zákona povinnost udržovat výkonovou bilanci a řídit elektrizační soustavu. K tomuto účelu využívá systémové služby, což jsou činnosti, kterými zajišťuje kvalitu a spolehlivost dodávky elektřiny na úrovni PS a plnění mezinárodních závazků a podmínek propojení ES ČR. Mezi systémové služby patří například udržování primární, sekundární a terciární regulační zálohy, sekundární regulace frekvence, předávaných výkonů a další. K zajištění systémových služeb používá ČEPS podpůrné služby, které nakupuje pomocí:

- dlouhodobých kontraktů, které jsou uzavírány z výběrových řízení, které jsou vypisovány na jednotlivé kategorie PpS. Nakupováno je takto zhruba 90 % PpS
- na denním trhu PpS, kde je pro každou hodinu tvořena marginální cena – cena nejdražší nabídky na poskytování PpS. Touto cenou jsou pak zaplacení všichni akceptovaní poskytovatelé, kteří svůj závazek splnili. Tímto způsobem se nakupuje cca 10 % PpS [11]

2.10 Problematika odchylky

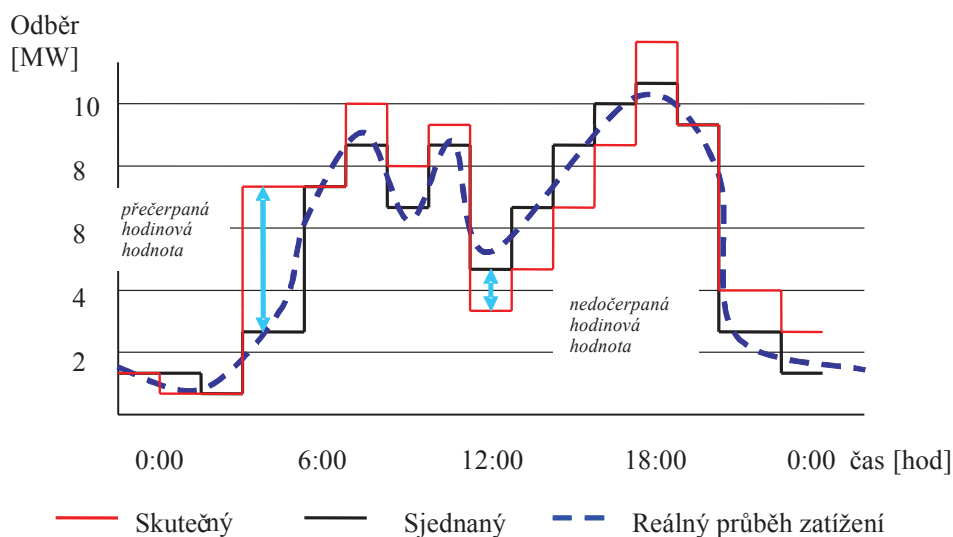
Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, při provozu energetického systému musí být splněna základní bilanční rovnice. Vyrobená energie se musí rovnat spotřebované plus ztráty a regulační energie. Výroba elektřiny je ve většině případů plánovaná, stejně tak lze mluvit i o spotřebě větších odběratelů. Nicméně vlivem výpadků výroby, nedodržení odběrových diagramů, výkyvů počasí či obchodních strategií dochází k odchylkám. Odchylka může vznikat jak u výrobce, tak u spotřebitele.

Výrobce:

- dodá do soustavy méně energie, než bylo jeho sjednané množství
- dodá do soustavy více, než bylo jeho sjednané množství

Odběratel:

- odebere ze soustavy více energie, než bylo jeho sjednané množství
- odebere ze soustavy méně energie, než bylo jeho sjednané množství [1]



Obr. 2.15: Vznik odchylky [1]

Na Obr. 2.15 je ukázán vznik odchylky, kdy samotný odběr je znázorněn spojitou křivkou. Nasmlouvané hodinové a skutečně odebrané množství pak představuje lomenou čáru.

Pro zajištění spolehlivého chodu soustavy musí být vzniklá odchylka eliminována. Tuto činnost vykonává PPS společnost ČEPS, a. s., která soustavě poskytne regulační výkon. Dle charakteru odchylky může být regulační výkon kladný nebo záporný. V případě kladného výrobce (poskytující danou podpůrnou službu ve své výrobně) na popud PPS dodá soustavě více výkonu, nebo sníží spotřebu. V případě záporného dodá výrobce méně výkonu, nebo zvýší spotřebu.

Součet všech individuálních odchylek se pak nazývá systémová odchylka.

Odpovědnost za odchylku

Odpovědnost za odchylku se vztahuje ke každému jednotlivému odběrnému místu zákazníka nebo souhrnu předávacích míst výroby elektřiny či na každé jednotlivé vymezené území provozovatele distribuční soustavy. Podstatné je, že odpovědnost za odchylku lze přenést vždy pouze na jeden subjekt. Účastníci trhu si mohou vybrat ze dvou režimů odpovědnosti za odchylku, a to:

- vlastní odpovědnost za odchylku
- přenesená odpovědnost za odchylku

V případě, že účastník trhu s elektřinou nezvolí žádný z režimů odpovědnosti za odchylku, je jeho odchylka posuzována jako neoprávněný odběr elektřiny z elektrizační soustavy nebo neoprávněná dodávka elektřiny do elektrizační soustavy. [1]

Režim vlastní odpovědnosti za odchylku

Konečný zákazník je dle pravidel OTE registrován jako subjekt zúčtování se všemi právy a povinnostmi, které s tímto režimem souvisí. Zákazník je pak povinen nakupovat elektřinu na pokrytí svých odběrových diagramů a tyto nákupy evidovat po hodinách v informačním systému OTE. OTE pak vypočítává rozdíl mezi nákupem a skutečným odběrem všech příslušných odběrných míst a vyhodnotí velikost odchylky a její cenu, která je zpravidla mnohem vyšší než cena na trhu běžně kupované elektřiny.

Režim přenesené odpovědnosti za svou odchylku

V tomto režimu je zákazník registrován u OTE jako „registrovaný účastník trhu“. Zákazník zde nemá povinnost OTE nahlašovat své nákupy, jelikož tuto službu za něj dělá dodavatel. Případné vzniklé odchylky jsou pak účtovány místo zákazníkovi jeho dodavateli. [1]

Zúčtování odchylek

Liberalizace energetiky částečně oddělila fyzické toky od obchodních. Samotný proces zúčtování odchylek pak tyto toky zpátky spojuje. V České republice plní tuto funkci nezávislý objekt OTE. Proces zúčtování se skládá z několika dílčích kroků, a to:

- registrace sjednaných diagramů
- sběr skutečných hodnot
- vyhodnocení odchylek
- stanovení zúčtovací ceny
- zúčtování

- reklamace

Registrace sjednaných diagramů se provádí den dopředu, kdy Operátor trhu prověří úplnost a správnost předaných hodnot párovým srovnáním a po provedené kontrole uloží data do databáze. Při neúspěšné kontrole, když nedojde k úpravám hodnot, nejsou diagramy předány. Poté následuje sběr skutečných hodnot dodávky popřípadě odběru silové elektřiny spolu s hodnotami dodávky regulační energie. Samotné vyhodnocení odchylek se řídí základní rovnicí:

$$O^i = W^{sml} - W^{skut} \quad (2.2)$$

Případně pokud zahrneme regulační energii:

$$O^i = W^{sml} - W^{skut} + W^{reg} \quad (2.3)$$

Kde:

- O^i - individuální odchylka subjektu zúčtování v MWh
- W^{sml} - celková smluvená dodávka nebo odběr v MWh
- W^{skut} - skutečný odběr naměřený v předávacích místech subjektu zúčtování v MWh
- W^{reg} - regulační práce dodaná do ES v předávacích místech subjektu zúčtování v MWh [8]

2.11 Predikce spotřeby

Znalost budoucího množství elektřiny je klíčová jak pro obchod s elektřinou, tak i pro její distribuci. Predikce odběru elektřiny záleží na mnoha více či méně známých faktorech, které ovlivňují její přesnost. Mezi nejvýznamnější faktory, které ji ovlivňují, patří venkovní teplota a délka slunečního svitu.

Z pohledu délky časového rozmezí predikce ji můžeme nejčastěji rozdělit na roční, týdenní a denní. Je zřejmé, že čím bude delší období, pro které predikci tvoříme, tím menší bude její přesnost. Těžko lze předpokládat všechny možné vlivy, které ovlivní budoucí hodnoty.

V praxi se často využívá roční predikce, kdy potom cena za nakoupenou elektřinu bývá výhodná, protože výrobce má zajištěný stálý odběr. Rozdíly, které pak vzniknou díky nepřesnosti dlouhodobé predikce, mohou být následně vyrovnány na burze nebo na krátkodobých trzích. Takovýmto způsobem si obstarává provozovatel přenosové soustavy podpůrné služby. Každý rok v rámci dokumentu příprava provozu stanovuje potřebné hodnoty podpůrných služeb na nadcházející rok. Tyto hodnoty jsou pak zpřesňovány dle aktuální situace v týdenních a denních přípravách provozu.

Poptávka po elektřině je ovlivňována více faktory a je možno ji rozdělit na složku závislou a nezávislou. Závislá složka koreluje se změnou klimatických podmínek, především teploty. Nezávislá pak se změnou HDP. Parametry, které ovlivňují budoucí chování spotřeby, je možno shrnout do následujících bodů:

- změna struktury poptávky (budování nových odběratelů, změna struktury odběru u stávajících odběratelů, využívání efektivnějších spotřebičů)
- sezónnost – většinou je spotřeba silně závislá na aktuální teplotě, kdy lze obecně říci, že se snižující se teplotou se zvyšuje spotřeba elektřiny
- pokud nastane zvyšování cen, je pravděpodobné, že se bude snižovat spotřeba

Samotné způsoby predikce se liší u obchodníků také podle toho, kolik obhospodařují odběratelů. Obchodník s větším množstvím odběratelů má možnost sloučením většího množství zákazníků kompenzovat rozdíly mezi jejich jednotlivými odběrovými diagramy. Obchodníci jednotlivých distributorů mají pak také možnost využívat hromadné dálkové ovládání HDO a tím ovlivnit spotřebitelský diagram.

Proces určování budoucího množství lze rozčlenit do několika bodů. Nejprve obchodník stanoví plánovanou spotřebu daného subjektu na základě roční predikce teplot z ČHMÚ a průběhu spotřeby elektřiny z minulých let. Je nutno podotknout, že predikce se stanovuje na dlouhodobý teplotní normál a případné odchylky predikce způsobené klimatickými vlivy jsou kompenzovány až v kratším časovém horizontu.

Jedna z možností jak obhospodařit větší množství zákazníků spočívá v nakoupení základního ročního množství elektřiny pro zákazníky, a pak dle upřesňujících týdenních predikcí dokoupit potřebné množství na burze. Pro finální zpřesnění nakupovaného množství pak může obchodník dokoupit elektřinu na krátkodobém trhu organizovaném OTE. Pro tento nákup využívá predikci hodnot spotřeby založené na hodnotách spotřeby několika dní zpět a aktuálních klimatických podmínkách.

Menší obchodníci (obhospodařující menší počet konečných zákazníků) mohou tvořit predikci na základě dodané predikce jednotlivých zákazníků, případně pak na základě zkušeností a komunikace se zákazníky. Podstatná je zde znalost historie chování zákazníků a také odhadů jejich budoucího chování spojená například s potencionálním rozšířením výroby a dalšími predikovatelnými vlivy. [4]

Metodika typových diagramů dodávky

Pro zákazníky typu C a D (maloodběr) by bylo nákladné a neefektivní používat průběhové měření spotřeby. Proto byla pro predikci jejich spotřeby vyvinuta společností EGU Brno metoda typových diagramů dodávky elektřiny (metoda *TDD*). Tato metoda nahrazuje průběhové měření typu A a B u této skupiny zákazníků a klade si za cíl přibližně stanovit výši hodinových odběrů a také výši odchylky v čase pro zúčtování odchylek OTE. Jinými slovy, cílem bylo na základě statistických dat jednotlivých odběratelů určit diagramy, které by byly nezávislé na teplotě a použitelné pro určení budoucího množství elektřiny.

Tato metodika byla poprvé využita v roce 2005, kdy byla pro její vytvoření použita data z let 2002 a 2003. Z dat byly vytvořeny skutečné *TDD*, které reprezentovaly skutečnou teplotu. Snahou bylo převést tyto diagramy na normalizované *TDD_n* (při normální teplotě) a tím pádem použitelné obecně.

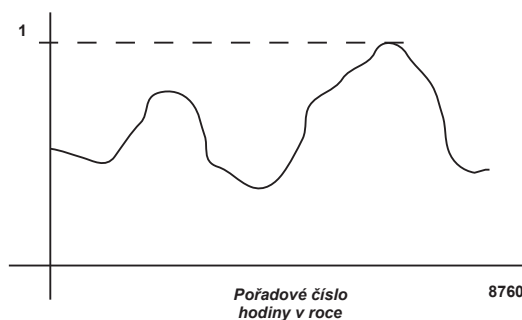
Jednotliví odběratelé se srovnatelnými průběhy spotřeb byli rozděleni do celkem 8 charakteristických diagramů, které kopírovaly tarifní strukturu dodavatelů elektřiny k 1. 7. 2001. Seznam těchto typových diagramů je uveden v tabulce 2.1. [8]

Tab. 2.1: Typové diagramy dodávky [8]

Typ TDD	Typ odběratele	Typ odběru
TDD č. 1	Podnikatel	odběr bez tepelného využití elektřiny
TDD č. 2	Podnikatel	odběr s akumulacním spotřebičem
TDD č. 2	Podnikatel	odběr s hybridním vytápěním
TDD č. 3	Podnikatel	odběr s přímotopným systémem vytápění
TDD č. 3	Podnikatel	odběr s tepelným čerpadlem
TDD č. 8	Podnikatel	odběr pro veřejné osvětlení
TDD č. 4	Domácnost	odběr bez tepelného využití elektřiny
TDD č. 5	Domácnost	odběr s akumulacním spotřebičem
TDD č. 6	Domácnost	odběr s hybridním vytápěním
TDD č. 7	Domácnost	odběr s přímotopným systémem vytápění
TDD č. 7	Domácnost	odběr s tepelným čerpadlem

Typové diagramy jsou použitelné výhradně pro větší časový interval a pro větší počet konečných zákazníků v dané skupině, který by měl větší než 1000. Velký počet zákazníků je nutný pro dosažení přijatelné chyby, která nepřekročí 10 %.

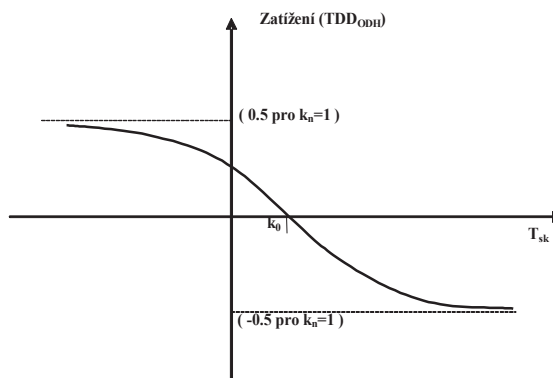
Cílem metodiky bylo definovat tzv. Normalizovaný typový diagram, který představuje 8 760 relativních hodnot průměrných hodinových odběrů v roce (8 784 hodnot v roce přestupném), vztažených k hodnotě ročního maxima průměrných hodinových odběrů. Průměrné hodinové odběry, použité ke stanovení TDD_n , jsou přepočteny na normální klimatické podmínky (teplota, svit, vítr, srážková činnost a další). Hodnoty TDD_n se pohybují v rozmezí 0 až 1 a definují tvar diagramu zatížení dané skupiny konečných zákazníků za normálních klimatických podmínek. Celkový součet relativních hodnot průměrných hodinových odběrů TDD_n pak vyjadřuje dobu využití maxima [hod/rok]. [29]



Obr. 2.16: Normalizovaný typový diagram dodávky [1]

Na obrázku 2.16 je uveden normalizovaný typový diagram dodávky, pro který platí, že jeho hodnoty, vztažené k hodnotě maxima, nabývají hodnot od 0 do 1.

Při převodu TDD_{skut} na TDD_n bylo především nutné respektovat teplotu v jednotlivých regionech. Metodika teplotního přepočtu spočívá v nalezení závislosti mezi naměřenou teplotou a naměřenými daty odběru elektřiny tak, aby výsledná funkce byla co nejjednodušší a nejpřesnější. Těmto požadavkům vyhovuje exponenciální křivka znázorněná na obrázku 2.17.



Obr. 2.17: Vztah skutečné teploty a zatížení [1]

Závislost jednotlivých kategorií TDD na teplotě je různá. Každý rok je zpřesňována pomocí doporučení k metodice TDD . V praxi se pak metodika používá takto: OTE na svých stránkách zveřejňuje normalizované TDD spolu s koeficienty nutnými pro přepočet TDD_n na TDD_{skut} , které zohledňují výše zmíněný vliv teploty. Dále je možné na stránkách nalézt již přepočtené diagramy zohledňující skutečnou teplotu pro uplynulé dny. Obchodník má tak k dispozici sadu typových diagramů spolu s koeficienty. Tuto sadu dat doplní o aktuální teploty, které vyhledá dle jednoduchého vztahu. Samotnou spotřebu daného subjektu pak určí dle následujícího vztahu:

$$O_k^i = O_c^i \cdot \frac{TDD_t^h}{T_t} \quad (2.4)$$

Kde:

O_k^i - plánovaná roční spotřeba i-tého zákazníka

TDD_t^h - hodnota t-tého druhu TDD v hodině h roku

Jelikož jsou TDD přepočteny na normálovou teplotu, je nutno vynásobit příslušnou hodnotu diagramu koeficientem, který zohledňuje aktuální teplotu. Tento koeficient k pak vyjadřuje, kolikrát byl průměrný hodinový odběr při skutečných klimatických podmínkách v jednotlivých hodinách dne D větší nebo menší než průměrný hodinový odběr při normálních klimatických podmínkách. Jeho výpočet pak spočívá ve vydělení denních průměrů přepočteného a normálového TDD .

$$k = \frac{TDD_{pt}^d}{TDD_{nt}^d} \quad (2.5)$$

Kde:

TDD_{pt}^d – denní průměr přepočteného TDD

TDD_{nt}^d - denní průměr normálového TDD

Výsledný vztah pro určení přepočítávacího koeficientu a postup k jeho získání je zmíněn v literatuře. [29]

3 Rozvoj fotovoltaiky v liberalizovaném trhu s elektřinou v ČR

Největší rozmach na poli obnovitelných zdrojů v minulých letech tvořily fotovoltaické elektrárny. Tento rozvoj sebou přinesl několik pozitivních i negativních aspektů. Z těch pozitivních lze jmenovat především zvýšení výroby čisté energie v podmínkách ČR. Bohužel tento rozmach má samozřejmě svá negativa. Z těch lze například jmenovat zvýšení poplatku za OZE, který pocítí každý spotřebitel. Paradoxně rozmach výstavby FVE může negativně ovlivnit ostatní OZE, jako například vodní energetiku, výrobu elektřiny z biomasy či větru, a to především proto, že je snaha zákonodárců pohlížet na všechny obnovitelné zdroje jako na celek a přehlížet dílčí specifika jednotlivých kategorií OZE.

Proto je tedy cílem této kapitoly popsat souvislosti vedoucí k rozmachu výstavby FVE a její vliv na energetiku.

3.1 Legislativní rámec

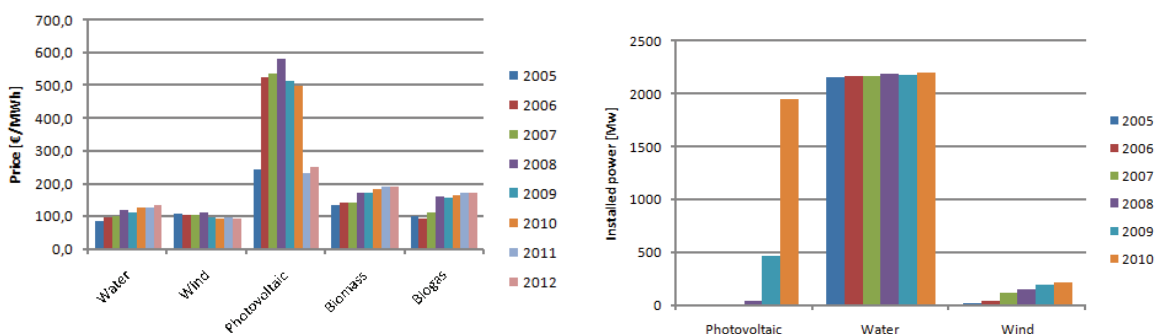
V rámci kapitoly 2.5.1 této práce je rozebrána problematika výrobců v liberalizovaném trhu s elektřinou. Je zde také zmínka o způsobech podpory obnovitelných zdrojů v ČR, kterou je vhodné definovat. Tato podpora je zakotvena v několika zákonech či vyhláškách, z nichž lze jmenovat základní dva, a to Energetický zákon č. 458/2000 Sb a zákon o podpoře obnovitelných zdrojů č. 180/2005 Sb., který byl do letošního roku (2013) již 6krát novelizován. Tyto dva zákony jsou poté doplněny řadou vyhlášek jako například:

- Vyhláška č. 150/2007 Sb., o způsobu regulace cen v energetických odvětvích a postupech pro regulaci cen.
- Vyhláška č. 51/2006 Sb., stanovující podmínky pro připojení zařízení k elektrizační soustavě.
- Vyhláška č. 426/2005 Sb., o podrobnostech udělování licencí pro podnikání v energetických odvětvích.
- Vyhláška č. 475/2005 Sb. kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů.
- Vyhláška č. 364/2007 Sb. kterou se mění vyhláška č. 475/2005 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů.

