

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky**



Stochastický přístup v konceptu Smart Grid
Stochastic approach in the smart grid concept

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Radek Hanuš, Ph.D.

Bc. Kristýna Königová

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Königová** Jméno: **Kristýna** Osobní číslo: **420092**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Stochastický přístup v konceptu Smart Grid

Název diplomové práce anglicky:

Stochastic approach in the smart grid concept

Pokyny pro vypracování:

1. Popis nových trendů v oblasti elektroenergetiky - DECE, elektromobilita, akumulace
2. Přehled různých přístupů k výpočtům distribučních sítí
3. Výhled rozvoje nových trendů v zájmové oblasti sítí nn PREDi
4. Aplikace výpočetních přístupů na síť nn ve zvolené lokalitě
5. Porovnání výstupů jednotlivých výpočetních přístupů

Seznam doporučené literatury:

- [1] Energy outlook 2016
- [2] Projekt More Microgrids, CIGRE 2014
- [3] Schlabbach, J. D Blume a T Stephanblome, Voltage quality in electrical power systems, IEE London
- [4] Distribution network code
- [5] Application manual eVlivy

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Radek Hanuš, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.05.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Radek Hanuš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ríplka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Radku Hanušovi, Ph.D. za čas, ochotu a cenné rady, které mi pomohly k vypracování mé závěrečné práce. Velký dík patří i Ing. Zbyňku Brettschneiderovi, Ph.D. za konzultace k výpočetní části.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou pravděpodobnostních výpočtů při chodu distribučních sítí a jejich srovnáním s výpočty klasickými. Obsahuje stručný úvod o změnách v distribuční síti, které jsou důvodem uvažování nad potřebou změny přístupu ke stávajícím výpočtům. Zpracování pravděpodobnostních charakteristik je provedeno analýzou hromadných dat. Příklad pravděpodobnostních výpočtů je ukázán na konkrétní zvolené části NN sítě. Závěrem práce je srovnání s klasickými výpočty a ukázání tak výhod a užití přístupu pravděpodobnostního.

Klíčová slova

Pravděpodobnostní výpočty, hustota pravděpodobnosti, distribuční síť, decentralizovaná výroba elektrické energie, elektromobilita, fotovoltaika, akumulace, konvoluce

Abstract

This diploma thesis focuses on the probabilistic approach when calculating and operating the distribution power grid and compares it to the classical approach. It includes a brief introduction of modern grid changes that are the reason for why we would change the computation approach. The processing of probability characteristics is performed by mass data analysis. The probabilistic calculation approach is presented on a specific real part of the low voltage grid. The final goal of this work is to show the probabilistic calculations and their benefits while comparing them to their deterministic approach counterparts.

Key words

Probabilistic calculations, probability density function, distribution network, decentralized electrical energy production, electromobility, photovoltaics, accumulation, convolution

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	xiii
Seznam obrázků	xiv
Seznam tabulek	xv
Úvod	17
Popis trendů v oblasti energetiky.....	19
Decentralizovaná výroba elektrické energie.....	19
Výhody a nevýhody decentralizovaných zdrojů	19
Vývoj DECE do roku 2040.....	20
Zpětný vliv na soustavu.....	21
Chránění a řízení soustavy.....	23
FVE.....	25
Definice	25
Historie fotovoltaických článků.....	25
Vývoj ve světě	25
Vývoj v České republice.....	28
Domácí instalace	28
Elektromobilita.....	29
Historie	31
Vývoj ve světě	32
Vývoj v ČR.....	32
Dobíjení elektromobilu	33
Akumulace	33
Vývoj technologií akumulace	35
Elektromobilita jako akumulace.....	35
Přístupy k výpočtům v distribuční síti.....	36
Gauss-Seidelova metoda.....	37
Newton-Rapsonova metoda	39
Pravděpodobnostní přístup.....	41
DC Load Flow	43
Aplikace výpočetních přístupů.....	45
Pravděpodobnostní model odběrného místa.....	45
Výběr dat.....	45
Stanovení pravděpodobností.....	48
Odběr výkonu	48

FVE	48
Elektromobilita	51
Konvoluce hustot pravděpodobností	53
Výpočet na reálném vývodu NN z distribuční transformační stanice VN/NN	55
Popis vývodu.....	55
Pravděpodobnostní výpočet chodu sítě na vývodu NN.....	56
Sestavení admitanční matice B.....	56
Sestavení citlivostní matice linkových toků H	57
Pravděpodobnostní výpočty toků na větvích sítě	58
Pravděpodobnostní výpočet úbytku napětí v síti	59
Deterministický výpočet.....	60
Scénář 1	60
Scénář 2	62
Porovnání pravděpodobnostního a deterministického přístupu	63
Závěr.....	67
Seznam použité literatury	69
Přílohy	73
Příloha A – Výpočet hustoty pravděpodobnosti odběru s tarifem D02.....	73
.....	73
Příloha B – Výpočet hustoty pravděpodobnosti odběru s tarifem D25.....	75
Příloha C – Výpočet pravděpodobnosti pro FVE	77
Příloha D – Výpočet pravděpodobnosti pro elektromobil.....	79
Příloha E – Pravděpodobnostní výpočet	81
Příloha F – Klasický výpočet	95

