



národní  
úložiště  
šedé  
literatury

## **Detekce fotovoltaických zdrojů s nestandardním chováním**

Kasanický, Ivan  
2012

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-124502>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 07.07.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní [nusl.cz](http://www.nusl.cz) .

# Detekce fotovoltaických zdrojů s nestandardním chováním

doktorand:

MGR. IVAN KASANICKÝ

Ústav informatiky AV ČR, v. v. i.  
Pod Vodárenskou věží 2  
182 07 Praha 8

Matematicko-fyzikální fakulta  
Karlova univerzita  
Sokolovská 83  
186 75 Praha 8

kasanicky@cs.cas.cz

školitel:

RNDR. KRYŠTOF EBEN, CSc.

Ústav informatiky AV ČR, v. v. i.  
Pod Vodárenskou věží 2  
182 07 Praha 8

eben@cs.cas.cz

obor studia:

Pravděpodobnost a matematická statistika

## Abstrakt

Elektřina z fotovoltaických elektráren (FVE) patří mezi neregulované zdroje a proto musí být plně vyčerpána dříve než se začne využívat energie z ostatních (neobnovitelných) zdrojů. Pro úspěšné regulování distribuční sítě a trhu s elektřinou je tak potřeba v každé chvíli vědět co nejpřesněji, kolik energie fotovoltaické zdroje právě dodávají do sítě. Z různých důvodů však nejsou zdaleka všechny FVE osazeny dálkově odečítaným průběhovým měřením, a tak se celková výroba všech fotovoltaických zdrojů v ČR počítá pomocí extrapolace výroby měřených zdrojů.

Proto bylo v poslední době nutno pracovat na metodách identifikace případného netypického chování některé z měřených FVE, jako je například částečná odstávka elektrárny, aby mohla být tato informace zohledněna při výpočtu celkové výroby. Tento úkol je však ztížen faktem, že výroba FVE je určena intenzitou slunečního záření, oblačností a dalšími meteorologickými veličinami. Zejména sluneční záření a oblačnost přitom mají velkou volatilitu.

V příspěvku je představena jedna z možných metod detekce, založená na celkové denní výrobě. Dále je naznačen další směr výzkumu v této oblasti, který je zaměřen na detekci na základě funkcionálního vztahu mezi vyrobenou energií a celkovým slunečním zářením měřeným satelity nebo pozemními monitorovacími stanicemi.

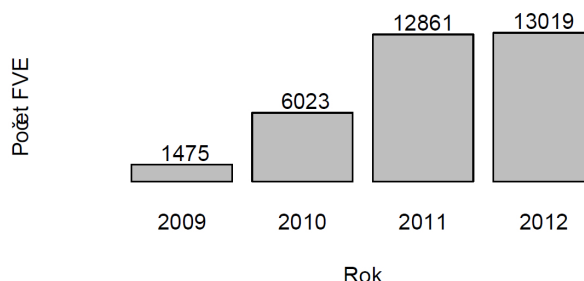
## 1. Úvod

V průběhu posledních let došlo v České republice a rovněž v téměř celé Evropě k velkému nárůstu počtu

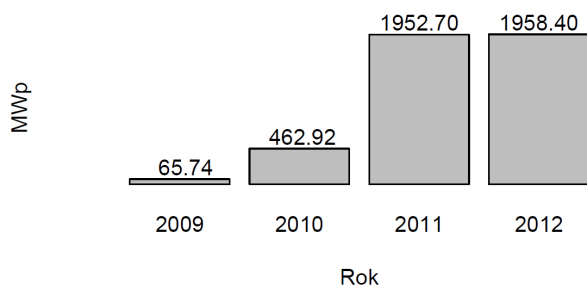
fotovoltaických elektráren. Tento nárůst měl dva hlavní důvody:

1. legislativní garance vysokých (dotovaných) výkupních cen elektřiny pocházející z obnovitelných zdrojů,
2. neustálé snižování cen fotovoltaických článků.

Zejména první důvod pak zapříčinil tzv. solární boom v letech 2009 a 2010, který je ilustrován na obrázcích 1 a 2. Tento boom se zastavil v roce 2011, kdy došlo k výraznému snížení výkupní ceny elektrické energie pocházející z obnovitelných zdrojů. Nicméně díky neustálému snižování ceny fotovoltaických panelů se objevuje stále více názorů, například v článku [2], že dojde k takzvané paritě s elektrickou sítí, tj. k vyrovnání (nedotované) ceny energie z FV systémů s cenou konvenčních energií. Při takovémto scénáři technologického a energetického vývoje lze samozřejmě očekávat další nárůst počtu a celkového instalovaného výkonu fotovoltaických zdrojů.