Poslední prvek legislativy tvoří cenová rozhodnutí ERU, pomocí kterých je stanovována výkupní cena a zelený bonus, jakožto druh podpory.

3.2 Rozvoj FVE v ČR

Česká republika se zavázala na základě respektování směrnice 2009/28/EC, že podíl výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů ku celkové spotřebě bude činit 13,5 % v roce 2020. Tento závazek vedl k nárůstu výkupních cen elektřiny z OZE tak, aby byla zaručena návratnost investice do výstavby těchto zdrojů 15 let. Nejvýznamnější nárůst výkupních cen lze pozorovat u FVE, což je patrné na Obr. 3.1(a). Pokud se zaměříme na historii výkupních cen z FVE, tak již v roce 2002 byla cena stanovena na 6 Kč/kWh což vzhledem k tehdejším cenám panelů nebylo pro investory zajímavé. Teprve od roku 2006, kdy výkupní cena elektřiny z FVE byla zvýšena na 13 Kč/KWh, začala masivní výstavba těchto zdrojů, což je z Obr. 3.1(b) patrné.

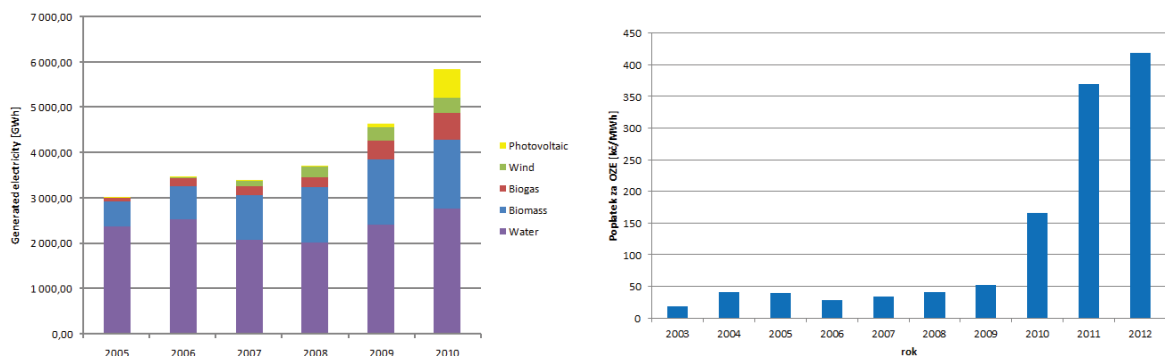


(a) Vývoj výkupních cen z OZE v ČR

(b) Vývoj instalovaného výkonu z OZE v ČR

Obr. 3.1: Vývoj výkupních cen a instalovaného výkonu v OZE v ČR

Instalovaný výkon v roce 2010 byl přibližně 50krát větší než v roce 2008. Z obavy o stabilitu soustavy byl však tento prudký růst zastaven provozovatelem přenosové soustavy, který nedovolil připojení FVE do sítě. Dále byl růst omezen také rapidním snížením výkupních cen. Přínosem tohoto růstu bylo zvýšení podílu vyrobené elektřiny z OZE z 5 % na více než 8 % v roce 2010 což je znázorněno na Obr. 3.2(a). Naopak nárůst příspěvku na



(a) Nárůst vyrobené elektřiny z OZE

(b) Vývoj příspěvku na OZE v ČR

Obr. 3.2: Důsledky rozvoje FVE v ČR

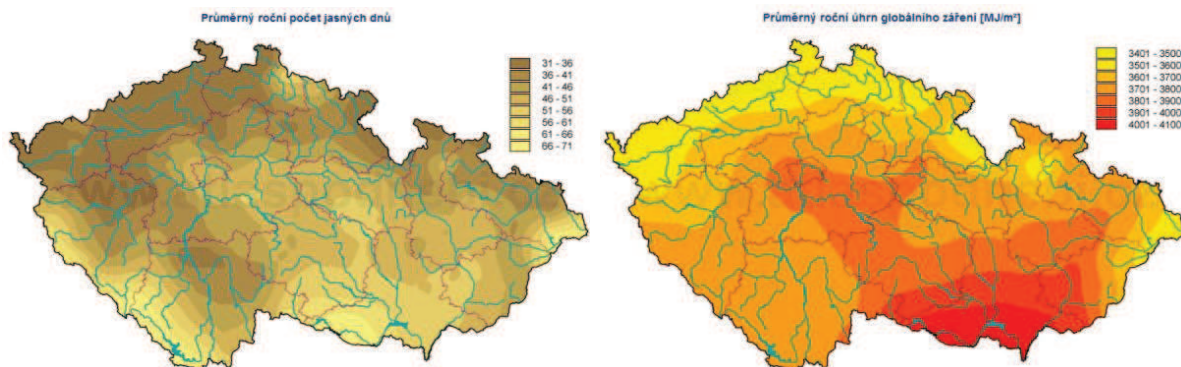
OZE, který je znázorněn na Obr. 3.2(b), bude zatěžovat spotřebitele po dobu života FVE.

3.3 Přírodní podmínky pro instalace FVE v ČR

Při posuzování možností výroby elektřiny z FVE je nutné definovat přírodní podmínky v ČR, které významně ovlivňují výrobu elektřiny z těchto zdrojů. Výkon a především výroba elektřiny z FVE závisí na několika základních faktorech, kterou jsou:

- hodnota solárního záření
- sklon panelu
- teplota panelu
- doba trvání slunečního svitu

Hodnota solárního záření se skládá ze dvou částí, a to z přímého a difuzního záření, kdy difuzní typ, převažuje při zatažené obloze a přímý při jasné obloze. S hodnotou solárního záření také souvisí sklon panelu, oblačnost i teplota panelu. Na Obr. 3.3 je možné pozorovat jak roční úhrn globálního záření na zemský povrch, tak i průměrný počet jasných dní během roku. Dle webových stránek [5] dopadne na 1 m² vodorovné plochy zhruba 950–1340 kWh energie. Roční množství slunečních hodin se pohybuje v rozmezí 1331–1844 hod (ČHMÚ), odborná literatura uvádí jako průměrné rozmezí 1600–2100 hod. Z jedné instalované kW lze získat 800–1100 kWh za rok.



(a) Průměrný počet jasných dní

(b) Průměrný roční úhrn globálního záření

Obr. 3.3: Přírodní podmínky pro FVE v ČR [5]

4 Analýza použitých dat

Pro tvorbu a definici prediktoru založeném na analýze historických dat je nutné mít k dispozici dostatečné množství kvalitních vstupních dat. Tato data jsem rozdělil do tří kategorií, a to:

- data z referenční fotovoltaické elektrárny
- souhrnná data výroby z oblastí v ČR
- meteorologická data
- hodnoty východu a západu slunce

Požadavek na takto strukturovaná data vyplynul především z důvodu nedostatečného množství dat z oblastí v ČR, což je způsobeno tím, že většina FVE byla vystavěna až v posledních několika letech. Proto pro analýzy a tvorbu prediktoru jsou použita data z vybrané referenční elektrárny, kde je vzorek dat výrazně větší. Je zde nutno zmínit, že všechna dále uváděná data, jsou ve středoevropském čase (SEČ).

4.1 Data z referenční FVE

Prvním typem dat jsou data z vybrané FVE, přičemž požadavky na ně jsou dobrá dostupnost, co nejnižší granularita a jejich dostatečné množství bez chyb a výpadků. Na stránce <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/fotovoltaicke-systemy.php> lze najít přehled FVE, z níž některé byly vybudovány v rámci projektu Slunce do škol. Z těchto zdrojů byla vybrána data ze systému na budově FEL ČVUT v Praze, který je dostupný na: <http://andrea.feld.cvut.cz/fvs/>. Hlavním důvodem pro výběr této FVE je skutečnost, že data jsou online dostupná, mají minutovou granularitu a jsou dostupná od roku 2003.

Celý systém se skládá ze 30 FV panelů, které jsou natočené na jih pod sklonem 45°C a zabírají plochu 26 m². Instalovaný výkon je 3 kW.

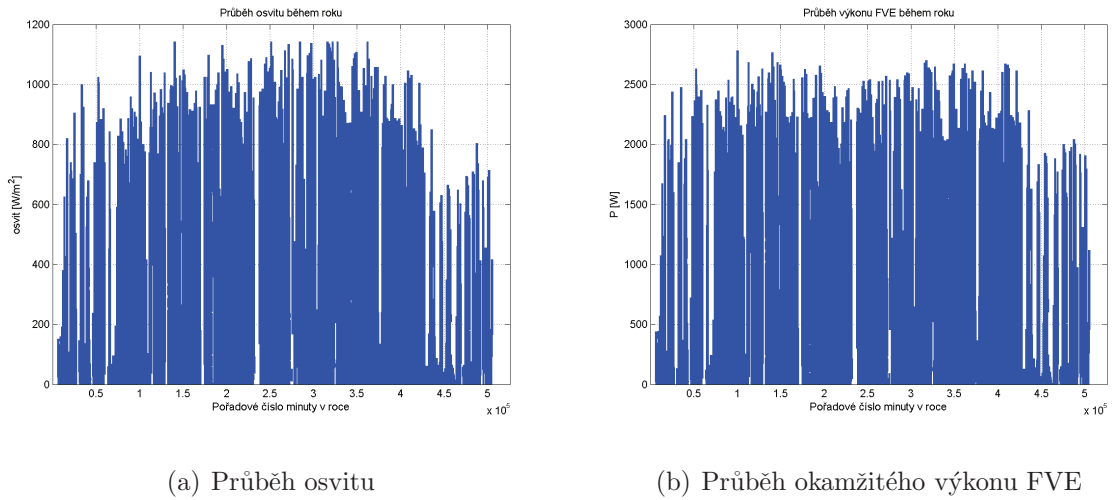
Vlastní data obsahují teplotu článku, dodanou energii, stejnosměrný výkon před střídačem, výkon za střídačem a solární záření. Ukázka těchto dat je pak uvedena v příloze A.1.

Celkem byly použity hodnoty okamžitého výkonu, případně teplota a osvit z let 2007-2012.

Závislost FVE na teplotě a osvitu

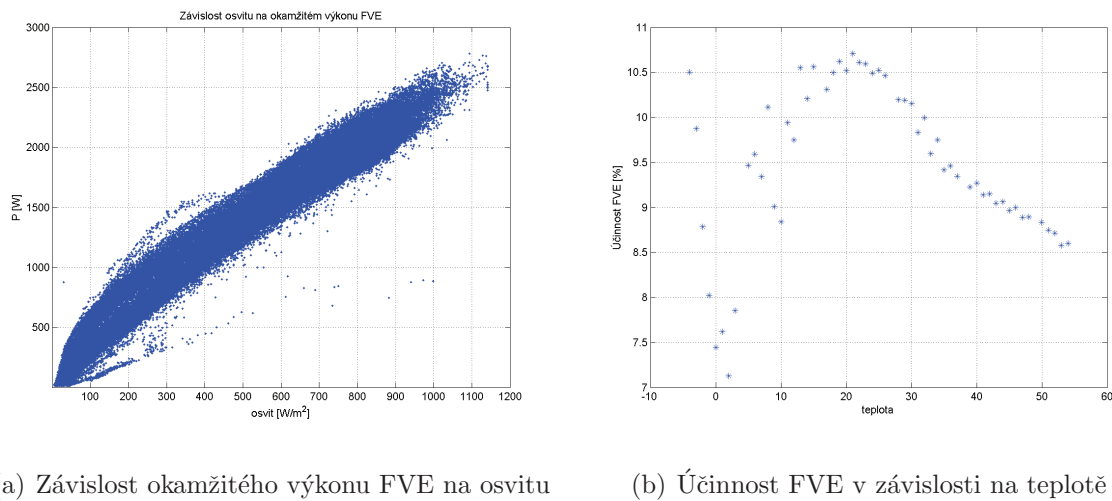
Prvním krokem při zevrubné analýze dat z FVE je tvorba grafu naměřených hodnot. Konkrétně tedy průběhy výkonu FVE a osvitu, které jsou znázorněny na Obr. 4.1 a je z nich patrný mírně odlišný průběh výkonu FVE od průběhu osvitu. V letních měsících

lze sledovat nižší maximální výkony, které jsou způsobené vyššími pracovními teplotami panelů.



Obr. 4.1: Průběhy z analyzované FVE

Další možnou analýzou je zjištění vztahu mezi osvitem a výkonem, který je patrný na Obr. 4.2(a).



Obr. 4.2: Analýza dat FVE

Korelace mezi oběma veličinami je z průběhu zřejmá, jedná se přibližně od osvitu 300 W/m² o lineární závislost. Na Obr. 4.2(a) je také možno pozorovat odlehlé hodnoty, které mohou být způsobeny například vrstvou sněhu, či námrazy na panelech, kdy čidlo měřící osvit může být čisté (bez sněhu) a panely částečně pod sněhem.

Vzájemnou korelaci mezi osvitem a výkonem lze matematicky vyjádřit pomocí např. Pearsonova korelačního koeficientu, jehož zjednodušený předpis je:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (4.1)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (4.2)$$

Kde:

S_x - směrodatná odchylka proměnné X

S_y - směrodatná odchylka proměnné Y

S_{xy} - kovariance proměnných X a Y

Korelační koeficient může nabývat hodnot od -1 do $+1$, přičemž tyto krajní hodnoty značí lineární vztah mezi veličinami, který může být kladný či záporný. V případě kladné korelace hodnoty obou proměnných zároveň stoupají a v případě záporné korelace hodnota jedné proměnné stoupá a druhá klesá. Pokud neexistuje lineární vztah pak $r = 0$.

Pro výpočet korelačního koeficientu byla použita funkce *corcoef()* v MATLABu a jejím výsledkem je $r = 0,9863$, což značí silnou lineární závislost mezi osvitem a výkonem. Dále je možné vypočítat tento koeficient mezi teplotou panelu a výkonem či osvitem, nicméně lepší variantou je vyjádření účinnosti FVE, neboli kolik procent slunečního záření FVE transformuje na elektrický výkon. Účinnost elektrárny lze vypočítat jako:

$$\eta_{FVE}(\tau) = \frac{E_{osvit}(\tau)}{\frac{P_{FVE}(\tau)}{26}} \quad (4.3)$$

Kde:

$\eta_{FVE}(\tau)$ - účinnost FVE při teplotě τ

$E_{osvit}(\tau)$ - osvit FVE při teplotě τ

$P_{FVE}(\tau)$ - okamžitý výkon FVE při teplotě τ

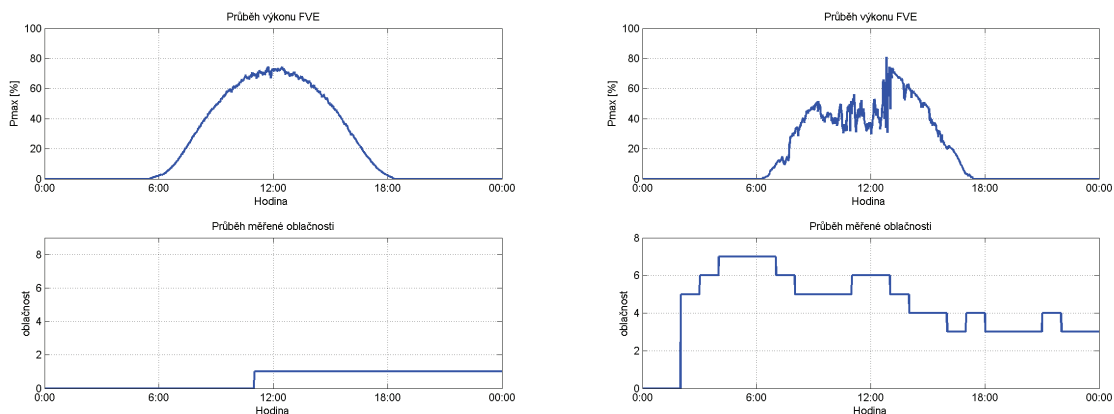
Osvit je udáván ve W/m^2 a proto je nutné výkon FVE vydělit plochou panelu ($26 m^2$).

Výpočet účinnosti byl počítán jako medián podílu osvitu a okamžitého výkonu FVE pro každou teplotu panelu, tj. pro teploty v rozmezí $-10^\circ C$ až $60^\circ C$. Výsledkem je graf účinnosti FVE na teplotě, který je znázorněn na Obr. 4.2(b). Je zde patrný značný rozptyl hodnot před teplotou $20^\circ C$, což lze vysvětlit stejně jako u Obr. 4.2(a) závislosti osvitu na okamžitém výkonu. Na panelu nebo na čidle měřící osvit se mohl nacházet sníh, což hodnoty zkresluje.

Účinnost FVE při teplotě panelu $20^\circ C$ je přibližně $10,7 \%$, při $54^\circ C$ klesne na $8,6 \%$.

Závislost FVE na oblačnosti

Další veličinou ovlivňující osvit, a tím pádem výkon FVE, je hodnota oblačnosti, která mění poměr mezi přímým a difuzním typem záření na panel. Způsob jejího měření a vyjadřování bude uveden v kapitole 4.3, nicméně již teď lze říci, že při vyšších hodnotách oblačnosti (vyšší počet osmin) bude hodnota výkonu nižší, což lze dobře pozorovat na Obr. 4.3(b), kde je patrné snížení výkonu při vyšší oblačnosti. Oproti tomu, při jasném dni kdy se oblačnost pohybuje v rozmezí $0/8$ až $1/8$ (jasno/skoro jasno), jsou hodnoty výkonu vyšší.



(a) Jasno/skoro jasno

(b) Oblačno/skoro zataženo

Obr. 4.3: Závislost výkonu FVE na oblačnosti

Problematika oblačnosti je pak dále řešena při vlastním návrhu prediktoru v kapitole 6.5.

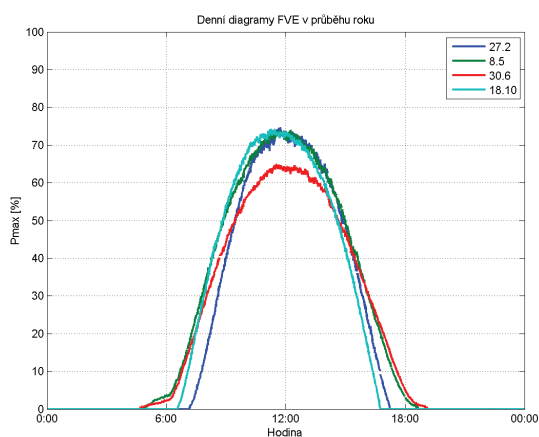
Závislost FVE na kalendáři

Výroba FVE závisí kromě jiného na pohybu slunce během dne i roku, což ovlivňuje hodnotu solární záření dopadající na panel. Neboli závisí na dvou druzích kalendářů, a to:

- Denní kalendář
- Roční kalendář

Denní kalendář představuje typický denní průběh výkonu FVE, přičemž tento denní průběh je pro každý den v roce jiný.

Ročním kalendářem je myšlena různá šířka denního diagramu v průběhu roku, což je znázorněno na Obr. 4.4. V létě je denní diagram širší nežli na jaře či v zimě.



Obr. 4.4: Průběh výkonu FVE v různých dnech roku

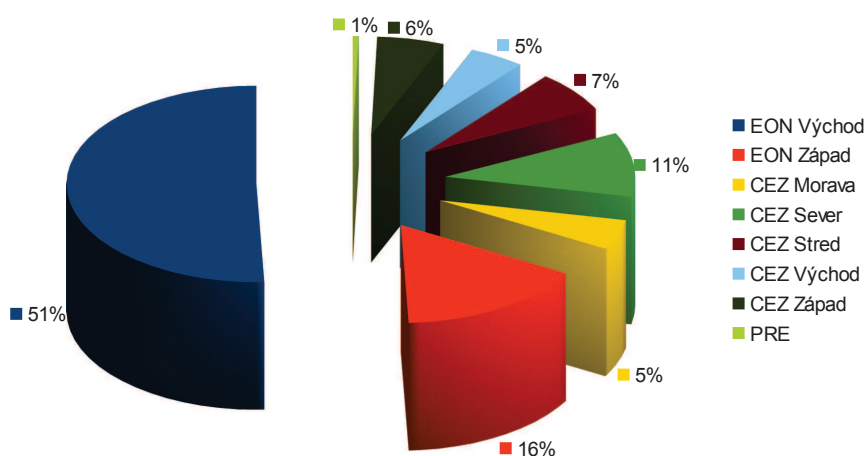
4.2 Souhrnná data výroby z oblastí v ČR

Dalším druhem použitých dat pro tvorbu prediktoru byly souhrnné hodnoty výkonů pro oblasti v ČR, které odpovídají územní působnosti jednotlivých distribučních společností, která je naznačena na Obr. 4.5. Největší instalovaný výkon (dle ERU [2]) je v oblasti



Obr. 4.5: Působnost jednotlivých distribučních společností na území ČR [2]

E.ON. východ, nejmenší výkon pak v oblasti PRE (2012). Procentní rozložení instalovaného výkonu FVE v rámci oblastí je pak ukázáno na Obr. 4.6, z kterého je také patrné, že rozložení instalovaného výkonu částečně reflektuje přírodní podmínky pro instalaci FVE v ČR zmíněné v kapitole 3.3 na Obr. 3.3.