Seznam použitých zkratek a symbolů

3F	třífázový
AM	Koeficient vzdušné masy
ASEK	Aktualizace Státní energetické koncepce
CdTe	Kadmium tellurid
CIGS	Měď indium galium selenid
CO ₂	Oxid uhličitý
ČR	Česká republika
D02	jednotarifová sazba pro střední potřebu
D25	dvou tarifní sazba s řízením spotřeby, doba 8 hodin, TUV
DC	Stejnoseměrný proud
DECE	Decentralizovaná výroba elektřiny
DS	Distribuční soustava
DTS	Distribuční transformační stanice
ERÚ	Energetický regulační úřad
ES	Elektrizační soustava
EU	Evropská unie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
I [A]	Proud
IEA	Mezinárodní energetická agentura
IRENA	Mezinárodní agentura pro obnovitelné zdroje
kWp	Kilowattpeak, jednotka špičkového výkonu
Li-ion	Lithium iontový
NAP SG	Národní akční plán pro Smart Grid
NaS	Sulfid sodíku
NN	Nízké napětí
OTE	Operátor trhu s energiemi
OZ	Obnovitelné zdroje
P [W]	Činný výkon
p.j.	Poměrné jednotky
PLF	Pravděpodobnostní metoda toků
PREdi	PREdistribuce, a.s.
PS	Přenosová soustava
Q [VAr]	Jalový výkon
R [Ω]	Činný odpor
RD	Rodinný dům
S [VA]	Zdánlivý výkon
SEK	Státní energetická koncepce
Si-a	Amorfní křemík
Si-mono	Monokrystalický křemík
Si-multi	Multikrystalický křemík
TR	Transformátor
U [V]	Napětí
USA	Spojené státy americké
VN	Vysoké napětí
VTE	Větrná elektrárna
WADE	Světová aliance pro decentralizovanou energii
Y [S]	Admitance
δ [°]	Fázový úhel

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vývoj instalovaného výkonu OZE podle ASEK, Zdroj: [9].....	21
Obrázek 2 - Srovnání sítě centralizované a decentralizované, Zdroj: vlastní zpracování	22
Obrázek 3 - Model DS – Chránění soustavy, Zdroj:[11].....	23
Obrázek 4 - Model DS - Řízení soustavy, Zdroj:[11].....	24
Obrázek 5 - Nároky na komunikační síť distributora, Zdroj: PREdistribuce, a.s.	24
Obrázek 6 - Vývoj výkonu fotovoltaických modulů, Data: [1].....	26
Obrázek 7 - Vývoj cen křemíkových fotovoltaických modulů, Zdroj: [18].....	27
Obrázek 8 - Odběr + Dodávka FVE do sítě Rodinného domu, Zdroj: Měření RD	29
Obrázek 9 - Vývoj cen Li-ion akumulátorů, Zdroj: [34]	32
Obrázek 10 - Dobíjecí křivka elektromobilu, Zdroj: PREdi	33
Obrázek 11 - Vývojový diagram Gauss-Seidelovy metody, Zdroj:[39].....	38
Obrázek 12 - Postup výpočtu Newton-Rapsonovou metodou, Zdroj:[42].....	40
Obrázek 13 - Rozložení hustoty pravděpodobnosti, Zdroj: vlastní zpracování	42
Obrázek 14 - Model odběrného místa, Zdroj: [43].....	45
Obrázek 15 - Třídění odběrů dle tarifu a jističe - 1F, Zdroj: vlastní zpracování	46
Obrázek 16 - Třídění odběrů dle tarifu a jističe - 3F, Zdroj: vlastní zpracování	47
Obrázek 17 - Hustota pravděpodobnosti zatížení jednotlivých RD	48
Obrázek 18 - Hustota pravděpodobnosti FVE v odběrném místě	49
Obrázek 19 - Hustota pravděpodobnosti odebíraného výkonu elektromobilem, Zdroj: vlastní zpracování	51
Obrázek 20 - Výsledná hustota pravděpodobnosti odběru elektromobilu	52
Obrázek 21 - Průběh konvoluce FVE + odběr	53
Obrázek 22 - Celková hustota pravděpodobnosti odběrných míst, průběhy výkonu	54
Obrázek 23 - Celková hustota pravděpodobnosti odběrných míst, průběhy proudu	54
Obrázek 24 - Mapa vybrané oblasti, Zdroj: PREdistribuce, a.s.	55
Obrázek 25 - Schéma sítě, vlastní zpracování	55
Obrázek 26 - Výsledná admitanční matice \mathbf{B} , Wolfram Mathematica.....	57
Obrázek 27 - Redukovaná admitanční matice \mathbf{B}_{red}	57
Obrázek 28 - Redukovaná citlivostní matice linkových toků \mathbf{H}_{red}	58
Obrázek 29 - Matice Shift faktorů \mathbf{S}	58
Obrázek 30 - Průběhy zatížení na jednotlivých větvích.....	59
Obrázek 31 - Hustota pravděpodobnosti úbytků napětí v uzlech vývodu	60
Obrázek 33 - Vyhodnocování pravděpodobnostního přístupu, vlastní zpracování	63
Obrázek 34 - Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti zatížení začátku vývodu	64
Obrázek 35 - Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti zatížení transformátoru s osmi vývody	65
Obrázek 32 - Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti úbytku napětí na konci vývodu.....	65
Obrázek 36 - Vývojový diagram pravděpodobnostního výpočtu, Zdroj:[48].....	67