**Obrázek 1:** Celkový počet fotovoltaických elektráren s licencí na provoz v České republice k prvnímu dnu daného roku.



**Obrázek 2:** Součet instalovaných výkonů všech fotovoltaických zdrojů v České republice k prvnímu dnu daného roku.

Zvyšování podílu elektřiny vyrobené zejména fotovoltaickými zdroji má však řadu problémů, které vyplývají z vlastností těchto zdrojů. Fotovoltaické zdroje totiž tvoří neregulovaný systém a jejich výroba závisí především na obtížně predikovatelných meteorologických podmínkách. Okamžitý výkon jednotlivého zdroje je totiž určen především slunečním zářením a oblačností v dané lokalitě. Obě tyto veličiny pak v sobě obsahují značnou volatilitu, která činí predikci i odhad skutečné výroby jednotlivého zdroje ještě náročnější. Vysoký podíl energie z fotovoltaických zdrojů tak přináší zvýšené nároky na regulaci distribuční soustavy, která musí přenášet energii z vysoce volatilních zdrojů, jejichž výkon se v čase dramaticky mění. Dále přináší také vysoké nároky na řízení regulovaných zdrojů, tak aby byla udržována rovnováha mezi výrobou, spotřebou a ztrátami. V neposlední řadě jsou pak kladeny vysoké nároky na zajištění finančních toků, tak aby reflektovaly složitost systému obchodování s energií, který je určován a ovlivňován volným trhem s energií, povinností vykupovat obnovitelné zdroje energie, smlouvami o odběru a dodávkách a státními dotacemi na některé typy zdrojů.

Průběhově měřeny mohou být jen větší zdroje, zatímco velké množství malých zdrojů, umístěných typicky na střechách rodinných domů, průběhově měřeno není. Celkový výkon všech fotovoltaických zdrojů, potřebný pro vytváření bilancí, tak musí být odhadován jen z průběhově měřených zdrojů a z celkového instalovaného výkonu všech zdrojů. Proto je velmi důležité, aby byla data z průběhových měření kvalitní a aby odrážela typické chování všech FVE. Pro stanovení skutečné denní bilance je pak ještě potřeba detekovat případnou změnu chování jednotlivého zdroje ovlivňující množství vyrobené energie (například částečná či úplná odstávka elektrárny), aby mohla být tato informace zohledněna při výpočtu celkové bilance.

## 2. Popis vstupních dat

Pro účely této publikace byla k dispozici hodinová měření za rok 2011 ze 387 fotovoltaických elektráren, které představují necelých 40% celkového instalovaného výkonu v České republice.

Výroba jednotlivé farmy je popsána souborem veličin

$$\{Y_{idh}\}_{i,d,h}, \quad (1)$$

kde

$i$  je jednoznačný identifikátor zdroje ( $i = 1, \dots, 387$ ),

$d$  označuje den měření ( $d = 1, \dots, 365$ ) a

$h$  označuje hodinu měření ( $h = 0, \dots, 23$ ).

Zároveň pro každou farmu  $i$  máme k dispozici hodnotu instalovaného výkonu  $IV_i$ . Tato hodnota se v čase nemění.

## 3. Detekce založená pouze na datech o výrobě

Z provozního hlediska by bylo nejlepší, kdyby bylo možno detekovat nestandardně se chovající zdroje jen s pomocí dat z měřených FVE a do výpočtu by nevstupovala žádná jiná data (např. měření meteorologických veličin). Je zřejmé, že veličiny  $Y_{idh}$  a  $Y_{id(h+1)}$ , to jest hodnoty výroby jedné farmy ve dvou po sobě jdoucích hodinách, budou silně korelované. Z tohoto důvodu se jeví jako jeden z možných přístupů založení detekce na vhodné veličině reprezentující denní výrobu elektrárny.