Obr. 4.6: Instalovaný výkon v jednotlivých oblastech

Pro tvorbu prediktoru byly použity hodnoty z rozmezí let 2011 až 2012.

4.3 Data oblačnosti

Dalším druhem dat použitých pro tvorbu prediktoru jsou data oblačnosti, která pochází z portálu <http://www.chmi.cz/>. V ideálním případě by bylo výhodné použít přímo předpovídaná data slunečního záření pro tvorbu prediktoru, protože okamžitý výkon FVE je funkční závislostí osvitů viz Obr. 4.2. Bohužel hodnoty osvitů se v předpovědích nevyskytují, je tedy nutné je nahradit jinými předpovídanými hodnotami, což jsou právě hodnoty oblačnosti, protože ta výrazně ovlivňuje množství dopadajícího slunečního záření na panel.

Oblačnost v podstatě znamená míru pokrytí oblohy oblaky. V klimatologii je vyjadřována v desetinách pokrytí oblohy tj. 0/10 až 10/10. V synoptické meteorologii jsou použity osminy. Pozorovatel, který měří oblačnost, určí, kolik osmin oblohy je pokryto oblaky. Je zde však rozdíl ve vyjádření oblačnosti při měření a při předpovědi.

- V předpovědích se oblačnost nejčastěji vyjadřuje slovně, a to například: Dnes bude jasno až polojasno. Neboli je vydáván rozsah předpovědi.
- V měřeních jsou hodnoty udávány v osminách, kdy 0/8 odpovídá jasné obloze a 8/8 zatažené.

Porovnání jednotlivých způsobů vyjádření oblačnosti je uvedeno v tabulce 4.1, kde je pro ilustraci zanesena i hodnota astronomického svitu v procentech.

Tab. 4.1: Způsoby vyjádření oblačnosti

Stupeň pokrytí oblohy	Pokrytí oblohy oblačností v osminách	Astronomický svit v procentech
jasno	0 osmin – obloha bez oblačnosti	61 až 100
skoro jasno	1 až 2 osminy	
polojasno	3 až 4 osminy	31 až 60
oblačno	5 až 6 osminy	11 až 30
skoro zataženo	7 osmin	
zataženo	8 osmin	

4.3.1 Data měření oblačnosti

U měření oblačnosti z portálu <http://www.chmi.cz/> je granularita hodnot jedna hodina a rozsah je od 0/8 do 8/8. Toto měření je dostupné z 39 profesionálních meteorologických stanic rovnoměrně rozmístěných na území ČR. Většina těchto stanic umí oblačnost pozorovat pouze za denního světla, a tedy oblačnost není k dispozici pro noční hodiny, které ale pro predikci výroby FVE nejsou důležité. Pro návrh a testování prediktoru byla použita nasbíraná data z rozmezí let 2011 až 2012. Na Obr. 4.7 jsou pak zmíněné meteostanice vyobrazeny.



Obr. 4.7: Seznam meteostanic

4.3.2 Data předpovídané oblačnosti

Předpověď oblačnosti, z již zmiňovaného portálu, je vydávána pro jednotlivé kraje v ČR na den, noc a následující den. Počet slovního hodnocení oblačnosti je 6, přičemž některé stupně seskupují dvě osminy oblačnosti, což je uvedeno v tabulce 4.1.

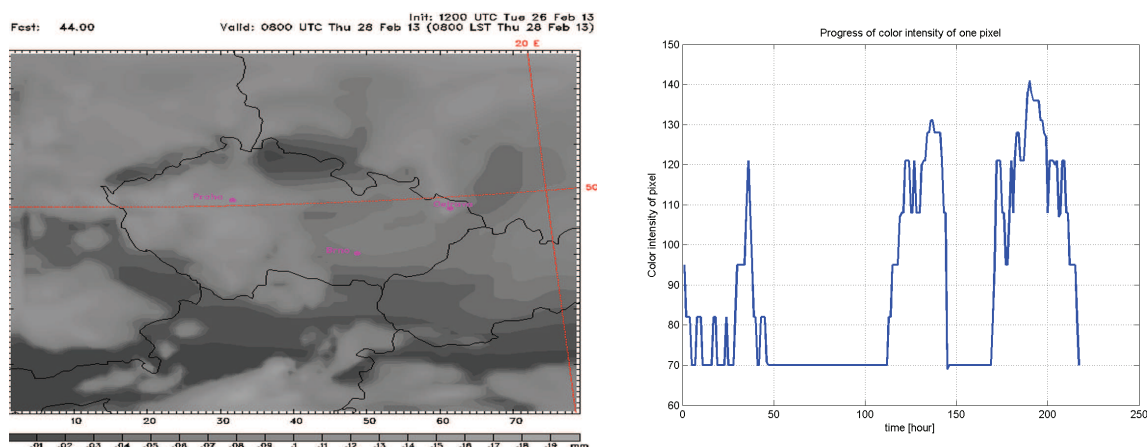
4.4 Alternativní data předpovědi oblačnosti

Další možností získání dat oblačnosti je využít výstupů různých matematických modelů, které prezentují své výsledky na webových stránkách. Jedním z těchto je například numerický model Aladin <http://pr-asv.chmi.cz/aladin/>, který poskytuje předpověď oblačnosti ve formě obrázků s granularitou dat šest hodin.

Další variantou je predikce oblačnosti poskytovaná Ústavem informatiky Akademie věd České republiky <http://medard-online.cz/> ve formě obrázků. Jedná se o výstupy numerického modelu atmosféry MM5, který byl vyvinut na Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research (PSU/NCAR) v USA a je konfigurován pro Českou republiku. Tato obrázková data mají hodinovou granularitu a vyjadřují celkové množství vody ve všech skupenstvích v atmosféře měřených v mm a jsou dostupná ve formátu png. Jejich barevná škála je volena tak, aby navozovala dojem satelitních snímků. Černá barva v obraze reprezentuje minimální množství vody v atmosféře a malou oblačnost, bílá pak velkou oblačnost. Zatím model bohužel nerozlišuje střední, nízkou a vysokou oblačnost. Předpověď je vydávána každý den ve 12:00 hodin a je počítána na následujících 60 hodin.

Tato data byla každý den automaticky ukládána pomocí scriptu v jazyce php po část roku 2012. Pro účely testování využití těchto dat ve formě obrázkové předpovědi byl napsán skript v MATLABu, který umožnil ukládat index barvy vybraného pixelu v obraze, který byl umístěn na stejném místě v mapě jako demonstrační elektrárna. V podstatě script umožnil převod obrazových dat do číselné podoby, ve které je již je možno lépe zpracovat.

Na Obr. 4.8(b) je znázorněn průběh indexu barvy obrazové předpovědi během 10 dní



(a) Výstupy modelu MM5

(b) Průběh intenzity barvy pixelu v čase

Obr. 4.8: Analýza dat FVE

v únoru 2012 spolu s ukázkou obrazové předpovědi na jednu hodinu dopředu (Obr. 4.8(a)). Rozsah hodnot pro černobílý obrázek je v rozmezí 0 – 255.

Z analýzy těchto dat vyplynulo, že při jasné obloze je hodnota indexu barvy přibližně 70 a při zatažené pak přibližně 150. Každý obrázek má ve spodní části uvedenou škálu barev, podle které je možné se orientovat a v horní části také čas, na který a ze kterého je předpověď počítána.

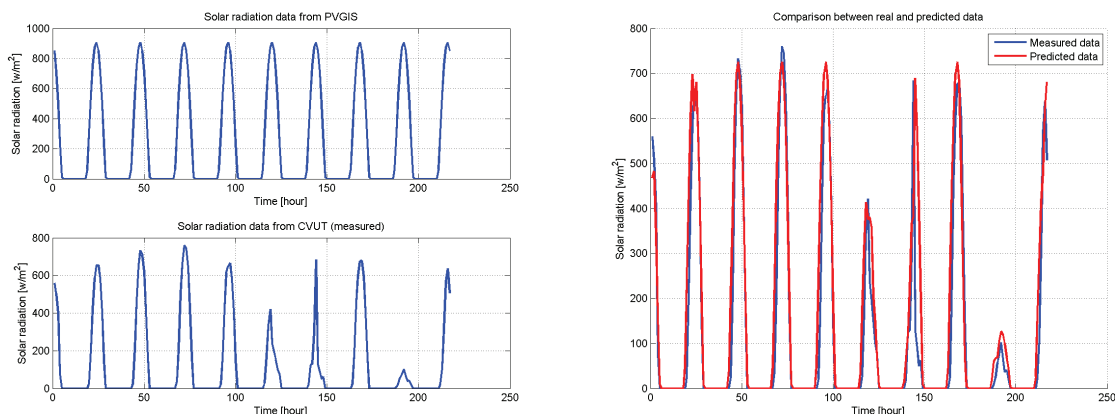
S těmito daty jsem provedl několik simulací, kdy mým cílem bylo ověřit možnost využití těchto dat pro predikci.

Využití předpovědních dat ve formě obrázků

Pro srovnání predikovaných a reálných dat byly použity predikce oblačnosti vždy pro následujících 24 hodin pro každý den. Hodnota indexu barvy byla odečtena od maximální možné hodnoty indexu barvy v obrázcích a zkombinována s hodnotami estimovaného solárního záření při bezoblačné obloze z databáze PVGIS. (viz kapitola 5)

Na Obr. 4.9 je zachyceno rozmezí dat 30. 1. 2012 až 8. 2. 2012. Je zde patrné, že predikované hodnoty tvořené kombinací indexu barvy z obrazové předpovědi a predikovanými hodnotami solárního záření z databáze PVGIS poměrně věrně kopírují skutečně změřené hodnoty. Nicméně toto platí jen pro tento krátký úsek dat. Pro další analýzy a zpracování je nutné mít k dispozici větší množství dat v ideálním případě rok či dva, která jsem však při zpracování této práce neměl k dispozici. Proto tato data nebyla použita pro návrh prediktoru, který je dále uveden v této práci.

Tato problematika je pak více rozepsána v mém článku z konference OZE 2012 [42]

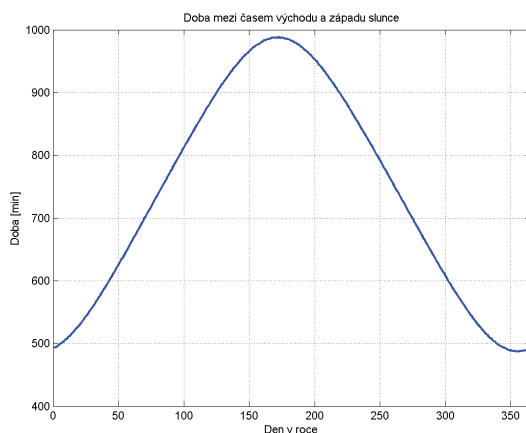


(a) Srovnání hodnoty solárního záření z PVGIS a změřené hodnoty (b) Srovnání naměřených a predikovaných dat

Obr. 4.9: Srovnání naměřených a predikovaných dat

4.5 Data časů východu a západu slunce

Poslední kategorií dat jsou data východu a západu slunce pro dané souřadnice. Pro potřeby tvorby denních digramů bylo nutno mít k dispozici data východů a západů slunce pro konkrétní souřadnice. Tato data nejsou běžně k dispozici ve vhodné formě ke stažení, ale je možné je vypočítat. Proto jsem napsal script v jazyce php, který za využití funkce *sunset()* a *sunrise()* umožnil získat data pro zadanou zeměpisnou délku, šířku a zenit. Pro pražskou referenční elektrárnu byly použity hodnoty: Zeměpisná šířka: $50,12^\circ$, zeměpisná délka: $14,32^\circ$ a zenit $90,83^\circ$.



Obr. 4.10: Doba mezi východem a západem slunce

Na Obr. 4.10 je znázorněn rozdíl časů východu a západu slunce pro zmíněné souřadnice elektrárny. Na průběhu je patrný den letního (171 den) a zimního slunovratu (315 den). Konkrétně pak den zimního slunovratu je následně patrný i na ostatních grafech jako např. na Obr. 6.5.

5 Možnosti predikce výroby elektřiny z FV elektráren

Tématika predikce výroby elektřiny z FVE je v současnosti řešena v mnoha studiích a člancích. Autoři se zaměřují na predikci solárního záření anebo přímo na výrobu elektřiny potažmo aktuální výkon z FVE. Nejčastěji užívané metody pro řešení jsou neuronové sítě nebo metody založené na ARMA procesech. Pokud tyto přístupy budeme hodnotit, tak neuronové sítě nemají zaručenou přijatelnou predikci pro vstupní data, která jsou kvalitativně odlišná od trénovacích dat. Autoregresní modely jsou založeny na minulých pozorováních a často nevyužívají meteorologická data, což znamená, že jejich využití je na velmi krátké horizonty v řádu několika málo hodin.

Při obecném návrhu prediktoru je nutno definovat, na jak dlouhý časový okamžik je predikce požadována. Jiným způsobem se navrhuje prediktor ročního množství vyrobené elektřiny a jinak prediktor hodnot na následující hodinu či několik dnů. Tato kapitola byla zpracována s využitím literatury [17],[18],[19],[20],[21] pokud není uvedeno jinak.

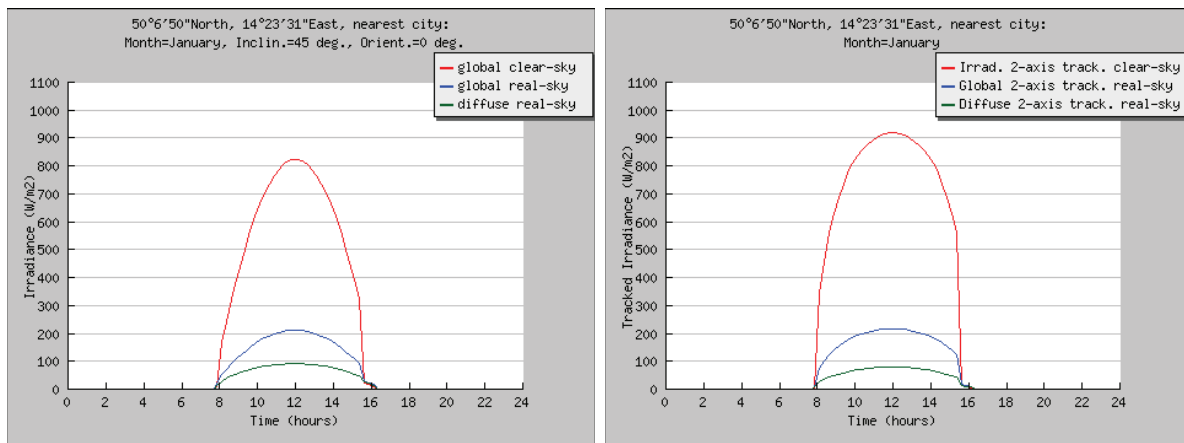
5.1 Možnosti dlouhodobé predikce

Pro určení dlouhodobého výhledu vyrobené elektřiny z fotovoltaických elektráren existuje řada výpočetních modelů jako jsou například Metonorm <http://meteonorm.com/pvPlaner> <http://solargis.info/pvplanner/> či online dostupná databáze PVGIS, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, z níž jsem využíval data pro testování modelu článku, a proto bych ji zde více popsal.

Databáze poskytuje odhad vyrobené elektřiny pro jednotlivé měsíce či rok. Tyto výpočty vycházejí z dlouhodobých záznamů o počasí v dané lokalitě a na jejich základě je určena očekávaná hodnota. Byla vytvořena výzkumným centrem Evropské komise a umožňuje kalkulaci výroby elektřiny v konkrétním místě v Evropě a v Africe. Umožňuje také zobrazení a stažení průměrných ročních a měsíčních dat solárního záření pro zadané souřadnice. Jak je patrné z Obr. 5.1 je možno z této databáze získat jak hodnoty globálního záření pro jasnou oblohu (global clear-sky), tak i hodnoty reálného globálního (global real-sky) i difúzního (diffuse real-sky) záření pro daný měsíc v roce. Konkrétně na Obr. 5.1(a) jsou znázorněny průběhy výše zmíněných záření pro pevně ukotvený panel, na 5.1(b), pak pro natáčecí panel. Výpočetní model využívá jak údaje ze satelitních měření, tak i z pozemních meteorostanic. Výhodou této databáze je její bezplatná online dostupnost.

5.2 Možnosti krátkodobé predikce

V současnosti je možno získat předpověď klimatických podmínek nejvýše na několik dní dopředu, kdy se zvyšující se délkou klesá přesnost. Je tedy zřejmé, že přesnost krátkodobé predikce výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren založená na předpovědi oblačnosti bude silně závislá na přesnosti předpovědních modelů počasí.



(a) Průběh solárního záření z PVGIS [22]

(b) Průběh solárního záření z PVGIS [22]

Obr. 5.1: Výstupy z databáze PVGIS

Pokud se zaměříme na krátkodobou predikci v řádech několika hodin či dní, můžeme využít několik postupů či metod, které lze obecně rozdělit na dvě skupiny, a to:

- metoda bez použití předpovědi meteorologických dat
- metoda s použitím meteorologických dat

V prvním případě využíváme posledních změřených údajů. Chyba predikce je obecně nižší, ale s rostoucí vzdáleností od posledních naměřených dat roste. Je tedy zřejmé, že použitelnost těchto metod je v řádu hodin.

Další možností je využít předpověď meteorologických dat, a to především oblačnosti. Tímto je možno predikovat až na několik dnů dopředu, nicméně přesnost predikce pak závisí na přesnosti předpovědi počasí. Tato metodika je pak dále využita pro návrh prediktoru v rámci této práce.

5.3 Časové řady v energetice

Na úvod do problematiky časových řad je nutno uvést jejich definici. Časová řada je posloupnost věcně a prostorově srovnatelných pozorování, která jsou jednoznačně uspořádána z hlediska času z minulosti do přítomnosti. Z pohledu energetiky představují časové řady například časově srovnané hodnoty výroby, spotřeby elektřiny měřené ve stejných intervalech, nebo hodnoty výroby elektřiny z fotovoltaické elektrárny. Formálně lze časovou řadu zapsat jako:

$$y_t, \text{ kde } t \text{ je čas pro } t = 1, 2, \dots, t$$

Pokud budeme chtít srovnávat údaje z různých dob v rámci jedné řady, je nutné zajistit, aby hodnoty řad informovaly o stejném problému. Dále je nutné zajistit, že údaje, které srovnáváme, musí být získávány a měřeny stále stejným srovnatelným způsobem. [23]

5.4 Modelování a analýza časových řad

Pro modelování časových řad existuje několik základních metod, které budou zmíněny níže.

5.4.1 Dekompoziční metoda

Tento model uvažuje, že každá časová řada je složena ze tří základních komponent, které lze v řadě nalézt a oddělit je. Vývoj časové řady lze pak pojmut jako součet, případně součin jednotlivých složek. V řadě se nemusí vyskytovat nutně všechny části. Jednotlivé základní složky můžeme pak rozdělit na:

- trendovou složku (T_t)
- periodickou složku
 - sezonního charakteru (S_t)
 - cyklického charakteru (C_t)
- náhodnou složku (ϵ_t)

Trendová složka vyjadřuje hlavní směr vývoje časové řady. Trend může mít stoupající či klesající charakter. Pokud řada neobsahuje trend a její hodnoty kolísají okolo konstantní hodnoty, jedná se pak o stacionární řadu.

Periodická složka nebo také periodické kolísání (oscilace) představuje pravidelné výkyvy kolem hlavního trendu. Toto kolísání se vyznačuje frekvencí a amplitudou, což představuje velikost výchylky. Podle délky ji pak můžeme dále dělit na sezonní, cyklickou a krátkodobou.

Sezonní složka je podskupinou periodické složky, kdy její perioda je zpravidla jeden rok nebo obecně je menší než délka sledovaného období. Zahrnuje výkyvy v jednotlivých měsících (například nižší spotřeba elektriny v letních měsících, vyšší v zimních).

Cyklická složka je charakterizována periodou výrazně kratší než jeden rok. Zahrnuje výkyvy v měsících, týdnech a dnech (kolísání spotřeby elektriny vlivem střídání dne a noci, případně pracovních a nepracovních dní v týdenním intervalu).

Náhodná složka zbude po odečtení trendu, sezonní a cyklické složky. Nedá se popsat žádnou funkcí času. Patří sem drobné výkyvy, které vznikají často z nahodilých nebo neznámých důvodů.

Dekompoziční metoda považuje trendovou a periodickou složku za systematické, lze pro ně najít vhodné matematické vyjádření. Nahodilá složka je naopak považována za veličinu náhodného charakteru, u které předpokládáme, že se v dlouhodobém průměru vyrovná. Jinak řečeno, průměr odchylek se blíží k nule.

Časové řady lze rozdělit na stacionární a nestacionární. Stacionarita je podmíněna přítomností pouze náhodné složky, kterou řady obsahují vždy. Pokud řada obsahuje náhodnou i periodickou složku, můžeme hovořit o stacionární periodické řadě.

Základní modely časových řad

Klasický matematický model časové řady předpokládá, že jednotlivé složky mohou být sčítány nebo násobeny. Kritérium výběru vhodného modelu závisí na tom, jakým způsobem se hodnoty dané časové řady vyvíjejí v čase.