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Výkonové ztráty na elektrickém vedení [5].....	20
Tabulka 2 - Vývoj FVE a Elektromobility do roku 2045 – Optimalizovaný scénář, Zdroj: [9].....	21
Tabulka 3 -Maximální dosažená účinnost modulů v roce 2018, Data: [1][16].....	26
Tabulka 4 - Predikce vývoje účinností komerčně prodávaných modulů [17]	27
Tabulka 5 - Produkce CO ₂ při jízdě automobilem, zdroj:[28].....	30
Tabulka 6 - Srovnání produkce CO ₂ na km pro nabíjení baterií, zdroj:[28].....	31
Tabulka 7 - Počty budov v roce 2011, Zdroj:[49]	50
Tabulka 8 - Nejčastější zastoupení elektromobilů v ČR, Zdroj: PREdi	51
Tabulka 9 - Popis odběrných míst, Zdroj: PREdistribuce, a.s.	56
Tabulka 10 - Tabulka odběrů pro scénář 1, Zdroj: vlastní zpracování	61
Tabulka 11 - Tabulka odběrů pro scénář 2, Zdroj: Vlastní zpracování	62

Úvod

V současnosti je výroba elektrické energie ve všech zemích světa orientovaná převážně centrálně, energie je vyráběna velkými zdroji a z těchto míst dále distribuovaná ke spotřebitelům. Trendy do budoucna ale naznačují, že se tento systém bude postupně měnit, a to z mnoha důvodů. Ať už jimi jsou ekologické důvody jako produkce emisí, znečišťování ovzduší a globální oteplování nebo důvody ekonomické. Těm nahrává končící životnost velkých elektráren a vyšší náklady na palivo, jehož zásoba navíc není nekonečná. Tyto všechny důvody nasvědčují změně, kterou představuje masivní nárůst zastoupení DECE.

Tou by měl být nárůst lokálních zdrojů a pak postupné snižování zastoupení centrálních zdrojů. Mezi lokální zdroje mohou patřit, jak menší komerční elektrárny, tak zdroje pro vlastní spotřebu, které mohou a nemusí být připojeny do sítě. V případě takové proměny je ale nutné zajistit, aby síť fungovala bez problémů. To se neobejde beze změny koncepce v rozvoji a obnovování sítí, dále to bude mít významné dopady i na procesy řízení a provozování sítí.

Jednou z dílčích oblastí, která se bude muset revidovat, je přístup k výpočtům sítí. Při vyšší míře decentralizace se síť stává méně predikovatelnou. Pokud se do sítě připojí fotovoltaické elektrárny, elektromobily a jiné obtížně predikovatelné prvky, toky výkonu jsou závislé na více faktorech. Hraje zde roli například aktuální počasí a chování spotřebitele. To zvyšuje nároky na výpočty v síti, protože je potřeba napočítat všechny scénáře od nejhorších po nejlepší a vybrat jeden, na který se bude síť dimenzovat. Znamená to mnoho výpočtů, protože je zde velké množství možností.

Možným řešením je využití pravděpodobnostního přístupu k výpočtům v distribuční síti. Místo konkrétních dat by se počítalo s pravděpodobnostními charakteristikami, které kombinují chování spotřebitele i chování zdroje. Statisticky lze určit i pravděpodobnost, že si spotřebitel takový zdroj (spotřebič) pořídí.

Tato práce má za cíl ukázat, jak tyto pravděpodobnostní výpočty fungují na konkrétním příkladu, jak lze určit jednotlivé pravděpodobnostní charakteristiky toků výkonu a dále pak srovnat tento přístup s přístupem klasickým, který se nyní běžně používá.

Popis trendů v oblasti energetiky

Decentralizovaná výroba elektrické energie

Podle World Alliance for Decentralized Energy (Světová aliance pro decentralizovanou energii), dále jen WADE, můžeme decentralizovanou energii definovat jako: „Výrobu elektrické energie v nebo blízko místa spotřeby, kdy nezáleží na velikosti, užití technologii nebo palivu a to off- nebo on-grid.“[1] Větší důraz je kladen na to, kde je energie vyráběna, než jakým způsobem a to z důvodu omezení ztrát, které vznikají transportem nebo například možného dalšího využití vzniklého odpadního tepla, které není možné přepravovat na delší vzdálenosti.

Termín decentralizovaná výroba elektrické energie je úzce spjata s výrobou z obnovitelných zdrojů. Mezi tyto zdroje se například řadí[2]:

- Fotovoltaické panely
- Lokální větrné turbíny
- Baterie, akumulátory
- Elektromobily (mohou sloužit jako akumulční zařízení)

Baterie, akumulátory a elektromobily nejsou zdroji v klasickém pojetí. V případě plné říditelnosti soustavy by mohly sloužit jako akumulční prvek a v případě potřeby se stát zdroji.

Výroba elektrické energie v České republice stále patří počtem velkých zdrojů do převážně centralizované. Dle OTE bylo v roce 2017 35,01 % elektrické energie vyrobeno v jaderných elektrárnách, 57,40 % z fosilních paliv a jen 7,60 % z obnovitelných zdrojů. [3] Výhodami jsou relativně nízký počet zdrojů o velkém výkonu, a tedy i nízká cena za vyrobený kW. Nicméně čím menší počet zdrojů, tím vyšší jsou nároky na přenosovou síť a dlouhými přenosy vznikají vyšší ztráty. V případě, že selže jeden ze zdrojů, je vyšší negativní dopad na celou síť.