### 3.1. Koefficient denní výroby

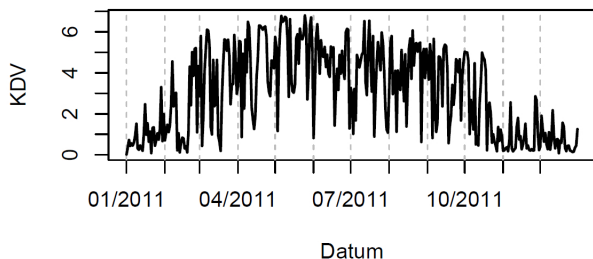
Při tomto přístupu je zdroj reprezentován pomocí koeficientu denní výroby, který se vypočte pro každou farmu  $i = 1, \dots, 387$  a každý den  $d = 1, \dots, 365$  pomocí vzorce

$$KDV_{id} = \sum_{h=0}^{23} \frac{Y_{idh}}{IV_i}, \quad (2)$$

kde  $Y_{idh}$  je množství energie vyrobené zdrojem  $i$ , ve dnu  $d$  v průběhu hodiny  $h$  a  $IV_i$  je hodnota instalovaného výkonu této FVE.

Koefficient denní výroby  $KDV$  tedy může nabývat hodnoty z intervalu  $[0, 24]$ , přičemž nulová hodnota znamená že daná elektrárna v daný den nevyráběla žádnou energii. Naopak pozorovaná hodnota koeficientu 24 a více znamená, že by výroba tohoto zdroje byla rovna instalovanému výkonu celých 24 hodin (včetně noci), popřípadě by mohla elektrárna vyrábět dlouhodobě více než je její instalovaný výkon, což v praxi není možné.

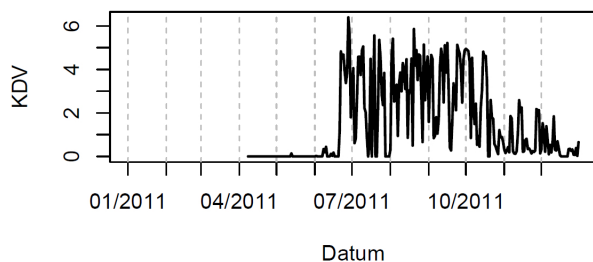
Obě tyto hodnoty tedy znamenají, že se daný zdroj chová výrazně nestandardně anebo že naměřená či přenesená data nejsou validní. U našich dat se hodnota  $KDV$  pohybovala v intervalu  $(0, 8)$ . Průběh  $KDV$  pro jednu vybranou, na první pohled standardní farmu, je zobrazen na obrázku 3.



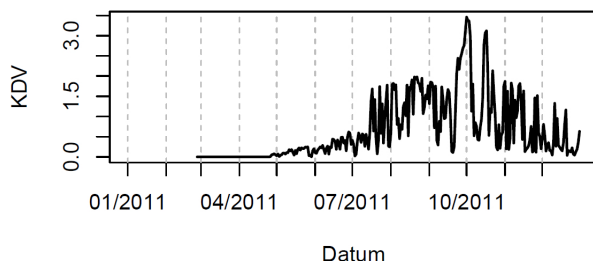
**Obrázek 3:** Typický průběh koeficientu denní výroby pro fotovoltaickou elektrárnu.

### 3.2. Chování netypické “na první pohled”

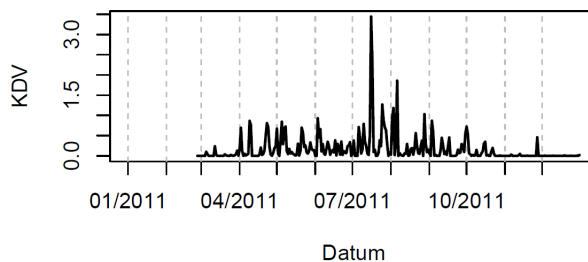
Při detailním zkoumání  $KDV$  jsme narazili na několik zjevných případů nestandardního chování některých elektráren. Jejich příklady jsou uvedeny na obrázcích 4 až 8.



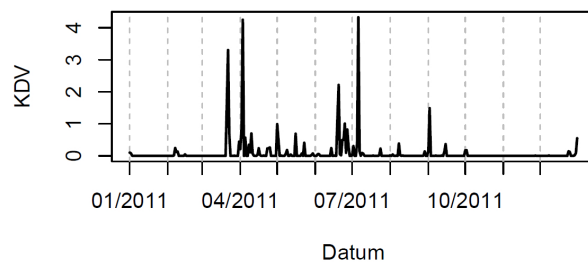
**Obrázek 4:** Nestandardní FVE – zdroj v prvních týdnech nedodává žádnou energii, přestože byl již veden jako zapojený.