Aditivní model lze formálně vyjádřit takto:

$$y_t = T_t + S_t + C_t + \epsilon_t \quad (5.1)$$

Multiplikativní model pak:

$$y_t = T_t S_t C_t \epsilon_t \quad (5.2)$$

Je zřejmé, že při použití aditivního modelu můžeme sčítat složky pouze se stejnými jednotkami. Tedy v takových, ve kterých je udávána pozorovaná hodnota časové řady. Naproti tomu u multiplikativního modelu má stejné jednotky pouze složka trendu, ostatní komponenty jsou bezrozměrné a udávají relativní změnu. Multiplikativní model je možno převést pomocí logaritmování na součtový tvar.

$$\log y_t = \log T_t + \log S_t + \log C_t + \log \epsilon_t \quad (5.3)$$

Problematika časových řad je značně rozsáhlá a je více zpracována v moji práci ke Státní doktorské zkoušce viz [29].

5.4.2 Box-Jenkins metodologie

Tato metodologie uvažuje jako základní stavební prvek konstrukce modelu časové řady reziduální složku, která může být tvořena korelovanými veličinami. Předpokladem je, že současnou hodnotu sledovaného ukazatele lze popsat lineární kombinací jeho minulých hodnot (autoregresní proces) a současných a minulých hodnot náhodné veličiny (proces klouzavých průměrů). Jedná se o adaptivní typ modelu a podmínkou pro jeho aplikaci je stacionarita časové řady, která je možno ověřit testy stability:

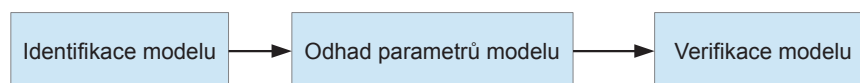
- DF test
- ADF test
- KPSS test
- PP test

Výsledný komplexní model bývá složen ze tří dílčích částí, nicméně nemusí nutně obsahovat všechny.

- AR (p) – autoregresive
 - lineární kombinace vlivů minulých hodnot

- I (d) – integrative
 - odstranění případných nestacionarit pomocí diferencí
- MA (q) – moving Average
 - lineární kombinace vlivů minulých chyb

Jednotlivé procesy tedy mohou fungovat samostatně, případně pak jako kombinace základních (ARMA, ARIMA...). Dále je možnost rozšířit model o sezonní vlivy, a pak můžeme hovořit o SARIMA modelu. Box-Jenkins algoritmus obsahuje 3 kroky, které jsou znázorněny na Obr. 5.2. Prvním krokem je identifikace modelu, kdy je třeba najít daný



Obr. 5.2: Box-Jenkins algoritmus

řád p a q pro obecný model $ARMA(p, q)$. Pro tuto činnost existuje řada nástrojů, nicméně často používaným je postup založený na hodnotách funkcí ACF a $PACF$, kdy základem identifikace je graf těchto funkcí.

Další částí algoritmu je nalezení číselných odhadů pro parametry zvoleného modelu na základě různých postupů.

Poslední bod spočívá v ověření statistických vlastností zvoleného modelu a jeho reziduální složky. V případě, že vybraný model nevyhovuje některému ze statistických požadavků, je potřeba zvážit použití jiného modelu. [24]

5.4.3 Lineární dynamické modely

Lineární dynamické modely zobecňují Box-Jenkins metodologii. Využívají kromě analyzované řady i další s původní související a ty pak využívají pro konstrukci modelu původní řady.

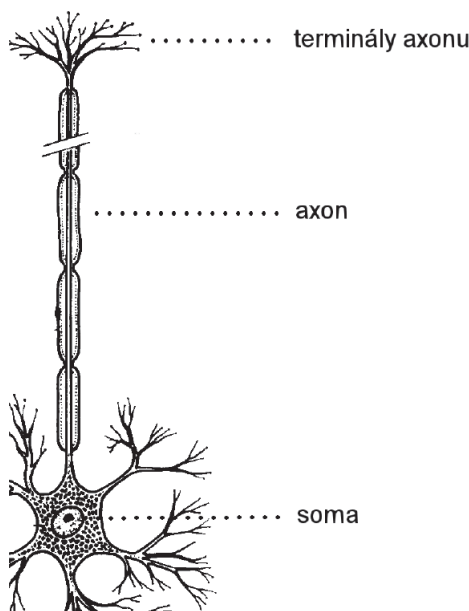
5.4.4 Spektrální analýza časových řad

Tato metoda uvažuje, že časová řada je tvořena kombinací sinusových a kosinusových křivek s různými amplitudami a frekvencemi. Využívá statistické nástroje jako periodogram a spektrální hustota. Výsledek spektrální analýzy může odhalit v časové řadě zastoupení jednotlivých dominantních frekvencí, které pak pomohou určit odpovídající koeficienty periodických složek.

5.5 Využití neuronových sítí pro predikci výroby FVE

Problematika neuronových sítí je známa již více než 50 let. V současnosti tyto sítě zažívají rozkvět, především díky výkonné výpočetní technice. V prvopočátku byly sítě vytvářeny za

účelem modelování nervového systému či případně celého mozku. [6]. Pokud se zaměříme na biologickou podstatu neuronu, tak ten se skládá z těla neboli soma, poté z výstupního axonu a vstupních dendritů. Axon je poté zakončen terminály, které jej spojují s dendrity ostatních neuronů. Vrstva mezi terminály a dendrity je pak označována jako synapse. To, jak jsou synapse propustné, ovlivňuje přenos vzruchu od terminálů k dendritům. Základní obrázek nebo schéma biologického neuronu je pak možno znázornit pomocí Obr. 5.3



Obr. 5.3: Schéma biologického neuronu [6]

Šíření vzruchu v nervové soustavě lze poté popsat takto: Dendrity neuronu jsou podrážděny a neuron po dosažení určitého stupně podráždění sám produkuje vzruch, který pak předává terminály axonu přes synaptickou vrstvu na dendrity dalších neuronů. Schopnost předávat vzruch je významná při vytváření paměťových stop. Tímto se vysvětluje schopnost učení. [25]

5.5.1 Umělý neuron

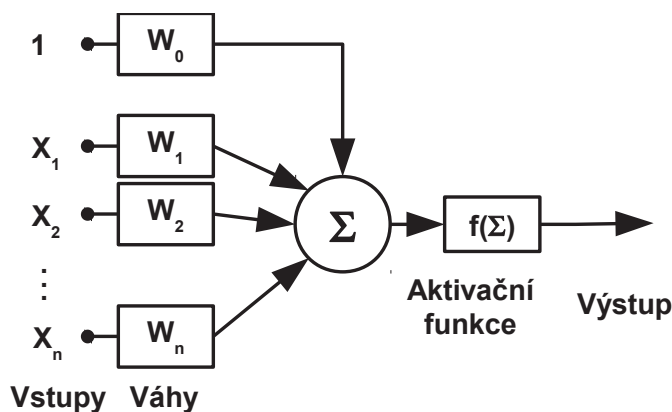
Na základě těchto biologických předpokladů byl pak definován matematický model neuronu, neboli umělý neuron. Základním modelem je model neuronu McCulloch-Pitts (MCP), který má několik vstupů označených X_1 až X_n a jeden výstup. Schématicky je pak znázorněn na Obr. 5.4

Činnost neuronu je pak možno popsat následujícími vztahy:

1. Zachycení signálu a vznik potenciálu P:

$$P = W_1 * X_1 + W_2 * X_2 + \dots + W_n * X_n \quad (5.4)$$

2. V případě dostatečně velkého potenciálu vyšle neuron signál y:



Obr. 5.4: Model neuronu [6]

$$y = 1, \text{ jestliže } P > W_0, \text{ jinak } y = 0$$

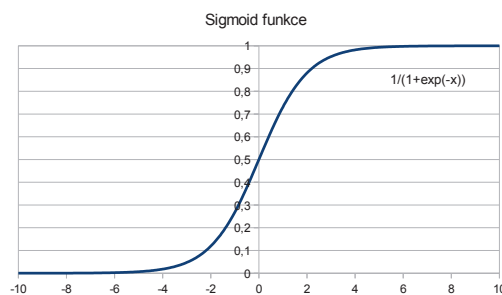
Podmínku $P > W_0$ je možné přepsat pomocí aktivační funkce $f(P)$. Finální matematický vztah pro činnost neuronu lze vyjádřit:

$$y = f(W_0 + W_1 * X_1 + W_2 * X_2 \dots + W_n * X_n) \quad (5.5)$$

Kde: W_0 - záporné číslo udávající práh, který musí potenciál překonat

Z těchto vztahů je patrné, že výsledek je ovlivněn především váhami W_0 až W_n , které představují propustnost signálu, neboli kolik zachyceného signálu se dostane do neuronu, kde zvýší potenciál. [26]

Aktivační funkce $f(P)$ může být různá, ale měla by být nelineární. Typickým příkladem může být například funkce Sigmoid nebo hyperbolický tangens. Z Obr. 5.5 (průběh funkce



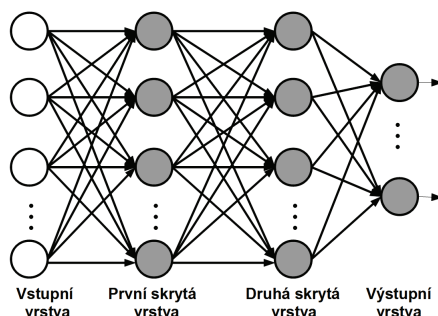
Obr. 5.5: Funkce sigmoid

Sigmoid) je patrná odezva neuronu na vstupní signál. Pokud bude potenciál po odečtení prahu W_0 nízký, výstupem bude 0. Naopak pokud bude potenciál dostatečně vysoký, tak výstupem bude 1.

5.5.2 Feed forward síť

Samotný neuron umožní řešení rozdělit pouze na dva poloprostory, což je v běžných úlohách nedostatečné. Proto bývá sestavena celá síť neuronů, jako například síť v zapojení feed-forward. V této síti je několik vrstev neuronů, přičemž v těchto vrstvách je propojen každý

neuron s každým, což je naznačeno na Obr. 5.6. Každý neuron v síti řeší pouze část celého



Obr. 5.6: Síť typu feed-forward [6]

problému. Výsledek je tvořen vzájemnou kompozicí příspěvků od všech neuronů v síti a celková naučená informace je tak rozprostřena mezi mnoha neurony.

Na Obr. 5.6 je znázorněna vstupní vrstva, která distribuuje signál na všechny neurony, dále pak první skrytá vrstva, druhá skrytá vrstva a výstupní vrstva. V ostatních vrstvách je prováděn výpočet, kdy se sečtou vážené vstupy pomocí vah, což tvoří potenciál, a je-li potenciál dostatečně velký, neuron na výstupu vyše signál. [26]

5.5.3 Učení neuronové sítě

Pro učení neuronové sítě existuje řada algoritmů, přičemž nejčastěji používaný je algoritmus Backpropagation. Tento algoritmus funguje na principu porovnání vyhodnoceného řešení s očekávaným, a tím je možné stanovit chybu. Na základě této chyby je pak možno vypočítat, jak se mají upravit váhy neuronů, aby se odchylka (chyba) od správného řešení co nejvíce snížila. V podstatě se síť přizpůsobuje datům. Detailní matematický popis učení je pak možno najít např. zde [39] nebo zde [26].

5.5.4 Simulace modelu FVE s využitím neuronových sítí

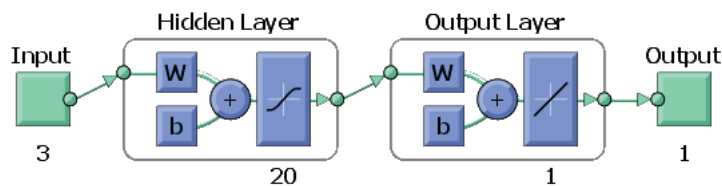
Cílem simulace bylo ověřit chování neuronových sítí pro dvě různé varianty použití teplot článku podobně jako v kapitole 5.6.

V prvním případě byly použity změřené hodnoty solárního záření, teploty článku a výstupního výkonu.

V druhém případě pak místo změřených hodnot teploty článku, byly použity průměrné teploty v daném místě.

Pro tvorbu modelu FVE, založeném na použití neuronových sítí, byl použit neural network toolbox v MATLABu. Konkrétně se jednalo o dvouvrstvou feed-forward síť se sigmoidními skrytými neurony a s výstupními neurony s lineární aktivační funkcí. Síť měla 20 neuronů ve skryté vrstvě a 3 vstupy, což je patrné z obr. 5.7 Pro učení byl použit Levenberg-Marquardt backpropagation algoritmus.

Jako vstupní data byly použity hodnoty výkonu, osvitů a teplot článku z <http://andrea.feld.cvut.cz/fvs/>, přičemž byla použita hodinová data. Pro první variantu

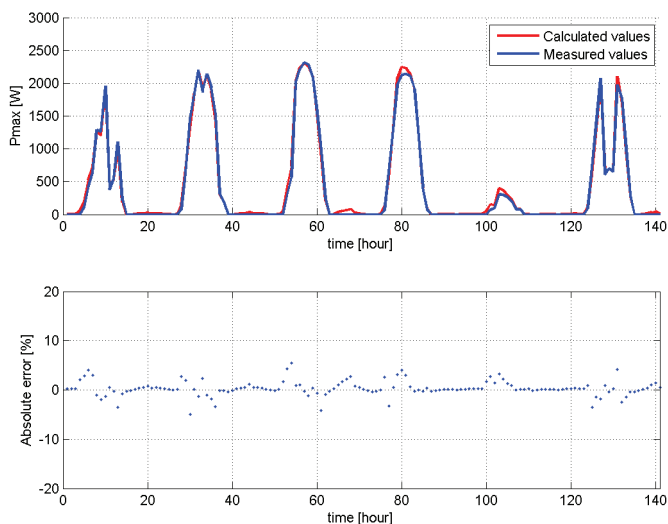


Obr. 5.7: Použitá neuronová síť [7]

simulace byly použity změřené hodnoty teploty článku.

Pro druhou variantu výpočtu byly pak použity teploty z webových stránek Operátora trhu s elektřinou <http://www.ote-cr.cz/> z období 26.2.2012 až 16.3.2012.

Síť byla trénována na datech za 13 dní. Celkem tedy bylo použito 313 vstupních hodnot jednoho vstupu, přičemž rozložení dat mezi trénovací, validační a testovací bylo 70 %, 15 % a 15 % dat.



Obr. 5.8: Srovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami výkonu při použití průměrných denních teplot

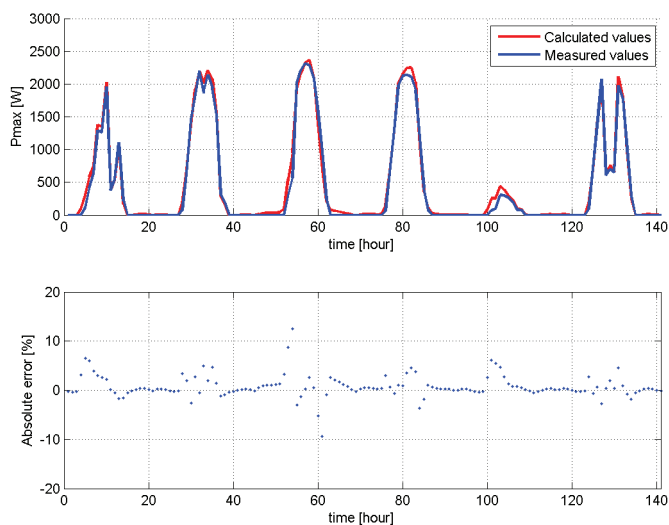
Na Obr. 5.8 je znázorněno srovnání mezi vypočtenými hodnotami výkonu pomocí neuronové sítě a změřených hodnot. Hodnoty relativně dobře korespondují se skutečnými. Nicméně neuronová síť občas produkuje záporné hodnoty, což je možno snadno ošetřit. Chyba byla počítána jako rozdíl mezi skutečnou a změřenou hodnotou a byla vyjádřena v poměru ku maximálnímu výkonu podle vztahu:

$$\Delta_{neuron} = \frac{P_{FVE-neuron} - P_{FVE-skut}}{3000} * 100[\%] \quad (5.6)$$

Kde:

$P_{FVE-neuron}$ - predikovaný výkon FVE pomocí neuronové sítě [W]

$P_{FVE-skut}$ - změřená hodnota výkonu [W]



Obr. 5.9: Srovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami výkonu při použití reálných teplot článku

Výstupy z neuronové sítě jsou pro oba druhy dat teploty srovnány pomocí rozdílu energie oproti naměřeným datům (za 18 dní). Jak je tedy z tabulky 5.1 patrné, při použití reálných teplot článku je rozdíl mezi skutečně vyrobenou elektřinou a predikovanou pomocí neuronových sítí menší, než při použití průměrných teplot.

Tab. 5.1: Rozdíl skutečně vyrobené elektřiny oproti modelu

	Vyrobena elektřina
Změřené teploty článku	-1,37 kWh
Průměrné denní teploty	-3,23 kWh

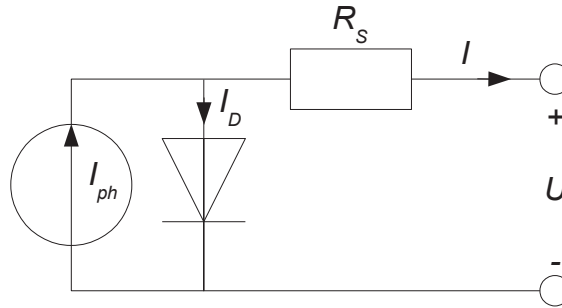
Pokud bychom měli k dispozici predikovanou teplotu článku, byla by přesnost predikce výroby elektřiny výrazně lepší, než při použití průměrné teploty okolí. Nicméně určení teploty článku je poměrně komplikované.

Celá tato problematika byla součástí článku na konferenci EPE 2012 [39].

5.6 Využití matematického modelu FVE pro predikci

Jedním z možných přístupů pro predikci budoucí hodnoty výkonu či výroby elektřiny z FVE je možnost vytvořit detailní matematický model systému, který při zadání předpovídaných parametrů bude podávat dobré výsledky. Na základě toho byl vytvořen model FVE v software MATLAB a byly provedeny jeho testy s reálnými daty.

Možných modelů FV článku existuje více druhů, většina však uvažuje základní zapojení, které je složeno z ekvivalentního proudového zdroje, diody a sériového rezistoru R_S . (viz Obr. 5.10) Generovaný proud I_{ph} je přímo úměrný solárnímu záření. Rezistor R_S představuje odpor článku a jeho připojení. Rovnice pro výpočet proudu článkem v závislosti



Obr. 5.10: Model fotovoltaického článku článku [27]

na napětí U je pak definována takto:

$$I = I_{SC} \left(1 - e^{\frac{U - U_{0C}}{mU_t}} \right) \quad (5.7)$$

Kde:

I_{SC} – proud nakrátko, který v sobě zahrnuje solární záření G_a a teplotu článku t^C

U_{0C} – napětí naprázdno, který v sobě zahrnuje solární záření G_a a teplotu článku t^C

U_t – tepelné napětí, které odpovídá teplotě článku

m – idealizující konstanta korekce V-A charakteristiky článku

Rovnice pro proud I_{SC} je definována takto:

$$I_{SC} = C_1 G_a + K_1 (T^C - T^{C0}) \quad (5.8)$$

Kde:

C_1 – materiálová konstanta [Am^2/W]

K_1 – materiálová konstanta [A/K]

G_a – hodnota solárního záření [W/m^2]

T^C – termodynamická teplota, které odpovídá aktuální teplotě článku t^C [K]

T^{C0} – termodynamická teplota [K]

$$T^{C0} = 273,15 + t^{C0} \quad (5.9)$$

T^C je počítán z okolní teploty t_a [$^{\circ}\text{C}$] se zahrnutím vlivu osvit (materiálová konstanta C_2 [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$])

$$T^C = t_a + 273,15 + C_2 G_a \quad (5.10)$$

Rovnice pro U_{0C}

$$U_{0C} = U_{0C0} + C_3 (T^C + T^{C0}) - \frac{1}{K_4} e^{\frac{G_a - G_{a0}}{K_3}} \quad (5.11)$$

Kde:

U_{0C} referenční napětí na prázdno [V]

C_3 materiálová konstanta [V/K]

K_3 materiálová konstanta [$\log(\text{W}/\text{m}^2\text{V})$]

K_3 materiálová konstanta [$\text{W}/\text{m}^2\text{V}$]

Teplotní napětí U_t v závislosti na teplotě je počítáno následující rovnicí:

$$U_t = \frac{kT^C}{e} \quad (5.12)$$

Kde:

k Boltzmanova konstanta $k = 1,381 * 10^{-23}$ [J/K]

e konstanta pro základní elementární náboj $e = 1,602 * 10^{-19}$ [C] Výsledný výkon je

pak definován:

$$P = (100 - l)pUI_{SC} \left(1 - e^{\frac{U-U_{0C}}{mU_t}}\right) \quad (5.13)$$

Kde:

p celkový počet solárních článků elektrárny

l ztráty fotovoltaické elektrárny

Jak je patrné z matematického popisu, komplexní model zahrnuje velké množství proměnných a konstant. Z tohoto důvodu je možné využít tento model jako základ pro predikci pouze pro konkrétní fotovoltaickou elektrárnu, když známe detailní parametry panelů. Nicméně je zde další problém s určením teploty článku, která závisí nejenom na solární záření dopadající na panel, ale také na teplotě okolí, větru, dešti a tepelné setrvačnosti panelu. [27]

Testování modelu FVE

Na základě výše uvedených rovnic byl v softwaru MATLAB vytvořen model, přičemž jako vstupní data byly použity hodnoty z <http://andrea.feld.cvut.cz/fvs/>. Data z FVE mají granularitu jedna minuta, nicméně pro účely této simulace byla použita hodinová data. (26.2.2012 - 16.3.2012).