S postupem technického vývoje a podporou Evropské unie je dostupnější budování menších zdrojů a tím postupující decentralizace. Více malých zdrojů může zajistit lokální spotřebu, čímž se sníží přenosové ztráty. I stabilita sítě je vyšší, při výpadku menšího zdroje není vliv na celou síť tak značný. Decentralizace je velmi úzce spjata s využíváním obnovitelných zdrojů jako solární a větrná energie nebo biomasa. Díky možnosti získání dotace na pořízení fotovoltaického systému investuje stále více soukromých subjektů do výstavby. Pokud je systém připojen do distribuční sítě, stává se zdrojem, se kterým je třeba počítat v dimenzování a dalších výpočtech.

Výhody a nevýhody decentralizovaných zdrojů

Decentralizace výroby elektrické energie s sebou přináší mnohé výhody jak ekonomické, tak ekologické, které jsou spolu úzce svázány. Nespornou výhodou je snížení produkce uhlíkových emisí při větší míře využití obnovitelných zdrojů. Plán

Evropské unie je zvýšit podíl výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů na 32 % do roku 2030.[4]

Vedlejším produktem spalovacích procesů je odpadní teplo, které je možné dále využívat. Bohužel jej ale není možné transportovat na velké vzdálenosti z důvodu velkých ztrát, a proto se zde skrývá nevyužitý potenciál. Teplo je tedy nutné využít v místě blízkému výrobě. Je možné jím zásobovat blízkou obydlenou část nebo jiný průmyslový podnik, který je třeba vytápět.

Elektrická energie na rozdíl od tepla je lépe transportovatelná na delší vzdálenosti, ale ani zde se to neobejde beze ztrát.

Tabulka 1 - Výkonové ztráty na elektrickém vedení [5]

	Ztráty [%]
Zvyšovací transformátor	1-2
Přenosová soustava	2-4
Snižovací transformátor	1-2
Distribuční soustava	4-6
Celkové ztráty	8-15

V České republice se ztráty pohybují pod úrovní 5 %. Od roku 1999, kdy byla úroveň přenosových ztrát 7,76 %, hodnota klesá, v roce 2014 byla na úrovni 4,5 %. Jedním z důvodů jsou oproti jiným zemím malé přenosové vzdálenosti. Dalším důvodem by mohla být rostoucí účinnost jednotlivých zařízení. I to je jedním z cílů EU.[6]

Decentralizované zdroje elektrické energie jsou velmi často reprezentovány zdroji obnovitelnými. Mezi nejrozšířenější pak patří větrné a solární elektrárny. Tyto zdroje jsou závislé na počasí a jejich výroba tedy není konstantní. S tím vyvstávají tyto problémy jako [7]:

- Nedostatečná rezerva PS a DS
- Predikce výroby v závislosti na různých faktorech jako počasí nebo chování zákazníka
- Zajištění bezpečnosti dodávky
- Akumulace energie

Pokud má neustále narůstat složka výroby z OZ, je třeba se s těmito problémy vypořádat.

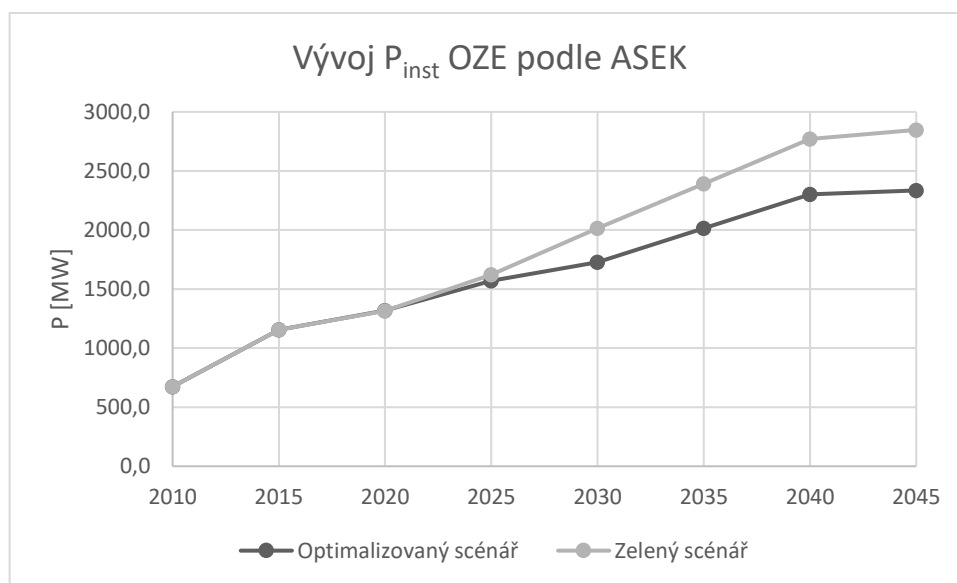
Vývoj DECE do roku 2040

Podle Státní energetické koncepce (SEK) se očekává rozvoj v oblasti decentralizace, na který je třeba, aby byla distribuční soustava připravena. Do roku 2030 by měla být v DS zajištěna obnova a rozvoj prostředků pro dálkové řízení spotřeby, výroby a akumulace, tzv. inteligentní sítě. Síť by měla být schopna být udržitelně provozovatelná i při 50% podílu decentralizovaných zdrojů.