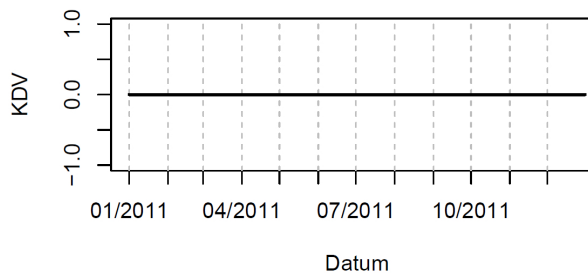
**Obrázek 5:** Nestandardní FVE – zdroj v prvních týdnech nedodává žádnou energii, pak několik týdnů výroba neodpovídá rezervovanému výkonu, což se jeví jako postupný náběh elektrárny



**Obrázek 6:** Nestandardní FVE – velmi častá nulová výroba, zároveň nízké hodnoty  $KDV$  vedou k podezření z nesouladu mezi skutečným instalovaným výkonem a instalovaným výkonem uvedeným v databázi.



**Obrázek 7:** Nestandardní FVE – většinu roku nulová výroba.



**Obrázek 8:** Nestandardní FVE – nulová výroba počas celého roku.

Jednoduché příklady nestandardního chování uvedené výše jsou detekovatelné heuristicky. Pro účely návrhu detekce nestandardního chování v méně jasných případech je třeba tyto případy vyloučit ze vstupních dat. Proto byla vstupní data filtrována a byly odstraněny pro jednotlivé farmy dny s celkovou nulovou výrobou. Tři FVE s extrémním chováním jako je zobrazeno obrázku 8, byly ze zkoumaného souboru úplně vyloučeny.

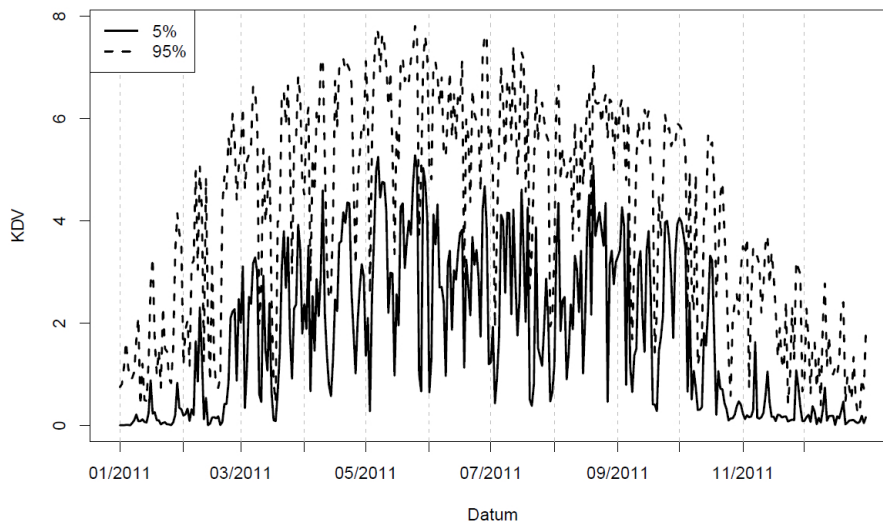
### 3.3. Detekce netypických zdrojů

Za ideálních podmínek, kdyby všechny zdroje byly technologicky identické a kdyby na území celé České republiky bylo úplně identické počasí, by hodnota  $KDV$  měla být stejná pro všechny zdroje. Rozdíly hodnot

$KDV$  v jeden den pro různé zdroje jsou způsobeny především volatilitou počasí v ČR a různorodostí technických řešení jednotlivých FVE.

Pro každý den byly z dostupných hodnot  $KDV$  spočteny výběrové kvantily. Na základě expertního po-

souzení byly nakonec zvoleny 5% a 95% kvantily, tyto kvantily jsou znázorněny na obrázku 9. Následně byl pro každý zdroj stanoven počet případů, kdy se hodnota jeho  $KDV$  ocitla mimo interval tvořený těmito výběrovými kvantily.