Byly simulovány dva případy. V prvním byly použity změřené hodnoty teploty článků a solární záření. Výstupem modelu byl pak okamžitý výkon, potažmo energie.

Na Obr. 5.11 je zobrazeno srovnání naměřených a vypočtených hodnot pomocí matematického modelu článku. Křivky se poměrně dobře překrývají a jak je patrné z průběhu absolutní chyby, která byla počítána jako rozdíl mezi skutečnou a změřenou hodnotou a byla vyjádřena v poměru ku maximálnímu výkonu podle vztahu:

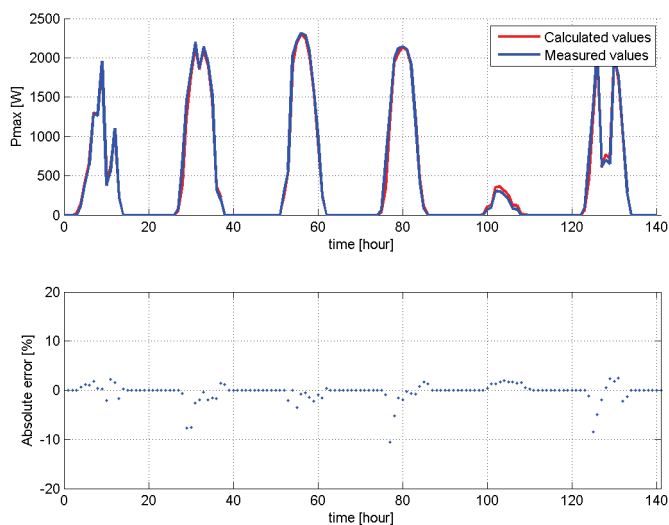
$$\Delta_{model} = \frac{P_{FVE-model} - P_{FVE-skut}}{3000} * 100[\%] \quad (5.14)$$

Kde:

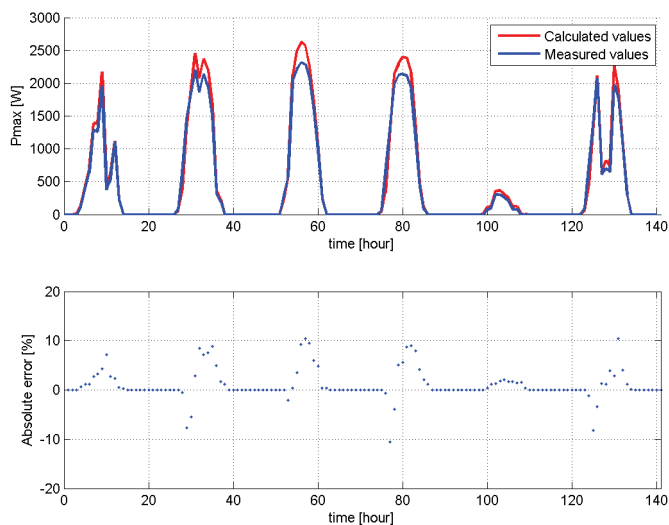
$P_{FVE-model}$ - predikovaný výkon FVE počítaný pomocí matematického modelu [W]

$P_{FVE-skut}$ - změřená hodnota výkonu [W]

Ve druhém případě byly použity místo naměřených teplot článku průměrné teploty pro dané místo ze stránek <http://www.ote-cr.cz/>.



Obr. 5.11: Srovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami výkonu při použití reálných teplot článku



Obr. 5.12: Srovnání mezi vypočtenými a změřenými hodnotami výkonu při použití průměrných teplot pro dané místo

Největší rozdíl i chyba je v oblasti maximálního výkonu, kde dochází k největšímu ohřevu článku. (viz 5.12). Pro hodnocení byla použita stejná metodika jako v kapitole 5.5.4. Při použití modelu článku a změřených teplot, vychází rozdíl změřené energie vůči vypočtené 1,01 kWh. V případě neuronové sítě (viz tabulka 5.1) je to 1,37 kWh. Model tedy vychází lépe.

Pokud však použijeme průměrné okolní teploty, vychází lépe použití neuronové sítě. V případě modelu FVE vychází rozdíl energií 4,56 kWh a v případě neuronové sítě pak 3,23 kWh.

6 Návrh prediktoru založeném na dostupné předpovědi oblačnosti pro jednu FVE

Jak již bylo řečeno v kapitole 5 většina dnešních přístupů k tvorbě predikčního modelu je založena na využití neuronových sítí. Mnou zvolený přístup naopak využívá analytický postup pro stanovení budoucí výroby či výkonu. Hlavní výhodou tohoto přístupu je jeho jednoduchost a jednoznačnost řešení.

Na začátek je vhodné provést definici prediktoru, stanovení cílů a také použitý matematický aparát.

6.1 Použitý matematický aparát

Mnou navrhovaný prediktor je založen na statistickém vyhodnocení historických dat, proto je zde nutno definovat alespoň základní matematický aparát, který je využit pro samotnou tvorbu prediktoru a analýzu naměřených dat. Neboli základní teorie z oblasti statistiky. [28]

Histogram

Histogram je grafické znázornění četnosti dat pomocí sloupcového grafu se sloupci stejné šířky, vyjadřující šířku intervalů (tříd), přičemž výška sloupců vyjadřuje četnost sledované veličiny v daném intervalu. Je důležité zvolit správnou šířku intervalu, neboť nesprávná šířka intervalu může snížit informační hodnotu diagramu. [28]

Medián

Medián je padesátí procentní kvantil neboli číslo, které leží uprostřed podle velikosti uspořádaného souboru čísel. Polovina čísel má tedy hodnotu, která je větší nebo rovna mediánu a polovina čísel má hodnotu, která je menší nebo rovna mediánu. Výhodou mediánu je jeho necitlivost na extrémní hodnoty ve zkoumaném souboru.

Střední hodnota

Střední hodnota náhodné veličiny X , označované μ nebo $E(X)$, je reálné číslo definované pro diskrétní náhodnou veličinu, která nabývá hodnot x_1, x_2, \dots s pravděpodobnostmi p_1, p_2, \dots , tj. $[P(X = x_i) = p_i]$ takto:

$$\mu = E(X) = \sum x_i p_i = x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots \quad (6.1)$$

Střední hodnota může být limitním případem aritmetického průměru. Pro velký počet hodnot je tedy možné považovat aritmetický průměr za dobrý odhad střední hodnoty.

Ta je poté počítána ze vztahu

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum x_i \quad (6.2)$$

Kde:

N - počet realizací

Rozptyl

Rozptyl je možno značit jako $D(X)$ nebo také σ^2 a je ho možné definovat:

$$\sigma^2 = D(X) = (X - E(X))^2 \quad (6.3)$$

Odhad rozptylu je pak možno vypočíst:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{N} \sum x_i^2 - \hat{\mu}^2 \quad (6.4)$$

Směrodatná odchylka

Je označována jako σ a je definována jako druhá odmocnina rozptylu.

$$\sigma = \sqrt{D(X)} \quad (6.5)$$

Kde:

X - náhodná veličina

Rozptyl spolu se směrodatnou odchylkou lze použít jako kritérium, jak hodně se hodnoty odlišují od průměru. Malé hodnoty rozptylu zvyšují význam průměru, velké pak znamenají, že hodnoty mají vysokou variabilitu.

Stacionarita

Stacionarita je obvyklým předpokladem většiny způsobů analýzy časových řad. Jedná se o náhodný proces, jehož rozdělení pravděpodobnosti se v čase nemění. V důsledku toho se nemění ani parametry jeho pravděpodobnostní funkce (např. střední hodnota, rozptyl). [28]

6.2 Definice prediktoru pro jednu fotovoltaickou elektrárnu

Cílem je navrhnout prediktor výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren na několik dní dopředu na základě znalosti předpovědi počasí. Čili predikci výroby je možné stanovit na tak dlouhou dobu dopředu, na jakou je předpověď počasí dostupná. Výroba elektrické energie FVE závisí především na hodnotě dopadajícího solárního záření na panel a na teplotě panelu.

Vliv teploty je patrný především v letních měsících, kdy při stejných hodnotách slunečního záření jako například na jaře, vyrobí elektrárna méně energie. Tento jev je

způsoben ohřevem panelu, s čímž souvisí snížení napětí i výkonu jednotlivých článků. Neboli obecně, se zvyšující se teplotou klesá účinnost panelu.

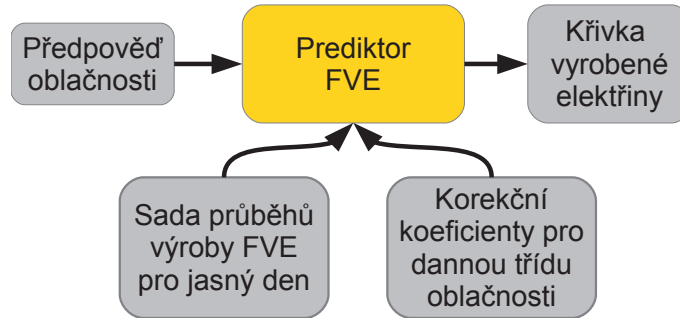
Dále je výroba elektrické energie z FVE silně závislá na denní době a na ročním období. Vliv ročního období se mimo jiné projevuje odlišnými časy východů a západů slunce. Tyto časy jsou různé pro každý den v roce, proto je pro predikci důležité dobře zvolit interval stacionarity, v rámci kterého budeme předpokládat, že časy východů a západů jsou stejné nebo alespoň srovnatelné. V ideálním případě by bylo vhodné mít pro každý den v roce vlastní denní diagram pro všechny předpovědi oblačnosti. Toto by však znamenalo mít k dispozici historická data vyrobené elektrické energie z FVE a oblačnost pro danou FVE za spoustu let a ta nejsou v současné době v dostatečném množství dostupná. Proto byl navržen následující přístup, který umožní získat 365 denních diagramů pro jasnou oblohu a sadu korekčních koeficientů, pomocí kterých je možné stanovit denní digramy pro různé předpovědi oblačnosti.

6.3 Metodika výpočtu

Metodiku výpočtu je možné shrnout do několika bodů, které budou následně podrobně popsány v dalších kapitolách.

- Provést analýzu historických dat výroby elektřiny z FVE pro dostatečně dlouhé období do minulosti
- Vypočítat z těchto dat denní digramy výroby při jasné obloze pro každý den v roce
- Očistit data od vlivu kalendáře (normování dat)
- Analýza očištěných/normovaných dat pro jednotlivé třídy oblačnosti
- Stanovit koeficienty pro jednotlivé třídy oblačnosti
- Určit chybu predikce

Navržený prediktor bude využívat meteorologická data oblačnosti ke stanovení výroby elektrické energie FVE na budoucí období. Vstupem prediktoru je předpověď oblačnosti ve formě počtu osmin pokrytí oblohy, dále pak sada korekčních koeficientů a sada denních diagramů pro jasný sluneční den. Obě posledně uvedené sady dat jsou výsledkem analýzy historických dat. Předpověď oblačnosti je meteorologická. Následující Obr. 6.1 schematicky znázorňuje predikci vyrobené elektřiny z FVE.



Obr. 6.1: Prediktor FVE

Výsledný vztah pro prediktor je pak možno definovat takto:

$$P_{FVE}(t + \Delta t) = DD_{REF}(t + \Delta t)(k_1 k_{OBL}(O_1) + k_2 k_{OBL}(O_2)) \quad (6.6)$$

Kde:

$P_{FVE}(t + \Delta t)$ - predikce jako očekávaná hodnota vyrobené elektřiny z FVE určená v čase t na čas $(t + \Delta t)$

Δt - horizont plánování

$DD_{REF}(t + \Delta t)$ - hodnota denního diagram pro jasnou oblohu čase $(t + \Delta t)$ viz kapitola 6.4

k_{OBL} - korekční koeficient pro danou oblačnost dle předpovědi viz: 6.6

O_1 a O_2 - je předpověď oblačnosti na čas $(t + \Delta t)$

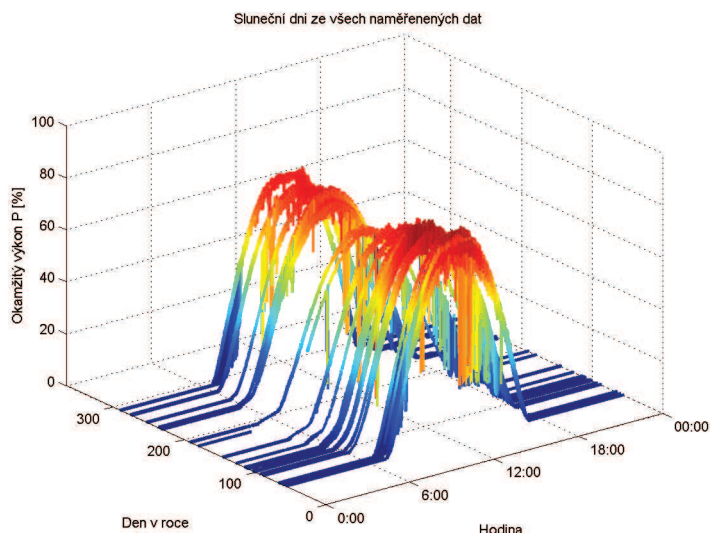
k_1 a k_2 - váhy oblačností pro předpovědi O_1 a O_2

Důvodem pro existenci dvou předpovědí je skutečnost, že tyto předpovědi jsou často uváděny jako interval (viz kapitola 4.3.2).

6.4 Stanovení denních diagramů pro jasnou oblohu

Základem prediktoru je sada denních diagramů pro jasnou oblohu. Jejich získání bylo prováděno v několika krocích. Prvním krokem bylo vyhledání slunečních dní v datech od roku 2007 do roku 2011. Slunečný den byl na základě analýzy dat definován jako den, kdy medián v okolí poledne je větší než 0,6 a dále, že rozptyl hodnot v rozmezí před a po poledni je menší než $1e^{-3}$. Tyto předpoklady byly určeny experimentálně z měřených dat. Jednodušší přístup by bylo podívat se, jaká byla daný den oblačnost a podle toho den vybrat. Nicméně data oblačnosti byla dostupná až od roku 2011, tudíž byla použita metoda viz výše.

Jelikož počet slunečních dní ve vybraném vzorku dat nebyl dostatečný, byl přijat předpoklad, že denní diagram ve slunečních dnech od zimního do letního slunovratu jsou stejné jako od letního do zimního a také, že denní diagram slunečného dne je symetrický vůči poledni. Tento předpoklad byl poté ověřen na základě porovnání hodnot výroby z databáze PVGIS [22] v průběhu roku. Průběhy nalezených slunečních dní ze všech analyzovaných dat jsou pak znázorněny na Obr. 6.2.



Obr. 6.2: Sluneční dni ze všech naměřených dat

Jak je z obr 6.2 patrné, nalezené průběhy nemohly být použity přímo jako hledané hodnoty denních digramů pro jasnou oblohu DD_{REF} pro každý den v roce, protože i přes nastavená kritéria jejich výběru, nebyly křivky vždy hladké. Proto byl zvolen postup, kdy z denního diagramu každého slunečního dne byly vybrány vzorky, které byly proloženy křivkami napříč rokem. Vybrané vzorky jsou popsány dále a nazvány reprezentativní body.

Výběr reprezentativních bodů

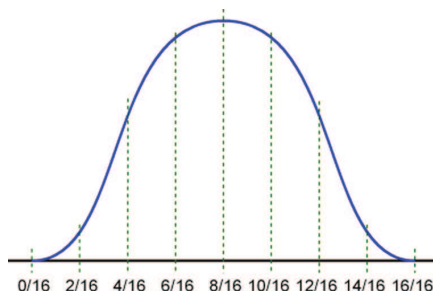
Reprezentativní body popisují hladiny výkonu ve stejných částech dne během roku.

Prvním krokem tedy bylo určit vhodný počet odebíraných vzorků dat, a také v jaké části křivky budou vypočteny. Je tedy nutno zvolit vhodně interval stacionarity, neboli je nutno vybírat vzorky z dat ve stejných okamžicích v průběhu roku. Tento požadavek byl splněn tak, že vzorky byly odebrány v závislosti na času východu a západu slunce pro dané souřadnice elektrárny a den.

Počet vzorků byl stanoven na 17, přičemž při testování jejich poloviční počet po proložení nedostatečně věrně popisoval původní data a větší počet již nevedl ke zlepšení. Proto bylo odebráno z hodnot každého slunečního dne sedmnáct vzorků, které po proložení určují denní průběh (viz Obr. 6.3) a to tak, že 0/16 odpovídá hodnotě při východu slunce a 16/16 při západu. Maximální hodnota v poledne odpovídá 8/16.

Dalším krokem bylo určit způsob odběru vzorků z dat, protože tím můžeme ovlivnit dodatečné vyhlazení budoucí křivky. Je možné použít přímo danou hodnotu v bodě, nebo použít i hodnoty v okolí bodů. S tímto pak také souvisí jejich vhodný počet, tak abychom zachovali původní průběh. Experimentálně byl stanoven jako vhodný počet okolních bodů pět a jako vhodný typ výpočtu medián jakožto odhad střední hodnoty okolo bodu. Byl testován i jiný větší počet bodů, což ale nevedlo ke zlepšení.

Na základě výše zmíněných předpokladů je možné definovat jednotlivé kroky algoritmu, který umožnil získat denní digramy pro jasný den pro celý rok DD_{REF} .

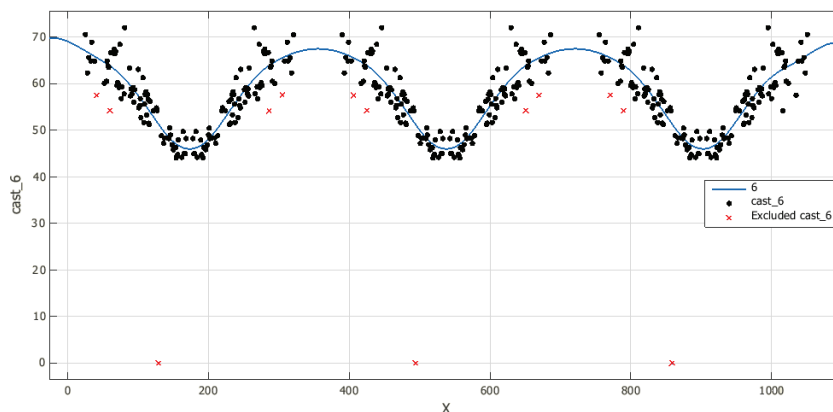


Obr. 6.3: Rozložení reprezentativních bodů během dne

- nalezení hodnoty okamžitého výkonu při času východu slunce pro daný den
- nalezení hodnoty okamžitého výkonu při času západu slunce pro daný den
- výpočet času mezi západem a východem slunce a jeho rozdělení na 16 intervalů
- Výpočet mediánu z okolních hodnot okolo bodu
- proložení jednotlivých bodů hladkou křivkou napříč rokem
- proložení křivkou jednotlivými body, která tvoří denní diagram v závislosti na času východu a západu slunce pro každý den v roce

Interpolace křivkami byla realizována v programu MATLAB s využitím nástroje `cftool`, přičemž tento nástroj umožňuje výběr a testování různých způsobů a metod proložení s ohledem na chybu. Vzhledem k charakteru prokládaných dat, byla po testování vybrána metoda prokládání pomocí `smothing spline`, která poskytla nejlepší výsledky, tj. nejmenší chybu. Křivek bylo prokládáno celkem devět, protože předpokládáme symetrii denního diagramu během dne.

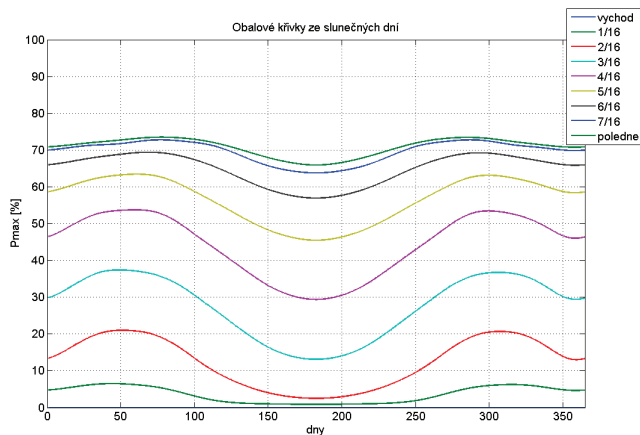
Je zde také nutno zmínit samotnou přípravu dat před prokládáním. Data byla nejdříve zkopírována před i za sledovaný rok, aby vznikla plynulá návaznost na sousední roky. Dále pak byly ručně z dat odstraněny odlehlé hodnoty, které jsou na Obr. 6.4 označeny červenými křížky.