Dále by měl být plně využit potenciál obnovitelných zdrojů jako biomasa, větrná a solární energie. S tím souvisí efektivní využívání zemědělské půdy, která by neměla

být využívána jako prostor pro výstavbu například solárních elektráren. Pro jejich výstavbu by se mělo využít střešních ploch.[8]

V SEK jsou popsány různé typy vývoje podle jednotlivých scénářů. Graf ukazuje vývoj instalovaného výkonu OZE dvou scénářů popsaných v ASEK. Mezi těmito dvěma scénáři je v roce 2045 rozdíl přibližně 500 MW. Největší část přírůstku tvoří FVE. V tabulce níže jsou popsány očekávané vývoje FVE a elektromobility v Optimalizovaném scénáři. Pro srovnání v Zeleném scénáři jsou hodnoty v roce 2045 o 2000 GWh vyšší než v optimalizovaném.



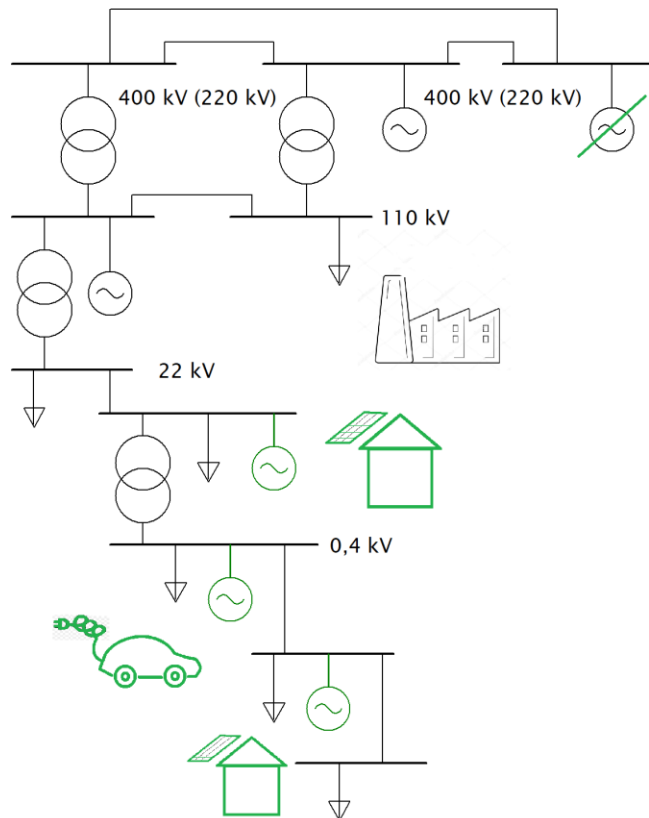
Obrázek 1 - Vývoj instalovaného výkonu OZE podle ASEK, Zdroj: [9]

Tabulka 2 - Vývoj FVE a Elektromobility do roku 2045 – Optimalizovaný scénář, Zdroj: [9]

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
FVE [GWh]	615	2276	2404	3567	3567	4726	5884	5884
Elektromobilita [GWh]	1	7	51	438	1190	2328	3442	4349

Zpětný vliv na soustavu

Distribuční soustava je na hladině NN budována jako pasivní, nejsou do ní připojeny žádné zdroje, a tudíž se očekává jeden směr toku výkonu z přenosové soustavy k odběrateli. [10] Na obrázku níže je ilustrována změna z centralizované soustavy – černě na decentralizovanou – zeleně. V centralizované soustavě jsou zdroje připojovány do soustavy přenosové, která je tak označovaná jako aktivní, výkony zde tečou obousměrně. Decentralizace pak přinese odpojení některých velkých zdrojů a připojování menších do distribuční soustavy.



Obrázek 2 - Srovnání sítě centralizované a decentralizované, Zdroj: vlastní zpracování

DECE má významný vliv na tok výkonů, stabilitu napětí nebo jeho profil v síti. Jakékoliv zpětné vlivy mají negativní vliv na kvalitu elektrické energie. Problémy mohou nastat v místě připojení, v jednotlivých napěťových uzlech může hodnota napětí fluktuovat. Dále při každém připojení vznikne přechodový děj, který může způsobit kolísání napětí. To je problémem u FVE, protože výkon dodávaný do sítě se může měnit každou minutou v závislosti na počasí.