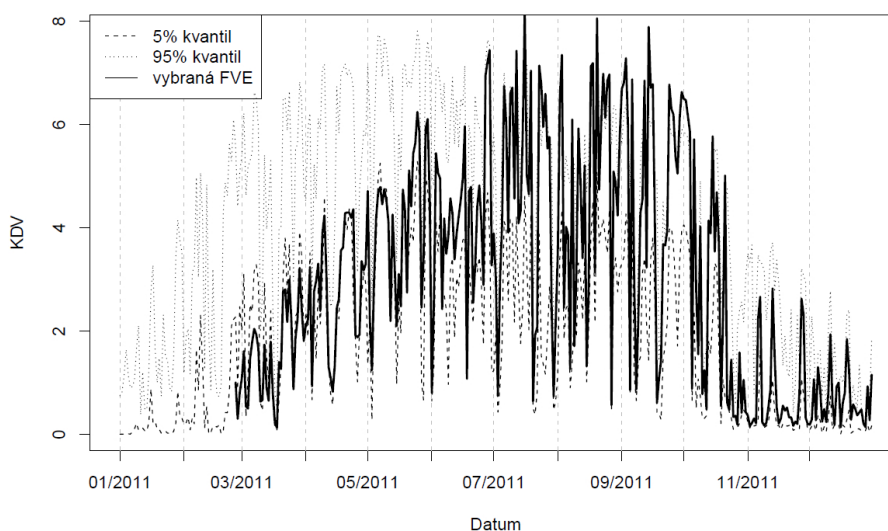


**Obrázek 9:** Kvantily  $KDV$ .

### 3.4. Detekované zdroje

Použitím popsané metody bylo identifikováno 39 zdrojů, pro které byla hodnota  $KDV$  mimo interval ohraničený výběrovými kvantily více než 75 krát. U většiny zdrojů se jednalo buď o systematické překračování horního kvantilu nebo naopak

o dlouhodobé nedosahování spodního kvantilu. Největší podezření v těchto případech padalo na nesprávnou hodnotu instalovaného výkonu. Nicméně našly se i zajímavější případy, jeden je uveden na obrázku 10. V tomto případě bylo zjištěno, z 309 hodnot  $KDV$  pro tento zdroj se jich 46 vyskytovalo nad hodnotou horního kvantilu a 47 pod hodnotou dolního kvantilu.



**Obrázek 10:** Jeden z identifikovaných netypických zdrojů spolu s odhadnutými kvantily. Všimněme si, že zatímco v první polovině roku FVE patřila ke zdrojům vyrábějícím velmi málo, v druhé polovině roku patřila naopak k neefektivnějším zdrojům.

U zdrojů vytipovaných tímto postupem následně dochází k postupnému ověření správnosti informací o nich evidovaných. U některých FVE to vede k výraznému zpřesnění informací o jejich činnosti.

#### 4. Detekce nestandardního chování s využitím závislosti výroby FVE na sluneční radiaci

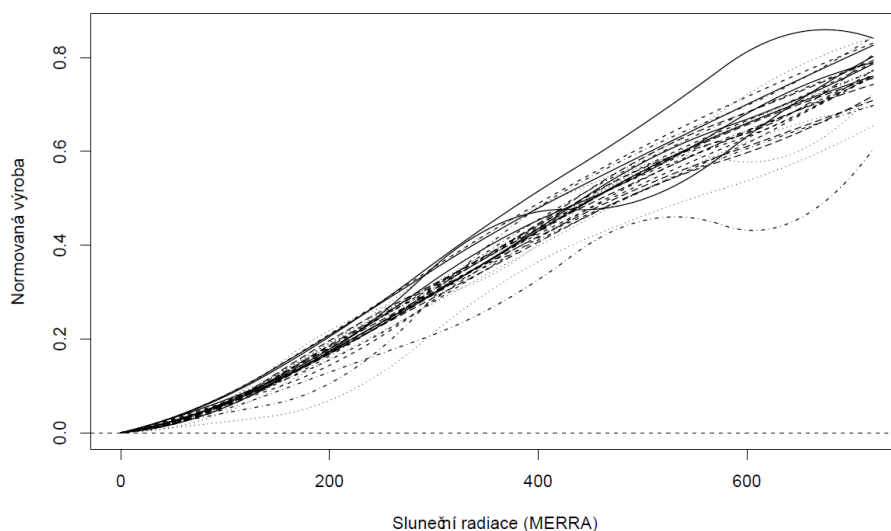
Jednou z nevýhod postupu popsaného v předchozí kapitole, to jest detekce založené pouze na porovnávání celkové denní výroby, je fakt, že tento postup nijak nezohledňuje průběh výroby uvnitř dne. Proto byla v dalším kroku vyzkoušena možnost klasifikovat jednotlivé zdroje podle jejich vztahu mezi výrobou a celkovou sluneční radiací v dané oblasti. Problémem tohoto přístupu je neexistence měření slunečního záření přímo z místa kde se nachází daná elektrárna. Jedním z řešení tohoto problému je použít měření slunečního svitu z automatických měřicích stanic AIM Českého hydrometeorologického ústavu, další možností je pak použít hodnoty slunečního záření pocházející z meteorologických reanalýz. Protože měření pocházející z AIM stanic nejsou nijak validována a stanice jsou rozmístěny nerovnoměrně po území ČR, byla zvolena druhá možnost.