Obr. 6.4: Ukázka prokládání křivky č. 6

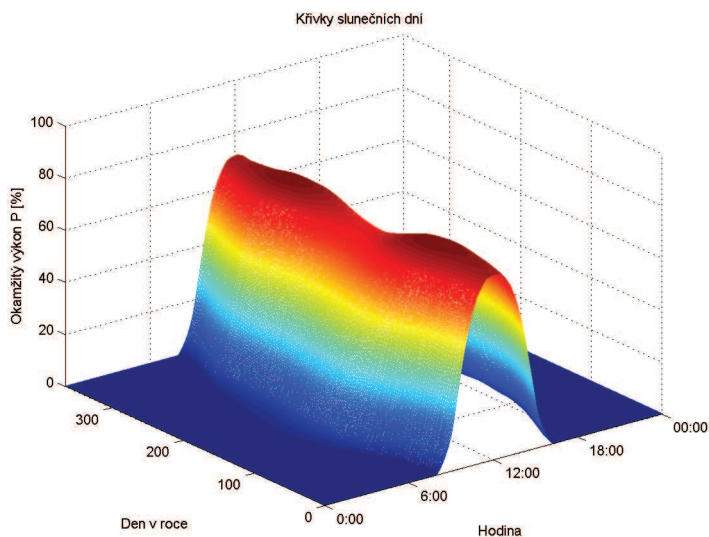
Tato situace a ukázka prokládání křivky odpovídající 6/16 je znázorněna na Obr. 6.4, kde jsou patrné výše uvedené skutečnosti. Ostatní křivky byly poté prokládány stejným způsobem.

Výsledkem prokládání je pak sada křivek, které definují jaká bude hodnota ve zmíněných 16 bodech každý den v roce viz Obr. 6.5.



Obr. 6.5: Obalové křivky ze slunečních dní

Posledním krokem k tvorbě DD_{REF} je naklonování obalových křivek do druhé půlky dne a následně jejich proložení v rámci každého dne v roce na základě času východu a západu slunce pro dané souřadnice. Pro proložení jednotlivých bodů ve dni byla použita funkce `interp1()` v MATLABu. Výsledkem je sada DD pro každý den v roce pro jasný sluneční



Obr. 6.6: Křivky slunečních dní

den. Výsledná sada křivek ve formě 3D grafu je poté znázorněna na Obr. 6.6. Na grafu jsou patrná obě maxima výkonu a také propad výkonu v letních měsících. Díky konstrukci denních diagramů na základě časů východu a západu slunce je zde vidět také větší šířka diagramu v letních měsících.

6.5 Stanovení korekčních koeficientů pro jednotlivé třídy oblačnosti

Dalším krokem při tvorbě prediktoru je stanovení korekčních koeficientů pro jednotlivé třídy oblačnosti. Toho je možno docílit pomocí normování, neboli podělení dat z referenční elektrárny vypočtenými denními diagramy pro jasnou oblohu dle následujícího vztahu:

$$P_{FVE,normovane} = \frac{P_{FVE}(t)}{DD_{REF}(t)} \quad (6.7)$$

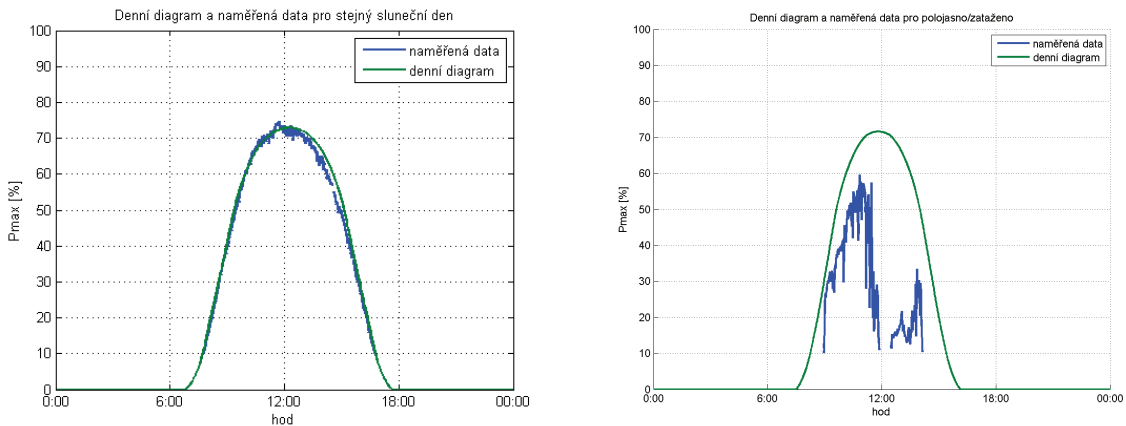
Kde:

$P_{FVE,normovane}(t)$ - normovaný okamžitý výkon FVE v čase t

$P_{FVE}(t)$ - okamžitý výkon FVE v čase t

$DD_{REF}(t)$ - hodnota vypočteného denního diagramu výroby FVE pro jasné dny

Tímto způsobem dojde k odstranění vlivu denního i ročního kalendáře. Výsledné průběhy podílů jsou pak závislé jen na oblačnosti. Následující grafy názorně demonstrují význam a vliv normování.



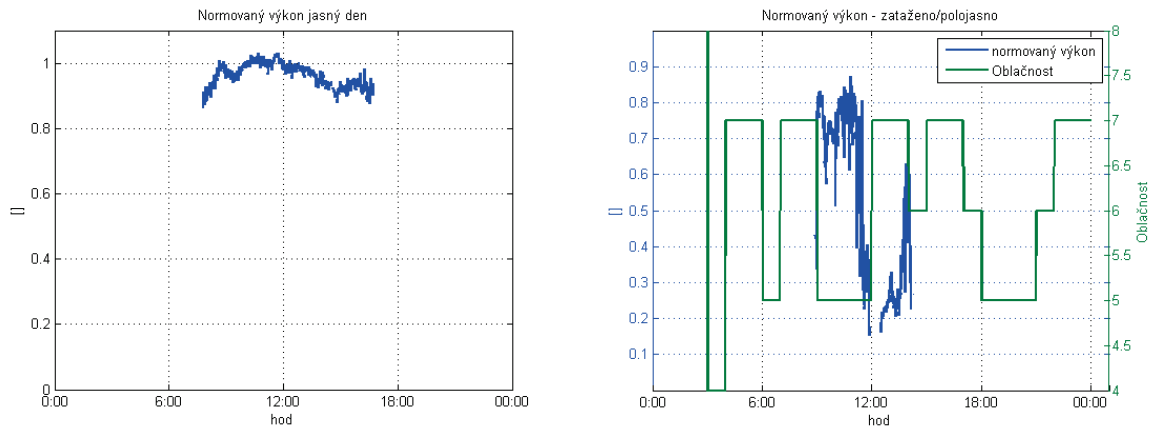
(a) Denní diagram pro jasný den

(b) Denní diagram a naměřená data pro polojasno/
zataženo

Obr. 6.7: Porovnání skutečně naměřených dat a vypočtených denních diagramů

Na Obr. 6.7 jsou patrné dva průběhy výkonu elektrárny a vypočtený denní diagram. U levého obrázku je patrná poměrně dobrá shoda křivek, pravý pak znázorňuje průběh při stavu oblačnosti polojasno a zataženo.

Na Obr. 6.8(a) je patrný vliv oblačnosti na průběh podílu obou křivek. Pokud by shoda obou digramů byla stoprocentní, výsledný podíl by byl tvořen přímkou s hodnotou 1. V tomto grafu není zakreslena hodnota oblačnosti, která však byla po celý den rovna 0/8, neboli bylo celý den jasno. Na Obr. 6.8(b) je patrná vazba mezi průběhem měřené oblačnosti a normovaného výkonu. Je zde patrný pokles výkonu FVE při zvětšené oblačnosti (vyšší počet osmin). Neboli propad okamžitého výkonu přibližně v polovině dne



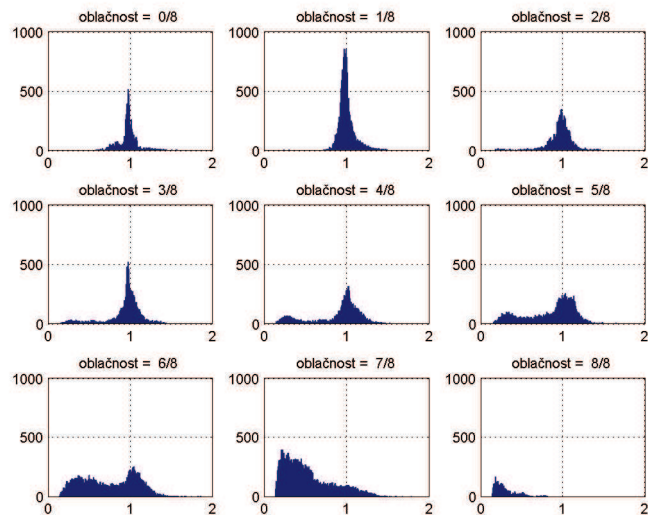
(a) Normovaný výkon – jasný den

(b) Normovaný výkon – polojasno/zataženo

Obr. 6.8: Průběhy normovaných dat

koresponduje se změnou oblačnosti. Naměřená oblačnost má hodinovou granularitu a tedy, jak je z Obr. 6.8(b) patrné, ke změně oblačnosti dochází před okamžikem měření oblačnosti.

Dále byla znormovaná data $P_{FVE,normovane}$ dle vztahu (6.7) rozdělena podle naměřených hodnot oblačnosti do jednotlivých tříd a byly vypočítány základní statistické ukazatele. Na Obr. 6.9 jsou znázorněny histogramy četností výkonů v jednotlivých třídách oblačnosti, které slouží pro odhad střední hodnoty koeficientu pro danou třídu oblačnosti.

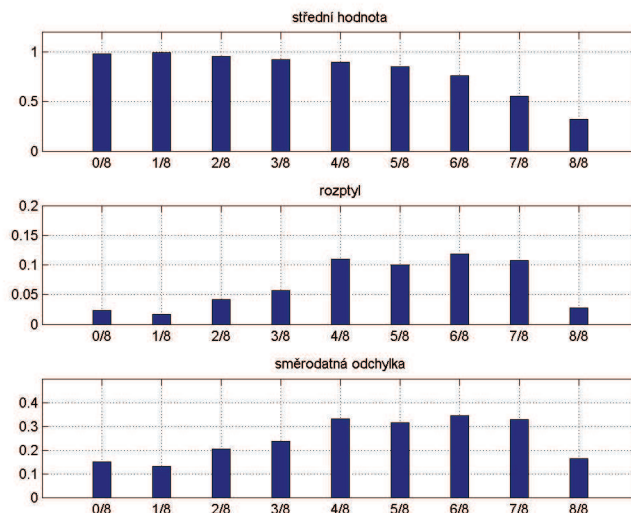


Obr. 6.9: Histogramy četností normovaných výkonů

Z histogramů je patrné, že některé hodnoty normovaného výkonu ve třídách oblačnosti jsou větší než 1, což znamená, že elektrárna dodává do sítě vyšší výkon, než za slunečného dne. Tento jev je způsoben rozdílnou teplotou panelů při různých oblačnostech, kdy s nižší teplotou roste účinnost elektrárny.

6.6 Korekce denních diagramů pro jednotlivé třídy oblačnosti

Dále byly určeny statistické parametry jako střední hodnota, rozptyl a směrodatná odchylka. Jejich hodnoty pro jednotlivé třídy oblačnosti jsou poté vykresleny na Obr. 6.10.



Obr. 6.10: Statistika normovaných dat v třídách oblačnosti

Střední hodnoty znormovaných dat pro jednotlivé třídy oblačnosti jsou pak použity jako korekční koeficienty oblačnosti k získání denních diagramů i pro ostatní třídy oblačnosti. Vynásobením diagramů pro sluneční dny DD na Obr. 6.6 korekčními koeficienty z Obr. 6.10 získáme denní diagramy pro každý den v roce a pro každou třídu oblačnosti.

6.7 Testování prediktoru a definice chyb

Posledním krokem při tvorbě prediktoru je jeho testování a definice chyb. Chyba predikce byla definována jako rozdíl predikované hodnoty v čase a skutečně naměřené dle vztahu:

$$\Delta P_{FVE-METEOpredpoved}(t + \Delta t) = P_{FVE-namerene}(t + \Delta t) - P_{FVE-predikovane}(t + \Delta t) \quad (6.8)$$

Kde:

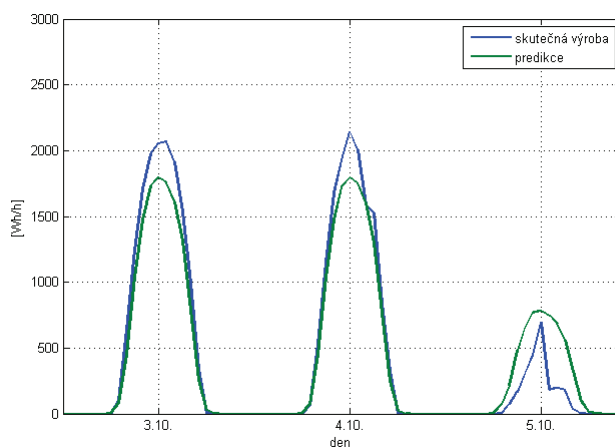
$\Delta P_{FVE-METEOpredpoved}(t + \Delta t)$ - chyba predikce v čase t

$P_{FVE-namerene}(t + \Delta t)$ - hodinový průměr vyrobené elektřiny z FVE

$P_{FVE-predikovane}(t + \Delta t)$ - očekávaná hodnota vyrobené elektřiny z FVE z času t

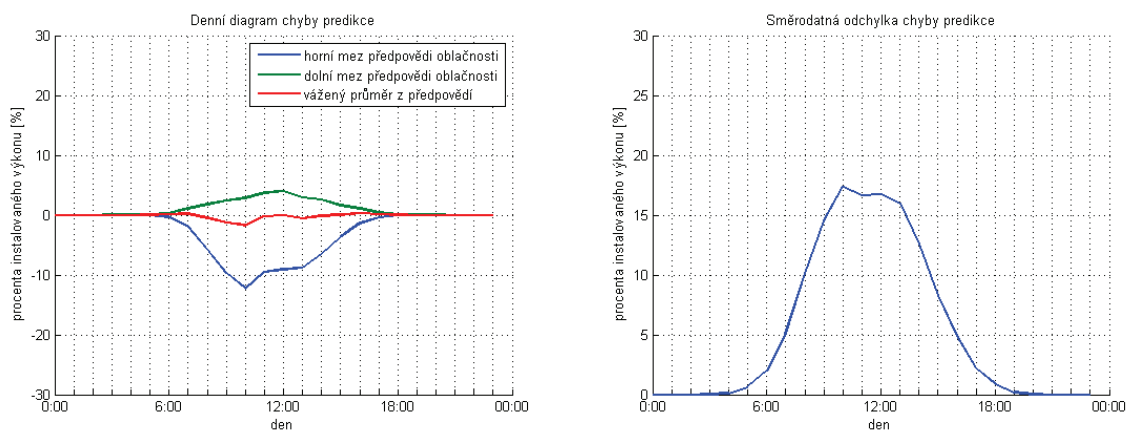
Prediktor byl naladěn na naměřených datech výroby a meteorologické předpovědi oblačnosti z roku 2011 a testován na datech z roku 2012. Předpovědi na webu <http://www.chmi.cz/> jsou popisovány jako hranice intervalu, ve kterém se bude oblačnost nacházet. Tyto meze jsou, jak již bylo uvedeno, zohledněny ve vztahu 6.6 pro prediktor. Výsledný prediktor vyrobené elektrické energie FVE je brán jako vážený průměr těchto

oblačností, kde jednotlivé váhy byly identifikovány na stejných datech z roku 2011. Na Obr. 6.11 je pak znázorněno srovnání naměřené vyrobené elektřiny a predikce.



Obr. 6.11: Porovnání skutečné výroby a predikce

Požadovanou vlastností prediktoru je jeho nestrannost, tedy že průměrná chyba predikce se blíží nule. Na Obr. 6.12 jsou znázorněny denní diagramy středních hodnot chyb predikcí pro očekávané hodnoty, a to jak pro krajní meze intervalů oblačnosti a jejich vážený průměr. Střední hodnota chyby predikce vyrobené elektrické energie vzniklé z váženého průměru oblačností se blíží k nule, a tedy je možné tuto predikci považovat za nestrannou. Přesnost prediktoru je možné hodnotit pomocí směrodatné odchylky chyby predikce. Ta je



(a) Denní diagram chyby predikce

(b) Směrodatná odchylka chyby predikce

Obr. 6.12: Chyby predikce

zobrazena na Obr. 6.12. V poledních hodinách je hodnota směrodatné odchylky nejvyšší a dosahuje cca 18 % instalovaného výkonu, což lze považovat za přijatelný výsledek.

6.8 Využití naměřených dat oblačnosti jako vstup prediktoru

Dalším možným přístupem ke krátkodobé predikci je uvažování skutečnosti, že oblačnost v čase t může být s určitou pravděpodobností stejná jako v následující hodině. Neboli prediktor nebude využívat hodnoty předpovídané oblačnosti, ale hodnoty poslední měřené oblačnosti z dané hodiny. Formálně lze takto pojatý prediktor pro jednu FVE či oblast popsat následujícím vztahem:

$$P_{FVE}(t + \Delta t) = DD_{REF}(t + \Delta t)k_{OBL}(t) \quad (6.9)$$

Kde:

$P_{FVE}(t + \Delta t)$ - predikce jako očekávaná hodnota vyrobené elektřiny z FVE určená v čase t pro čas $(t + \Delta t)$

$DD_{REF}(t + \Delta t)$ - vypočtený denní diagram pro jasnou oblohu pro čas $(t + \Delta t)$ z kapitoly 6.4

$k_{OBL}(t)$ - korekční koeficient pro naměřenou oblačnost z poslední hodiny Δt - 1 až 60 minut

Uvedený prediktor byl opět laděn na datech z roku 2011. Takto postavený prediktor se liší od prediktoru v kapitole 6 vstupem oblačnosti a jeho formální zápis reflektuje použití jen koeficientu zahrnující vliv oblačnosti. Proto ve vztahu nejsou koeficienty týkající se dvou oblačností.

Chybu měření je pak možné vyhodnotit dle následujícího vztahu, který je stejný jako u prediktoru využívající data předpovídané oblačnosti:

$$\Delta P_{FVE-METEOmerene}(t + \Delta t) = P_{FVE-namerene}(t + \Delta t) - P_{FVE-predikovane}(t + \Delta t) \quad (6.10)$$

Kde:

$\Delta P_{FVE-METEOmerene}(t + \Delta t)$ - chyba predikce v čase $t + \Delta t$

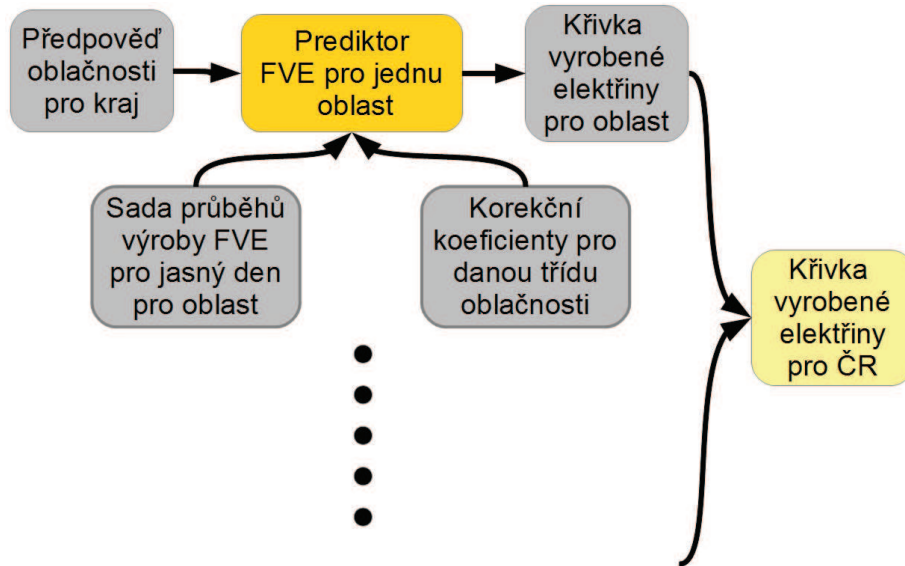
$P_{FVE-namerene}(t + \Delta t)$ - hodinový průměr vyrobené elektřiny z FVE

$P_{FVE-predikovane}(t + \Delta t)$ - očekávaná hodnota vyrobené elektřiny z FVE

Takto postavený prediktor bude poté testován na datech z roku 2012 v následující kapitole. Principiálně může být využit samozřejmě využit pro predikci výroby elektřiny z jedné FVE.

7 Prediktor výroby elektřiny z FVE pro celou ČR

Hlavním cílem této práce je vytvoření prediktoru výroby elektřiny ze všech FVE v ČR. Základem pro tento prediktor je metodika uvedená v předcházející kapitole s několika rozdíly, které budou dále popsány. Schématické znázornění prediktoru je znázorněno na Obr. 7.1, z kterého je patrné, že výsledná křivka vyrobené elektřiny za celou ČR je tvořen součtem dílčích křivek za jednotlivé oblasti.