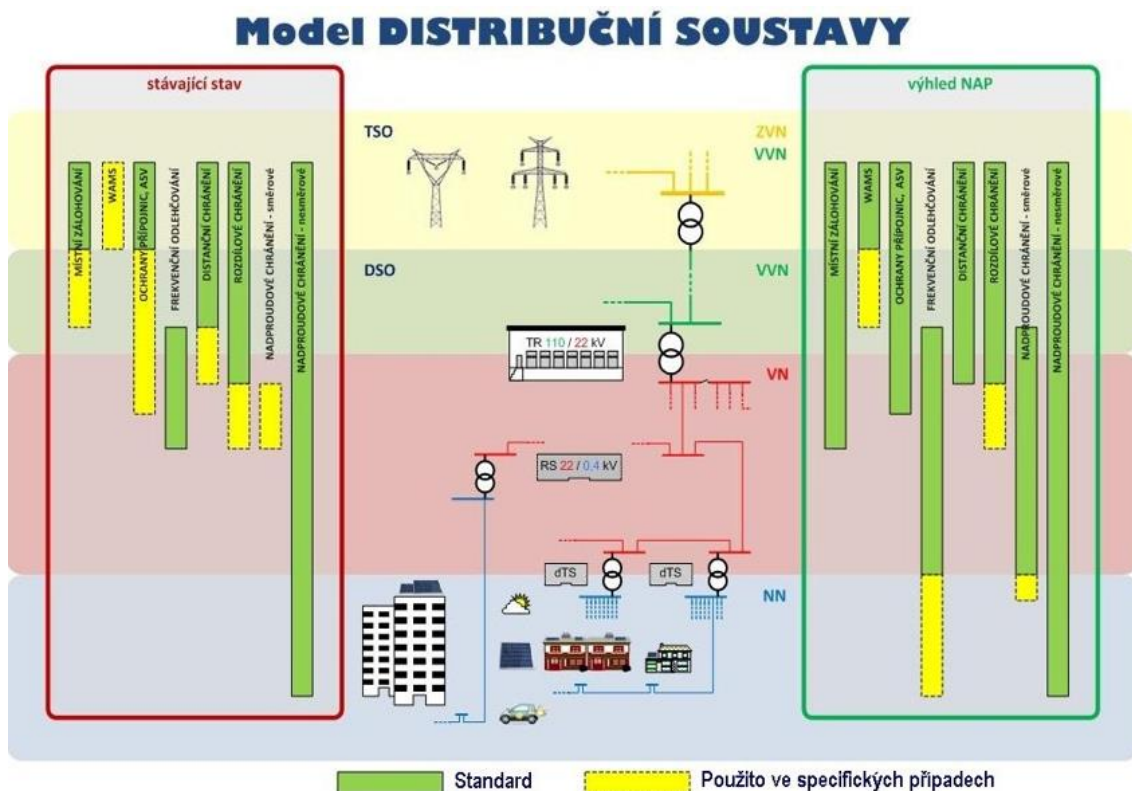
U malých domácích FVE do jednotek kW vliv na síť naštěstí není až tak výrazný. Problém by nastal v případě, že by bylo připojeno hodně zdrojů na jenom vývodu sítě 0,4 kV napájeného z jednoho transformátoru 22/0,4 kV. Navíc při jasné obloze mohou nastat přetoky do VN sítě, na což mohou chybně zareagovat elektrické ochrany. Je tedy lepší, pokud jsou FVE chápány jako pouze doplňkové zdroje rozšiřující rozmanitost výroby.[10]

V budoucnu se očekává úplná změna koncepce české energetiky, a to přechod z fosilních paliv na decentralizované zdroje. S tím se pojí mnoho opatření, které bude třeba přijmout. Bude třeba se vyrovnat s přibývajícím počtem netočivých zdrojů (zdroje s měničem – např. FVE) oproti točivým, které jsou zdroji zkratového výkonu. Kvůli zpětným vlivům bude třeba průběžné monitorování a vyhodnocování. Důvodem mohou být právě zdroje se střídačem, kvůli kterému je třeba hlídat obsah vyšších harmonických. Dalším problémem může být další kompenzace jalového výkonu kvůli řízenému spínání měničů.

Pro to, aby přechod byl bez problémů jsou podle Národního akčního plánu pro Smart grids (NAP SG) možná tři řešení, první variantou je úprava distribuční sítě, která by umožnila vyvedení požadovaného výkonu s určitou rezervou, další variantou je zajištění dostatečné akumulace. Tato varianta je ale nevýhodná hlavně z finančních důvodů. Poslední variantou by byla regulace sítě, řízení napětí. Tato varianta by spolu s určitými úpravami sítě byla ideální.[11]

Chránění a řízení soustavy

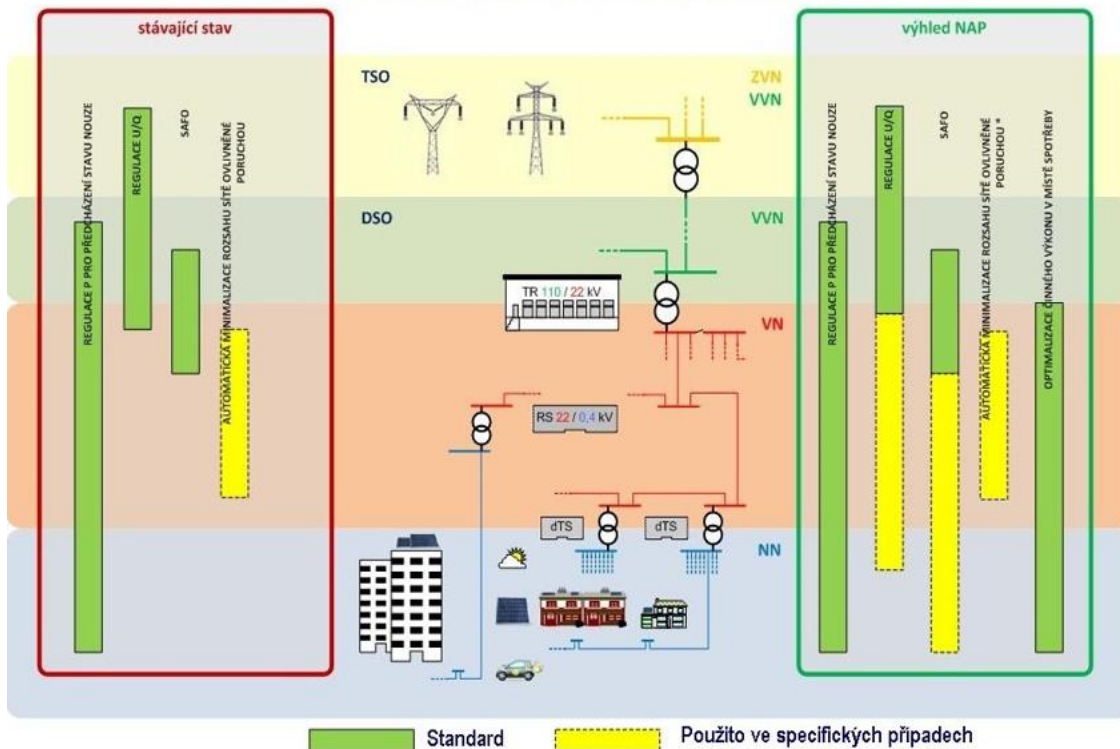
Distribuční soustava je stavěna jako pasivní radiální síť, kde toky výkonu tečou jedním směrem. V obrázku 2 vlevo je popsán stávající stav ochrany soustavy a je zde vidět, že od 22 kV níže jsou standardní jen nadproudové nesměrové ochrany. Při připojování zdrojů i do DS bude třeba provést změny v chránění, které nejvíce postihnou VN část soustavy. Protože toky výkonu nyní mohou téci oběma směry, bude třeba využít směrových nadproudových ochrany, jak je vidět v obrázku níže. Důraz bude kladen na rychlejší reakční dobu a selektivitu chránění.