Tzv. analýza meteorologické situace je odhadem plošného rozložení meteorologických veličin na daném území. Tento odhad vychází jak z předchozího běhu numerického předpovědního modelu počasí, tak i z dostupných měření (pozorování na pozemních stanicích, sondáže ve vyšších vrstvách atmosféry, družicové snímky apod.). Měření jsou do modelového běhu asimilována nejnovějšími metodami, které se poměrně rychle vyvíjejí a mění. Termínem reanalýza se rozumí zejména provedení analýzy za delší časové období jednotnými metodami (na rozdíl od operativních analýz, kde se metody i modely mohou měnit). Pro účely této publikace byla zvolena reanalýza MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) vytvořená v americké NASA. Tato reanalýza je vytvářena na mřížce s velikostí čtverce  $1/2 \times 2/3$  stupně.

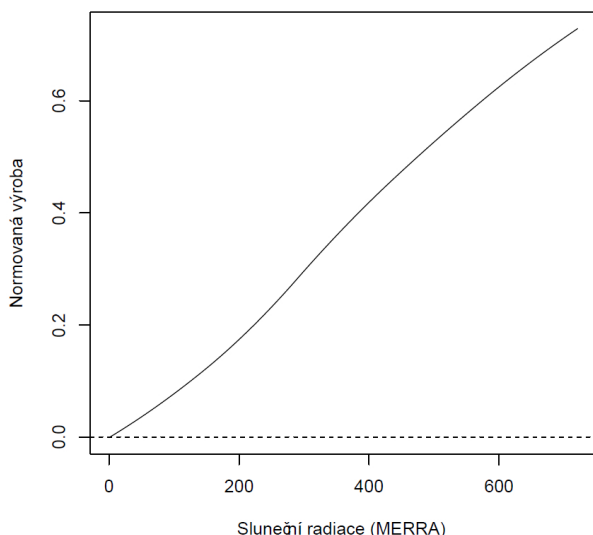
Vztah mezi výrobou  $i$ -té elektrárny a hodnotou sluneční radiace pro každý den  $d$  a každou farmu  $i$  je pak možno napsat ve tvaru

$$NV_{id} = f_{id}(SWD_{id}), \quad (3)$$

kde  $NV_{id}$  je normovaná výroba jednotlivé FVE (tj. podíl skutečné hodnoty výroby a instalovaného výkonu dané farmy),  $SWD_{id}$  je hodnota sluneční radiace v nejbližším bodě mřížky reanalýzy vzhledem ke skutečné poloze zdroje a funkce  $f_{id}$  vyjadřuje vztah mezi slunečním zářením a výrobou FVE. Tyto funkce jsou různé pro různé FVE a také se liší pro jednu FVE v různých dnech. V případě, že by hodnoty sluneční radiace z reanalýzy přesně odpovídaly skutečné radiaci přepočtené na úhel naklonění panelů FVE, měly by být funkce  $f_{id}$  téměř lineární (při zanedbání vlivu teploty panelu). Protože ve skutečnosti máme jen hodinová měření, je nutno funkce odhadnout, např. pomocí B-splínů a metody nejmenších čtverců. Detailně je tento postup popsán například v knize [3]. Odhady těchto funkcí, pozorovaných 3.9.2011, pro prvních 30 FVE jsou znázorněny na obrázku 11.