Obr. 7.1: Prediktor FVE pro celou ČR

7.1 Metodika výpočtu

Prediktor výroby elektřiny pro celou ČR je sestaven z několika částí. Prediktor je tvořen součty predikcí pro jednotlivé oblasti. Toto lze matematicky zapsat pomocí následujících vztahů, které jsou v podstatě identické jako pro prediktor pro jednu FVE. Liší se jen ve způsobu výpočtu DD_{oblast} .

$$P_{FVE_{oblast}}(t + \Delta t) = DD_{FVE_{oblast}}(t + \Delta)(k_1 k_{OBL}(O_1) + k_2 k_{OBL}(O_2)) \quad (7.1)$$

Tento vztah platí pro každou oblast v ČR, přičemž jejich seznam je uveden v kapitole 4.2 a výsledný prediktor je pak tvořen součtem dílčích predikcí pro jednotlivé oblasti. Neboli:

$$P_{FVE-CR}(t + \Delta t) = P_{FVE-CEZ-zapad}(t) + \dots + P_{FVE-E.ON.-zapad}(t) \quad (7.2)$$

Metodika výpočtu denních digramů pro jasnou oblohu a sad koeficientů pro všechny třídy oblačnosti je odlišná od výpočtu pro jednu elektrárnu. Pokud bychom měli k dispozici naměřené hodnoty pro dílčí elektrárny v dané oblasti, bylo by možno použít postup uvedený v předchozí kapitole a pro určení výroby elektřiny v oblasti by stačilo sečíst výroby

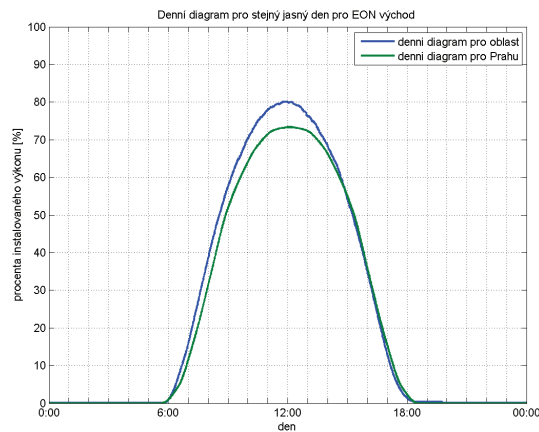
z jednotlivých elektráren. Nicméně hodnoty dílčích výrob nejsou k dispozici, je však možno získat souhrnné hodnoty výroby elektřiny.

Proto byl zvolen následující postup, který využívá vypočtené denní digramy pro jasnou oblohu z referenční elektrárny DD_{REF} z kapitoly 6 a má za cíl najít takové koeficienty, které přepočtou denní digramy referenční elektrárny na denní digramy oblastí. Tímto získáme pro každou oblast sadu denních digramů pro jasnou oblohu a poté již můžeme stejným způsobem jako v kapitole 6.5 určit korekční koeficienty pro všechny třídy oblačnosti. Celou metodiku lze tedy shrnout do následujících bodů:

- Vyhledání slunečních dní v datech z každé oblasti
- Pomocí výpočtu koeficientů přepočíst DD_{REF} na DD_{oblast}
- Očistit data od vlivu kalendáře (normování dat) - podíl naměřených dat vůči DD_{oblast}
- Stanovení zástupného místa oblasti pro stanovení korekčních koeficientů oblačnosti
- Stanovit chybu predikce pro všechny oblasti
- Součet denních digramů ze všech oblastí a definice chyb predikce pro celou ČR

7.2 Přepočet DD_{REF} na DD_{oblast}

Na Obr. 7.2 je patrné srovnání DD_{REF} s denním diagramem oblasti pro stejný jasný den. Denní diagram referenční elektrárny je posunut ve směru osy x i y, méně je zde také patrné



Obr. 7.2: Porovnání denního diagramu pro referenční elektrárnu a pro oblast. Rozdílná šířka tohoto diagramu vůči referenčnímu (na Obr. 7.2 označen jako denní diagram pro Prahu). Z tohoto tedy plyne potřeba určení tří koeficientů, které korigují denní diagram referenční elektrárny vůči diagramu oblasti a ty jsou:

- Koeficient korekce středu k_s
- Koeficient korekce maximálního výkonu k_{max}

- Koeficient východu a západu slunce k_{vz}

Výpočet těchto koeficientů je nutno provést postupně. Nejprve je nutno korigovat střed diagramů, neboli posunout celý diagram tak, aby oba diagramy byly vůči sobě symetrické. Dále je možné vypočítat korekci maxima, čímž se diagram posune ve směru osy y a poslední korekcí je úprava šířky diagramu. Postup výpočtu jednotlivých koeficientů je pak uveden dále.

7.2.1 Stanovení korekce středu denního diagramu

Korekce středu spočívá v posunu celého denního diagramu referenční elektrárny ve směru osy x vůči dennímu diagramu oblasti. Předpokladem pro výpočet tohoto koeficientu je vyhledání slunečních dní z oblastí a jejich porovnání s vypočtenými denními diagramy referenční elektrárny.

Vlastní výpočet pak probíhal tak, že byly spočítány rozdíly x souřadnic bodů pro stejné výkony na obou křivkách v první i druhé polovině dne. Neboli pro první polovinu dne byly z grafu odečteny souřadnice x_{v-REF} a $x_{v-oblast}$ pro čtyři hodnoty instalovaného výkonu, konkrétně pro výkony 10% až 40%. Pro druhou polovinu dne byly odečtené hodnoty ve stejných výkonech a byly označeny jako x_{z-REF} a $x_{z-oblast}$. Počet těchto hodnot byl zvolen experimentálně tak, aby bylo možno provést výpočet pro všechny slunečné dny pro všechny oblasti. Pro některé sluneční dny v zimních měsících se mohlo stát, že hodnota výkonu byla menší než 50 % instalovaného výkonu. Vlastní výpočet koeficientu posunutí středu je pak možno popsat následující rovnicí.

$$rozdil_vychod = x_{v-REF}(i) - x_{v-oblast}(i) \quad (7.3)$$

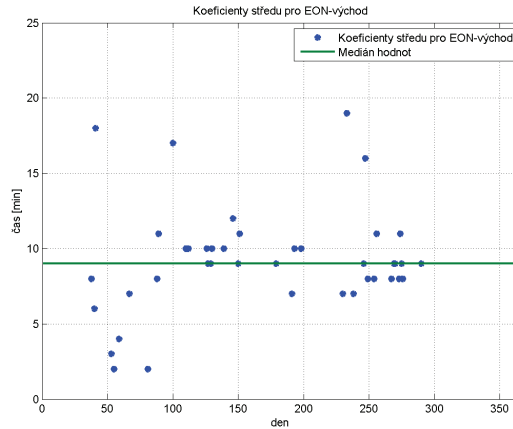
$$rozdil_zapad = x_{z-REF}(i) - x_{z-oblast}(i) \quad (7.4)$$

$$k_s = round \left(median \frac{rozdil_vychod - rozdil_zapad}{2} \right) [\text{min}] \quad (7.5)$$

Kde:

$$i = 10\% \div 40\% \text{ instalovaného výkonu}$$

Na obrázku 7.3 je patrný průběh koeficientu středu pro celý rok pro oblast E.ON.-východ. Je možné předpokládat, že tento koeficient bude v průběhu roku stejný a bude udávat, o kolik minut je posunut diagram vůči referenční elektrárně. Proto byl z jednotlivých koeficientů vypočten medián, který je pro tuto konkrétní oblast 9 minut. Korekce středů ostatních oblastí jsou pak uvedeny v tabulce A.3 příloze A.3. Záporná hodnota v tabulce udává, že je diagram oblasti posunut doleva vůči Praze. Podle předpokladů je posun diagramu oblasti ČEZ - střed 0 minut, protože referenční elektrárna leží v této oblasti, dále pak posun diagramu ČEZ Západ je na opačnou stranu, a to + 4 minuty vůči Praze.



Obr. 7.3: Koeficient středu pro E.ON.-východ

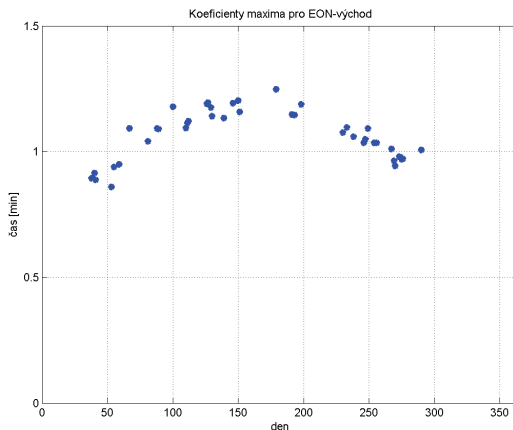
7.2.2 Stanovení koeficientu maximálního výkonu

Po korekci středu diagramu je možno určit koeficient maxima. Ten byl stanoven jako medián podílu obou diagramů okolo poledne. Neboli:

$$k_{max} = median \left(\frac{DD_{REF}(t)}{DD_{oblast}(t_1 - t_2)} \right) \quad (7.6)$$

Kde:

$DD_{REF}(t)$ Hodnoty denního referenční elektrárny pro hodnoty okolo poledne, kde t odpovídá rozsahu od 660 do 780 minuty.

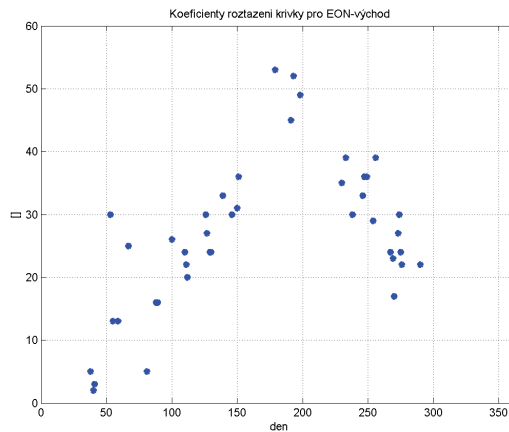


Obr. 7.4: Koeficient maxima pro E.ON.-východ

Na Obr. 7.4 je patrný průběh korekce maxima opět pro E.ON.-východ. Hodnoty koeficientu byly proloženy hladkou křivkou a tím vznikla sada korekčních koeficientů pro každý den v roce.

7.2.3 Stanovení korekce východu a západu

Po aplikaci předcházejících dvou koeficientů na DD_{REF} je možno stanovit koeficient, který upraví šířku diagramu. Z možných variant jeho výpočtu byla vybrána možnost posunu x souřadnic východu a západu slunce ještě před tvorbou DD_{REF} . Neboli prodloužíme čas mezi východem a západem slunce a tím se jednotlivé body, které tvoří DD_{REF} posunou po křivce a umožní roztažení křivky denního diagramu. Algoritmus navržený pro tento výpočet hledal takový posun času východu a západu slunce, aby rozdíl mezi oběma křivkami v několika výkonových hladinách byl minimální. Na Obr. 7.5 jsou znázorněny koeficienty pro slunné dny oblasti. Hodnoty koeficientu byly stejně jako koeficient maxima proloženy interpolační křivkou a tím vznikla sada korekčních koeficientů pro každý den v roce. Je zde také nutno podotknout, že hodnoty na ose y nevyjadřují posun v minutách. Závěrem

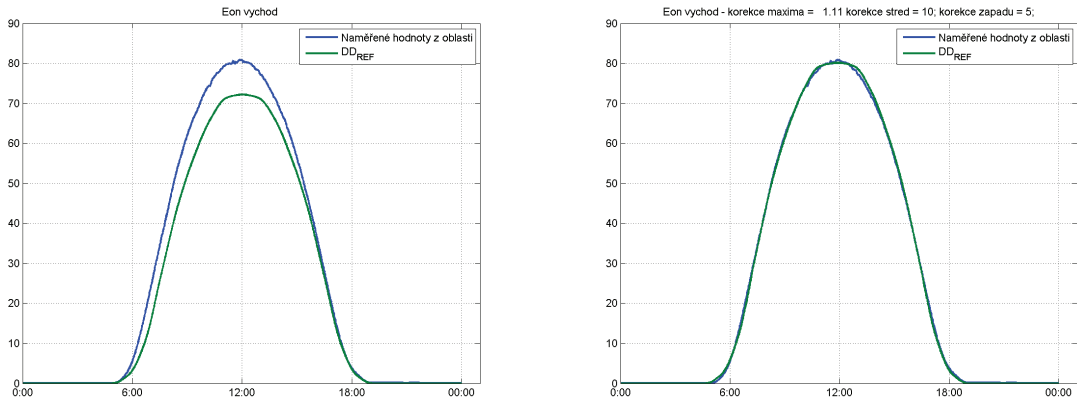


Obr. 7.5: Koeficient roztažení křivky

k těmto korekcím je vhodné uvést srovnání původních a nekorigovaných dat po aplikaci všech tří korekcí, což znázorňuje Obr. 7.6. V tomto konkrétním případě se jedná o digram $DD_{FVE-E.ON.-vychod}$, přičemž korekce středu byla 10, korekce maximálního výkonu 1,11 a korekce východu a západu 5. Z Obr. 7.6 je patrná dobrá shoda křivek. Je zde však nutno podotknout, že takto dobrá shoda je výsledkem výpočtu všech tří koeficientů pro konkrétní jasný den. Abychom získali korekce pro celý rok, byly hodnoty koeficientů prokládány křivkou, čímž mohlo dojít k drobným chybám. Proklání koeficientů bylo nezbytné, protože slunečních dní, ze kterých byly koeficienty počítány, bylo v datech malé množství.

7.3 Tvorba denních diagramů pro jednotlivé oblasti

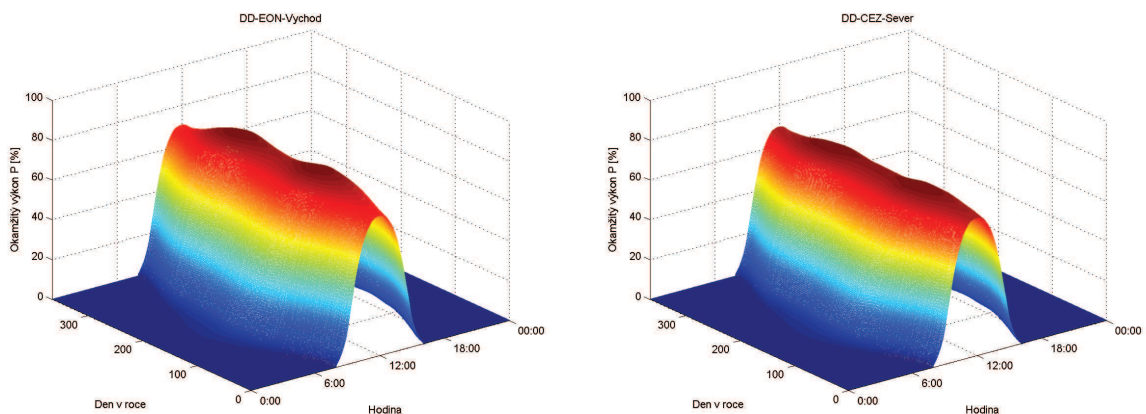
Po aplikaci všech tří korekcí na DD_{REF} je možno vytvořit pro každou oblast sadu denních diagramů pro jasný den DD_{oblast} . Na Obr. 7.7 jsou vyobrazeny DD_{oblast} pro oblast E.ON.-Východ a CEZ-Sever. Záměrně jsem vybral tyto dva vypočtené denní diagramy oblastí, protože jsou mezi nimi poměrně dobře patrné rozdíly. Konkrétně tedy v maximálních hodnotách výkonů, které jsou pro E.ON.-Východ vyšší a dále taky ve větším poklesu výkonu



(a) Srovnání naměřených hodnot s DD_{REF} (b) Srovnání korigovaného DD_{REF} s naměřenými hodnotami

Obr. 7.6: Srovnání denních diagramů před a po korekcích

v letních měsících, což je způsobeno vyšší teplotou panelu. Ostatní denní digramy jsou poté uvedeny v příloze A.5.



(a) $DD_{E.ON.-Vychod}$

(b) $DD_{CEZ-Sever}$

Obr. 7.7: Vypočtené DD_{oblast}

7.3.1 Volba zástupného místa oblasti

Při stanovení korekčních koeficientů pro jednotlivé třídy oblačnosti v kapitole 6.6 byly použity měřené hodnoty oblačnosti z blízké meteostanice. Tato metoda nelze však použít pro oblast, protože v ní je více meteostanic. Je zde tedy otázkou, z jaké meteostanice je možno použít data, protože naměřené hodnoty výkonů jsou brány za celou oblast, ale měřená oblačnost je dostupná pouze pro jedno místo, případně více míst v oblasti. Je tedy nutno stanovit metodiku určení vhodné zástupné lokality pro oblast, která potom bude sloužit pro určení koeficientů pro jednotlivé třídy oblačnosti.

Toto bylo vyřešeno tak, že byly nejdříve vybrány meteostanice patřící do jednotlivých krajů a postupně byla počítána chyba predikce při použití všech meteostanic v oblasti. Jako zástupné místo oblasti byla poté zvolena meteostanice na základě chyby predikce. Z těchto hodnot byla určena jedna hodnota pro každou meteostanici:

$$\sum_t |\text{chyba predikce}(t)| \quad (7.7)$$

Kde:

t - čas

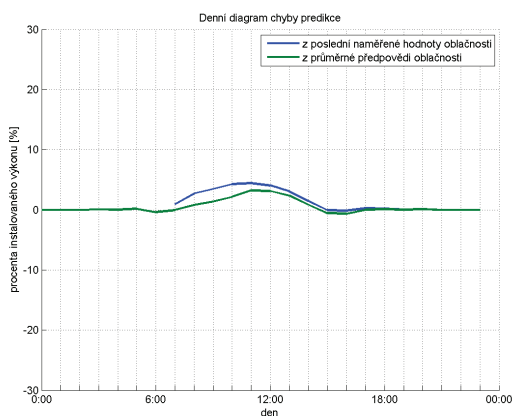
Výsledkem bylo jedno číslo pro každou meteostanici, přičemž z nich byla vybrána ta, kde hodnota byla nejmenší.

Zastoupení jednotlivých meteostanic spolu s jejich rozdělením do krajů je poté uvedeno v tabulce (viz. Tab: A.2), která je pro svou velikost uvedena v příloze A.4.

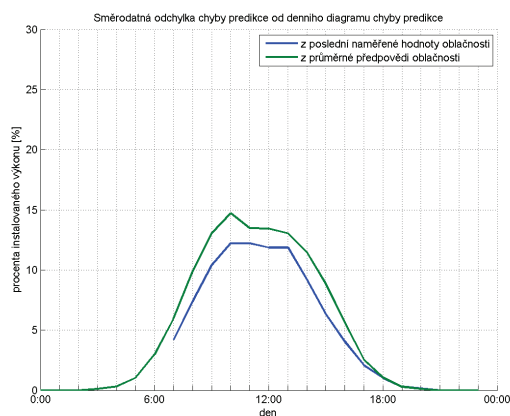
7.4 Testování prediktoru a definice chyb

Posledním krokem při tvorbě prediktoru je sečtení všech predikovaných výkonů ze všech oblastí a stanovení chyb.

Chyba predikce je definována stejným způsobem jako u prediktoru pro jednu FVE a je tedy i stejně hodnocena. Neboli, hodnotícím kritériem pro kvalitu prediktoru je střední hodnota chyby predikce, jejíž denní průběh je znázorněn na Obr. 7.8(a). Maximální hodnota této chyby vychází při použití váženého průměru předpovědí 4 %. Maximální hodnota směrodatné odchylky, která je znázorněna na Obr. 7.8(b) vychází přibližně 15 % což je méně než v případě prediktoru pro jednu fotovoltaickou elektrárnu.



(a) Denní diagram chyby predikce



(b) Směrodatná odchylka chyby predikce

Obr. 7.8: Chyby predikce pro celou ČR

8 Závěr

Jedním z cílů této práce bylo popsat stav liberalizované energetiky v České republice spolu se subjekty, které zde působí.

V současné době je energetika plně liberalizována. Je umožněn přístup třetích stran k sítím za regulované ceny. Obchodovatelnými komoditami je silová elektřina a elektřina ve formě podpůrných služeb. Na základě energetického zákona je povinen provozovatel přenosové soustavy řídit soustavu a zajišťovat tzv. systémové služby, přičemž jejich realizaci zajišťuje právě nákupem podpůrných služeb, či elektřiny ve formě podpůrných služeb. Silová elektřina je obchodovatelnou komoditou na burze a její cena závisí na aktuální situaci trhu. Koncový spotřebitel poté platí vyjma ceny za silovou elektřinu i další poplatky. Jedná se o regulovanou část ceny za elektřinu, která se skládá z ceny za distribuci, přenos a další části. Podstatnou položkou ceny je také příspěvek na podporu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, který v současnosti prudce roste. Tento nárůst je způsoben masivním rozvojem výstavby fotovoltaických elektráren, které byly formou výkupních cen a jejich garancí dotovány.

Proto je cílem třetí kapitoly propojit problematiku obchodování s elektřinou s problematikou rozvoje fotovoltaických elektráren. Jsou v ní uvedeny důvody a dopady rozvoje fotovoltaiky v České republice v posledních několika letech spolu s představením přírodních podmínek instalace těchto elektráren v České republice. Právě díky tomuto rozmachu nastává otázka, jak určit budoucí vyráběné množství elektřiny z těchto zdrojů.

V návaznosti na třetí kapitolu jsou poté v kapitole čtyři představena použitá data spolu s jejich základní analýzou, které poté budou sloužit jako základ pro prediktor. Jsou zde analyzovány závislosti výkonu fotovoltaické elektrárny na osvitu, oblačnosti a teplotě.

Náplní kapitoly pět je přehled metod používaných v současnosti pro predikci, přičemž vybrané jsou testovány. Je zde uveden matematický model fotovoltaického článku spolu s jeho softwarovou implementací a ověření jeho funkčnosti na reálných datech. Výsledky simulací jsou také porovnány s výstupy z neuronové sítě, která byla také testována.