Obrázek 3 - Model DS – Chránění soustavy, Zdroj:[11]

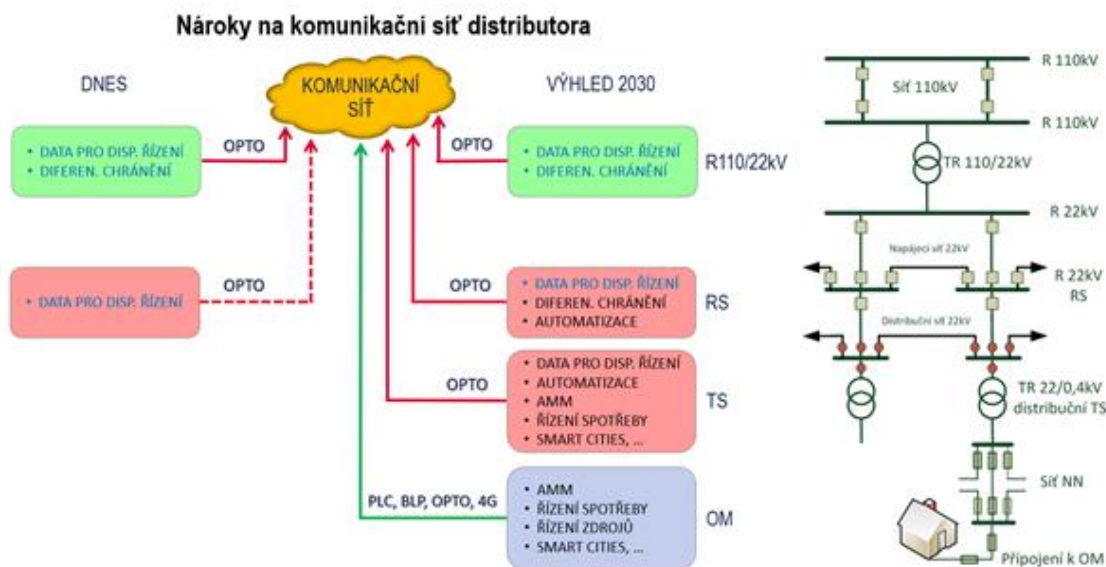
V případě řízení DS změny opět postihnou hlavně VN a pak NN část soustavy. Do budoucna se počítá s optimalizací činného výkonu přímo v místě spotřeby, vyšší mírou řízení U/Q. Hlavním bodem je zvýšení míry automatizace, která by měla urychlit řízení DS.

Model DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY



Obrázek 4 - Model DS - Řízení soustavy, Zdroj:[11]

S tím souvisí důraz na rychlost a spolehlivost komunikace, která bude zajištěna optickými kabely. Bude třeba se připravit na zpracovávání velkého množství dat, které bude použito k vyhodnocování.



Obrázek 5 - Nároky na komunikační síť distributora, Zdroj: PREDistribuce, a.s.

Celkově lze říci, že se DS bude v oblasti řízení a chránění více přibližovat soustavě přenosové a distribuční na hladině 110 kV.

FVE

Definice

Fotovoltaická elektrárna je zařízení, které díky principu fotoelektrického jevu přeměňuje energii fotonů dopadajících ze slunce na fotovoltaický článek na energii elektrickou. Elektrárna se sestává z jednotlivých panelů, které se dále skládají z paralelně nebo sériově spojených fotovoltaických článků. Fotovoltaický článek je vyroben z tenkých polovodičových, nejčastěji křemíkových destiček. Ve vývoji jsou nyní tenkovrstvé články, které se skládají z amorfního křemíku nebo kadmia, telluru, selenu a dalších.