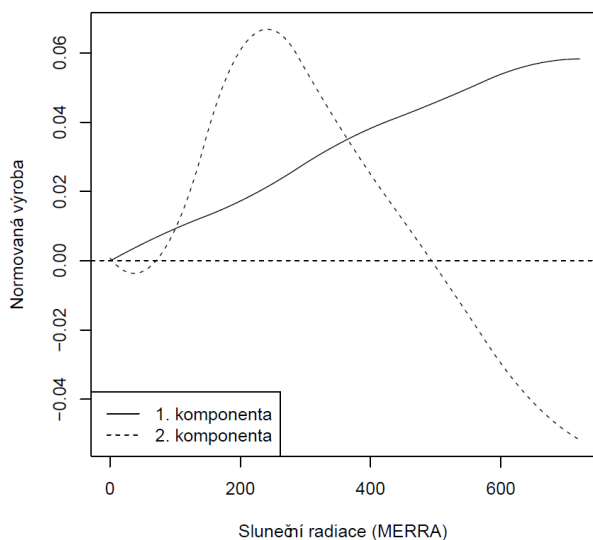


**Obrázek 11:** Funkce vyjadřující vztah mezi hodnotou sluneční radiace z reanalýz a výrobou 30 FVE s největším instalovaným výkonem, dne 3.9.2011.



**Obrázek 12:** Střední hodnota normované výroby FVE.

Již na první pohled je vidět, že zdaleka ne všechny FVE vykazují stejné chování vůči sluneční radiaci pocházející z reanalýz MERRA. Tyto rozdíly mohou být způsobeny rozdílnou technologií FVE, různými vzdálenostmi FVE od nejbližšího bodu mřížky, různým typem povrchu v místě instalace FVE apod.

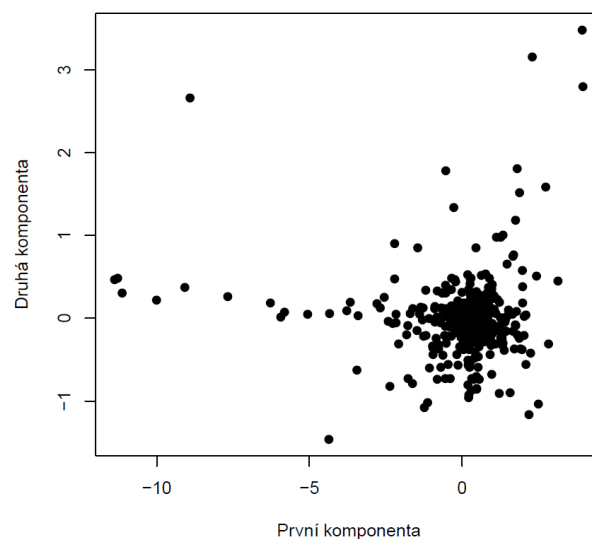


**Obrázek 13:** První dvě komponenty vysvětlující více než 90% procent rozptylu.

Na funkce odhadnuté tímto způsobem byla aplikována metoda funkcionální analýzy hlavních komponent, po-

drobně popsaná v [3], která je založena na Karhunen-Loèveho rozkladu autokovariančního operátoru, viz například [1]. Pro každý den pak byly identifikovány dvě hlavní komponenty, které ve většině případů vysvětlovaly více než 90% rozptylu. Na obrázcích 12 a 13 jsou uvedeny střední hodnota a první dvě komponenty pozorované dne 3.9.2011.

Pro detekci nestandardně se chovajících FVE se v tomto případě použijí odhadnuté skóry, nakreslené na obrázku 14. Nicméně odvození pravidel pro detekci je podmíněno správnou interpretací jednotlivých komponent. Proto se v současné době autorova pozornost zaměřuje zejména na tyto dva úkoly. Pro jejich úspěšné vyřešení ale bude nutné provést ještě další experimenty a simulace.



**Obrázek 14:** Skóry jednotlivých FVE pro první dvě komponenty.

## Literatura

- [1] R.B. Ash and M.F. Gardner, “Topics in Stochastic Processes”, Academic Press, INC., New York, 1975.
- [2] K. Branker, M.J.M. Pathak, and J.M. Pearce, “A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity”, Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 4470–4482, 2011.
- [3] J.O. Ramsay and B.W. Silverman, “Functional Data Analysis”, Springer-Verlag, 2005.