Kapitola šest se poté zabývá návrhem prediktoru pro jednu fotovoltaickou elektrárnu, který na základě dat oblačnosti dokáže určit budoucí vyráběné množství elektřiny z tohoto zdroje. Je založen na nově navrženém způsobu výpočtu sady denních diagramů pro jasnou oblohu pro každý den v roce a způsobů stanovení přepočítávacích koeficientů zohledňující vliv oblačnosti. Hodnotit tento prediktor lze na základě chyby predikce, která byla stanovena jako rozdíl skutečně naměřených výkonů a predikovaných hodnot. Její střední hodnota je pak přibližně 3 % instalovaného výkonu, což je přijatelné hodnota. Směrodatná odchylka pak dosahuje v poledních hodnotách přibližně 18 % instalovaného výkonu.

Náplní sedmé kapitoly je rozšíření prediktoru pro jednu fotovoltaickou elektrárnu na celou Českou republiku, kdy je jako základ využita metodika uvedená v kapitole šest. Při vyhodnocení chyby predikce, definované stejně jako pro jednu elektrárnu, vychází střední hodnoty chyby predikce přibližně 4 % instalovaného výkonu a směrodatná odchylka chyby

predikce dosahuje v poledních hodnotách přibližně 15 % instalovaného výkonu, což je přijatelná hodnota.

Hlavní cíle práce, tedy přehled principů fungování liberalizovaného trhu, návrh, softwarová realizace a otestování prediktoru, lze považovat za splněné.

8.1 Další směr výzkumu

V současnosti probíhá poměrně intenzivní výzkum v oblasti prediktorů výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Tento zájem je zapříčiněn celospolečenskou snahou o zvyšování využívání obnovitelných zdrojů, které spolu nese určité problémy či výzvy k řešení. Proto ani navržené prediktory v této práci nelze považovat za kompletně dokončené. Vždy je možné je dále vylepšovat a rozvíjet.

Poměrně velký prostor je při využití jiných zdrojů dat oblačnosti, což je náplní kapitoly 4.4.

Další možností vylepšení je ladění prediktoru na datech výroby za delší časové období.

Navržené prediktory zohledňují vliv teploty na výkon FVE pomocí vypočtených denních digramů, kde je na diagramech dobře patrný pokles výkonu v letních měsících. Díky vyšší teplotě panelů klesá účinnost FVE. Aby bylo možné zahrnout teplotu panelu jako vstup prediktoru, bylo by nutné vytvořit komplexní teplotní model teploty panelu, který by využíval nejenom předpovídané hodnoty teploty, ale také rychlost, směr větru a také srážky. Naskýtá se zde možnost využít data z referenční elektrárny, nicméně v tomto případě se jedná o střešní instalaci, která je umístěna ve městě. Naproti tomu většina velkých FVE je umístěna na polích.

8.2 Vlastní přínos práce

V úvodní části práce je definován a rozebrán současný stav liberalizované energetiky v České republice, kde jsou popsány jednotlivé subjekty a vztahy mezi nimi. V této kapitole je také popsána používaná metodika predikce spotřeby. Vlastní přínos této části patří v rešeršním způsobu zpracování této problematiky, která pak slouží jako výchozí pro další práci.

Další částí práce, která navazuje na problematiku výrobců elektřiny v liberalizované energetice, je problematika prudkého rozvoje výstavby nových FVE, která spolu přináší určité problémy či otázky. Jedním z problémů, které sebou jejich rozvoj přinesl, je potřeba určení budoucího vyráběného množství, přičemž tato informace je důležitá pro více subjektů v energetice. Proto je další částí disertační práce analýza fungování fotovoltaických elektráren spolu s analýzou současně využívaných technik a metod týkajících se predikce spolu s návrhem prediktoru pro jednu FVE a následně pro celou Českou republiku. Za vlastní přínos práce je možné považovat analýzu vstupních dat spolu s rešeršním způsobem zpracované problematiky predikce a především softwarovou realizaci prediktorů výroby

elektřiny z FVE pro jednu FVE i pro celou Českou republiku spolu s definicí chyb.

Dále bych zmínil metodiku vypočtení sady denních diagramů pro jasný den, která je unikátní. Je založena na výpočtu denních diagramů z naměřených dat napříč celým rokem, při využití časů východů a západů slunce pro konkrétní elektrárnu. V žádné jiné studované práci stejný způsob uveden není.

Hlavní výstup práce je možnost, pomocí navržených algoritmů na základě dostupné předpovědi oblačnosti (nebo poslední měřené hodnoty), určit budoucí vyráběné množství elektřiny ze všech fotovoltaických elektráren v celé České republice. Konkrétně tedy pro každou hodinu v roce se střední hodnotou chyby predikce okolo 4 % instalovaného výkonu a směrodatnou odchylkou nepřesahující v poledních hodnotách 15 %.

9 Resume

This thesis dealt with the prediction of generated electricity in liberalized environment. At the beginning of this thesis the background of the liberalized electricity market is defined. There is shown the relationship between all participants of electricity market.

The most important change in the energy sector was the massive development of new installed photovoltaic power plants. For this reason, the conditions of the massive development were introduced in the third chapter. There is an important question about prediction of generated electricity from this type of sources because this information is important for several market participants and for controlling of the energy sector. Therefore, the fourth chapter deals with the analysis of necessary data which was used for the design of the generated electricity predictor.

The fifth chapter presents the possibilities of the generated electricity prediction from photovoltaic power plants and the predictor was designed from this background.

The main goal of this work was to design the generated electricity predictor from photovoltaics based on available cloudiness data. For this reason, the sixth chapter contains the complete design and testing of the predictor for one photovoltaic power plant. The seventh chapter presents the update of the designed predictor for the whole Czech Republic.

For the predictor validation, the errors were defined as the differences between real and predicted values. The mean value of the predictor for the whole Czech Republic was 4 % of installed power and the maximum value of daily standard deviation progress was 15 % of installed power.

Reference

- [1] CHEMIŠINEC, I. *Obchod s elektřinou*. Conte, 1. vyd. Praha: Conte, c2010, 201 s. ISBN 978-80-254-6695-7.
- [2] *Webové stránky Energetického regulačního úřadu*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/>.
- [3] *Webové stránky Operátora trhu s elektřinou*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/>.
- [4] KNÁRA, J. *Ceny a rizika při dodávce elektřiny pro konečné zákazníky*. Západočeská univerzita, 2008.
- [5] *Webové stránky Energotherm*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.energotherm.cz/>.
- [6] *Neuronové sítě*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: www.cs.cas.cz/pklan/CHI7.pdf.
- [7] *Neural Network Toolbox*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/neural-network/>.
- [8] *Internetové stránky společnosti Taures*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.taures.cz/>.
- [9] Kolektiv autorů. *Trh s elektřinou - Úvod do liberalizované energetiky*.
- [10] *Pravidla provozování distribuční soustavy*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds2012.html>.
- [11] *Webové stránky ČEPS*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Stranky/default.aspx>.
- [12] BOHATÝ, M. *Zhodnocení stavu liberalizace trhu s elektřinou v ČR k roku 2006 a postavení nezávislého obchodníka s elektřinou*. Diplomová práce, ZČU Plzeň, 2011.
- [13] *Vyhláška č. 218/2001 Sb.* [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=218&r=2001>.
- [14] *Vyhláška č. 82/2011 Sb.* [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=82&r=2011>.
- [15] *Webové stránky PXE*. [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://www.pxe.cz/>.

- [16] *Webové stránky TZB-info.* [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9698-byly-vykupni-ceny-elektriny-z-fotovoltaiky-stanoveny-primerene>.
- [17] LIN, M., WANG Z., Yang L., CHEN, M., MENG, F. Power prediction model of grid-connected photovoltaic and power flow analysis. In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific*, pages 1–4, 2012.
- [18] HOSODA, Y., NAMERIAKWA, T. Short-term photovoltaic prediction; filtering and clustering. In *SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of*, pages 119–124, 2012.
- [19] LORENTZ E., HURKA, J., HEINEMANN, D., BEYER, H.G. Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems. volume 2, pages 2–10, march 2009.
- [20] WANG, Z., SU, S., ZHANG, S. The application of photovoltaic power prediction technology. In *Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on*, pages 2343–2346, sept. 2011.
- [21] ERNST, B., REYER, F., VANZETTA, J. Wind power and photovoltaic prediction tools for balancing and grid operation. In *Integration of Wide-Scale Renewable Resources Into the Power Delivery System, 2009 CIGRE/IEEE PES Joint Symposium*, pages 1–9, july 2009.
- [22] *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS).* [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
- [23] *Skripta statistika.* [online]. [cit. 2013-06-07]. Dostupné z: <http://fzp.ujep.cz/~synek/statistika/skripta/CasRad3.doc>.
- [24] WAGNER, P. *Analýza časové řady dle vlastního výběru.* 2009.
- [25] NOVÁK, M., kol. *Umělé neuronové sítě, teorie a aplikace.* C. H. Beck, Praha, 1998.
- [26] CHALUPNÍK, V. *Biologické algoritmy (4) - Neuronové sítě.* [online]. [cit. 2013-05-31]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/biologicke-algoritmy-4-neuronove-site/>.
- [27] SOUKUP, M. *Řízení provozu mikro-sítí napájených OZE, Diplomová práce, FEL ZČU Plzeň, 2006.* ZČU Plzeň, 2006.
- [28] KUPKA, K. *Statistické řízení jakosti: interaktivní analýza a interpretace dat pro řízení jakosti a ekonomiku.* Pardubice : TriloByte, 1997.

Vlastní publikace

- [29] MAJER, V. *Predikce spotřeby pro obchodování s elektřinou*. ZČU, 2011.
- [30] MAJER, V. Preparing and analysis of electricity consumption data for short term prediction. *In Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts I*, BEN - technická literatura, 2011, s. 63-66. ISBN: 978-80-7300-417-0.
- [31] MAJER, V. System and ancillary services. Plzeň, 2010., ISBN: 978-80-7043-893-0.
- [32] MAJER, V. Simulace napěťového kolapsu s využitím knihovny simpowersystems programu simulink. *Elektrotechnika a informatika 2010. Část 3., Elektroenergetika.*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. s. 49-52. ISBN: 978-80-7043-915-9.
- [33] MAJER, V. Preparing and analysis of electricity consumption data for short term prediction. *Renewable Energy Sources 2011*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 134-137. ISBN: 978-80-261-0010-2.
- [34] MAJER, V. Predikce spotřeby pro obchodování s elektřinou. *Elektrotechnika a informatika 2011. Část třetí. Elektroenergetika.*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 39-42. ISBN: 978-80-261-0017-1.
- [35] MAJER, V. Analýza trhu s elektřinou v ČR. in. *Elektrotechnika a informatika 2008. Část 3., Elektroenergetika*, V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. s. 55-58. ISBN: 978-80-7043-703-2.
- [36] MAJER, V. Trh s elektřinou v liberalizovaném prostředí. *Elektrotechnika a informatika 2009. Část 3., Elektroenergetika.*, V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. s. 53-56. ISBN: 978-80-7043-811-4.
- [37] MAJER, V., ZÁPOTOCKÁ, A., JANEČEK P. Predikce výroby elektřiny z fotovoltaické elektrárny na základě dostupné předpovědi oblačnosti. *In Proceedings of the 14th International Scientific Conference – Electric Power Engineering 2013*, Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. s. 143-148. ISBN 978-80-248-2988-3.
- [38] MAJER, V., NOVÝ, F., and HEJTMÁNKOVÁ, P. Vliv cen ropy na cenu elektrické energie v České republice. *In Proceedings of Abstracts of the 11th International Scientific Conference EEE 2012: Energy - Ecology - Economy*, Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. s. 1-7. ISBN: 978-80-89402-49-6.
- [39] MAJER, V., MEZERA, J. Prediction possibilities of electricity production from photovoltaic systems. *In Proceedings of the 13th International Scientific Conference – Electric Power Engineering 2012*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 481-484. ISBN: 978-80-214-4514-7.

- [40] MAJER, V., MEZERA J., KRÁLOVCOVÁ, V., MARTÍNEK, Z. The nonlinear model by using neural networks for day-ahead price forecasting. *Proceedings of the 13th International Scientific Conference – Electric Power Engineering 2012*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. s. 239-242. ISBN: 978-80-214-4514-7.
- [41] MAJER, V., MÜHLBACHER, J. Soil protection in the context of electricity and heat generation. *In Tagungsband*, Marktredwitz: Stadt Marktredwitz, 2012. s. 49-53., ISSN: 1439-0175.
- [42] MAJER, V., HEJTMÁNKOVÁ, P. Získání dat pro krátkodobou predikci výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren. *In Proceedings of the 11th International Scientific Conference EEE 2012*, Tatranské Maltiare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. s. 1-4. ISBN: 978-80-89402-49-6.
- [43] MAJER, V., HEJTMÁNKOVÁ, P., JANEČEK, P. Predikce výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren pro vybranou oblast v ČR. *In Proceedings of Abstracts of the 11th International Scientific Conference EEE 2013: OZE*, 2013.
- [44] MAJER, V., ŠANTÍN, V. Rychlá kompenzace jalového výkonu. *In Elektrotechnika a informatika 2012 - část třetí - elektroenergetika*. Plzeň, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 35-38. ISBN: 978-80-261-0121-5.
- [45] MAJER, V., ŠANTÍN, V., HEJTMÁNKOVÁ, P. Simulation of voltage collapse in matlab program with use of simulink tool and simpowersystems library. *Proceedings of the 12th International Scientific Conference – Electric Power Engineering 2011*, Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 327-330. ISBN: 978-80-248-2393-5.
- [46] MAJER, V., SCHUFFT, W. Comparison of german and czech energetic sector in the field of res. *In Proceedings of the Intensive Programme Renewable Energy Sources 2012*, Plzeň: Západočeská univerzita, 2012. s. 5-10. ISBN: 978-80-261-0130-7.

A Přílohy

A.1 Ukázka dat z FEL-CVUT

Datum;Čas;Energie;Energie A;Energie B;Energie C;UA;UB;UC;IA;IB;IC;Pac;Tep;Ir
2011-07-01;00:00:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,7;0,
2011-07-01;00:01:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,6;0,
2011-07-01;00:02:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,7;0,
2011-07-01;00:03:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,7;0,
2011-07-01;00:04:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,7;0,
2011-07-01;00:05:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,4;0,
2011-07-01;00:06:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,6;0,
2011-07-01;00:07:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,4;0,
2011-07-01;00:08:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,5;0,
2011-07-01;00:09:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,6;0,
2011-07-01;00:10:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,3;0,
2011-07-01;00:11:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,4;0,
2011-07-01;00:12:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,2;0,
2011-07-01;00:13:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,3;0,
2011-07-01;00:14:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,2;0,
2011-07-01;00:15:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,3;0,
2011-07-01;00:16:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;11,9;0,
2011-07-01;00:17:00;26559,3;10784,,;10690,6;6868,13;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;0,,;12,1;0,

A.2 Ukázka předpovědi z webu CHMI

28.04.2013 Čas vydání: 05.45

PŘEDPOVĚĎ POČASÍ PRO PLZEŇSKÝ KRAJ

na neděli 28.04.2013

Aktuální počasí v~kraji dnes v~5 hod. ráno:

Zataženo, ojediněle déšť, na horách mlhy. Teploty 5 až 7

V okolních regionech:

Podobné počasí jako u~nás.

Předpověď na neděli

Situace:

Nad střední Evropou se bude nadále vlnit studená fronta oddělující studený vzduch na severozápadě od teplého na jihovýchodě.

Počasí (06-22):

Ráno zataženo, postupně oblačno. Ojediněle déšť nebo přeháňky.

Nejvyšší teploty 12 až 15 , na horách 8 až 11 C.

Mírný severní až severovýchodní vítr 2 až 5 m/s.

Rozptylové podmínky: dobré

ČHMÚ - Regionální předpovědní pracoviště Plzeň / Marta Suchá

=====

p-ČHMÚ Plzeň, 28.04.2013

PŘEDPOVĚĎ POČASÍ PRO PLZEŇSKÝ KRAJ

na pondělí 29.04. a úterý 30.04.2013

Situace:

Nad střední Evropou se bude nadále vlnit studená fronta oddělující studený vzduch na severozápadě od teplého na jihovýchodě.

Předpověď na pondělí (00-24):

Oblačno až zataženo, občas déšť nebo přeháňky.

Nejnižší noční teploty 9 až 6 , nejvyšší denní teploty 15 až 18 .

Mírný jihozápadní vítr 2 až 5 m/s.

Předpověď na úterý (00-24):

Zataženo až oblačno, občas déšť nebo přeháňky.

Nejnižší teploty 10 až 7, nejvyšší teploty 13 až 16.

Mírný severovýchodní vítr 2 až 5 m/s.

ČHMÚ - Regionální předpovědní pracoviště Plzeň / Marta Suchá

=====

p-ČHMÚ Plzeň, 27.04.2013

A.3 Korekce středů pro jednotlivé oblasti

Tab. A.1: Korekce středů pro jednotlivé oblasti

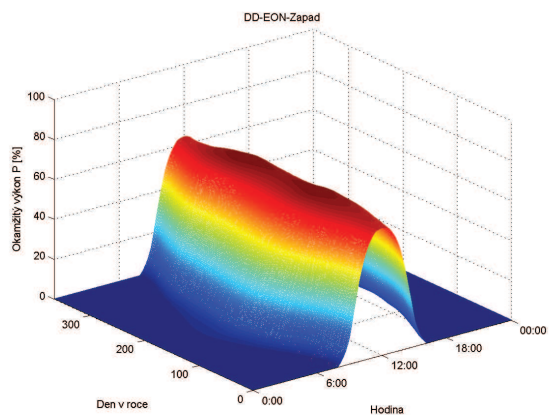
Oblast	Korekce středu [min]
E.ON. Východ	-9
E.ON. Západ	-4
ČEZ Morava	-13
ČEZ Sever	-9
ČEZ Střed	0
ČEZ Východ	-8
ČEZ Západ	3

A.4 Zastoupení jednotlivých meteostanic v rámci krajů a oblastí

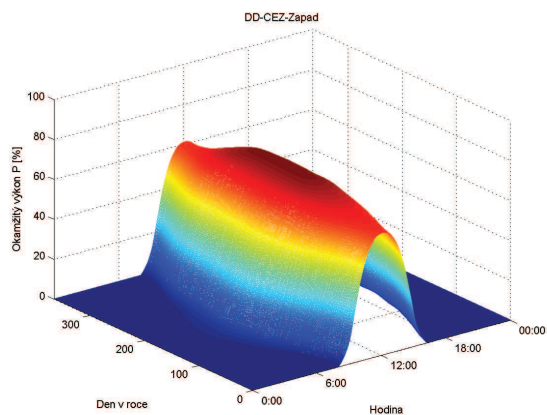
Tab. A.2: Data oblačnosti

Oblast	Kraj	Meteostanice
E.ON. Východ	Vysočina/Jihomoravský	Brno - Tuřany Kostelní Myslová Kuchařovice Holešov Dukovany
E.ON. Západ	Jihočeský	Temelín České Budějovice Kocelovice
ČEZ Morava	Olomoucký/Moravskoslezský	Šerák Luká Červená u Libavé Ostrava - Mošnov Přerov
ČEZ Sever	Ústecký/Liberecký	Liberec Milešovka Ústí nad Labem Doksany Tušimice
ČEZ Střed	Středočeský	Praha - Ruzyně Praha - Karlov Praha - Libuš Praha - Kbely
ČEZ Východ	Královéhradecký/Pardubický	Pardubice Polom Ústí nad Orlicí
ČEZ Západ	Karlovarský/Plzeňský	Cheb Karlovy Vary Přimda Plzeň - Mikulka

A.5 Příklad vypočtených DD_{oblast}

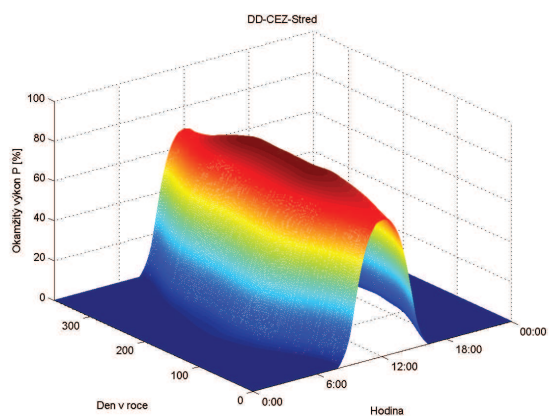


(a) $DD_{E.ON.-Zapad}$

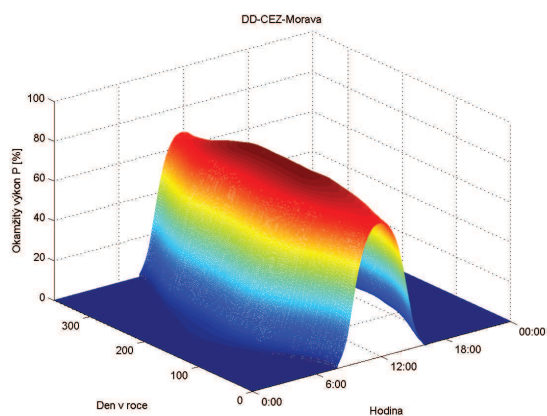


(b) $DD_{CEZ-Zapad}$

Obr. A.1: Vypočtené DD_{oblast}



(a) $DD_{CEZ-Stred}$



(b) $DD_{CEZ-Morava}$

Obr. A.2: Vypočtené DD_{oblast}