Hlavní výhodou fotovoltaických článků je nulová produkce emisí, jsou jednoduché na používání a údržbu, jsou nehlukné a při správné manipulaci mají i poměrně vysokou životnost 25-30 let.[12]

Historie fotovoltaických článků

První fotovoltaický článek, který byl použitelný pro výrobu elektrické energie, byl vyroben z monokrystalického křemíku v Bellových laboratořích v roce 1954 a jeho účinnost byla přibližně 6 %. Od roku 1958 se články začaly využívat v kosmickém průmyslu, hlavně pro družice. I přes vývin jiných typů článků stále převládají křemíkové. V 70. letech nastal větší zájem o fotovoltaiku jako reakce na ropnou krizi způsobenou arabsko-izraelskou válkou. Od této chvíle probíhá intenzivní vývoj nových technologií, které zajišťují zvyšování účinnosti a životnosti a mimo jiné pokles ceny. Největší zájem zaznamenaly fotovoltaické panely v důsledku dotační politiky, která začala v Japonsku a dále přidalo Německo a další země. [13]

Vývoj ve světě

První světovou fotovoltaickou elektrárnou byla elektrárna o instalovaném výkonu 1 MW v Hisperii, Kalifornie.[14] Do provozu byla uvedena roku 1982, což byl také rok, kdy celosvětový instalovaný výkon překročil 21,3 MW. V roce 1999 byla překročena hranice 1 GW instalovaného výkonu.

Z obnovitelných zdrojů je fotovoltaika druhým nejvíce se rozšiřujícím zdrojem hned po větrných elektrárnách. V roce 2016 byl celosvětový instalovaný výkon přibližně 300 GW. Podle kontinentů je největším přispěvatelem Asie s 42,6 %, dále Evropa s 34 %. Severní Amerika se na celkové výrobě solární energie podílí 20,4 %. Podle

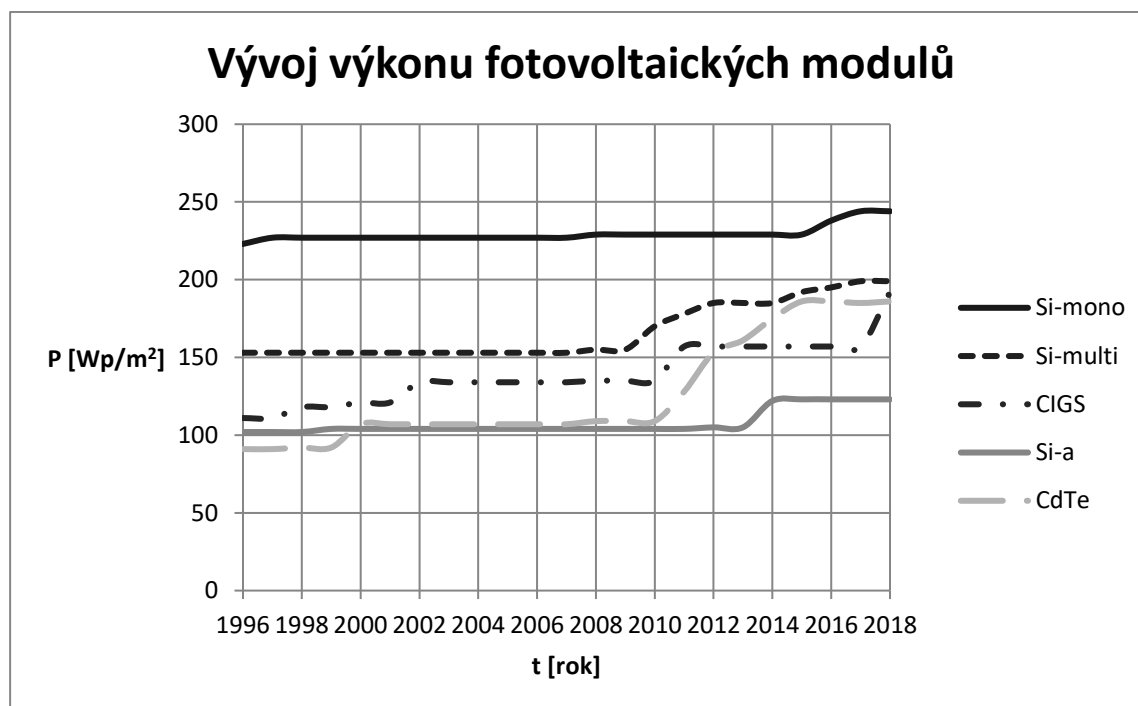
GlobalData je mezi lety 2017–2025 očekávaný nárůst instalovaného výkonu z 387,3 GW na 969 GW.[15]

V časopisu Progress in Photovoltaics každý půl rok vychází článek s tabulkami hodnot maximálních celosvětově dosažených hodnot účinností fotovoltaických článků a panelů. Tyto hodnoty jsou měřeny experimentálně v laboratoři, nicméně reálné moduly se k těmto hodnotám blíží.[12] Tyto hodnoty jsou měřeny při AM 1,5. V tabulce jsou zaneseny hodnoty, které vyšly v článku Solar cell efficiency tables (version 52) 19.6.2018. (Tabulka 3)

Tabulka 3 -Maximální dosažená účinnost modulů v roce 2018, Data: [1][16]

	Si-mono	Si-multi	CIGS	Si-A	CdTe
η [%]	24,4	19,9	19,2	12,3	18,6

Pokud jednotlivé účinnosti v bezrozměrném tvaru vynásobíme průměrnou hodnotou dopadajícího slunečního záření 1000 W/m^2 , dostaneme poměrnou hodnotu výkonu fotovoltaického modulu na 1 m^2 plochy.



Obrázek 6 - Vývoj výkonu fotovoltaických modulů, Data: [1]

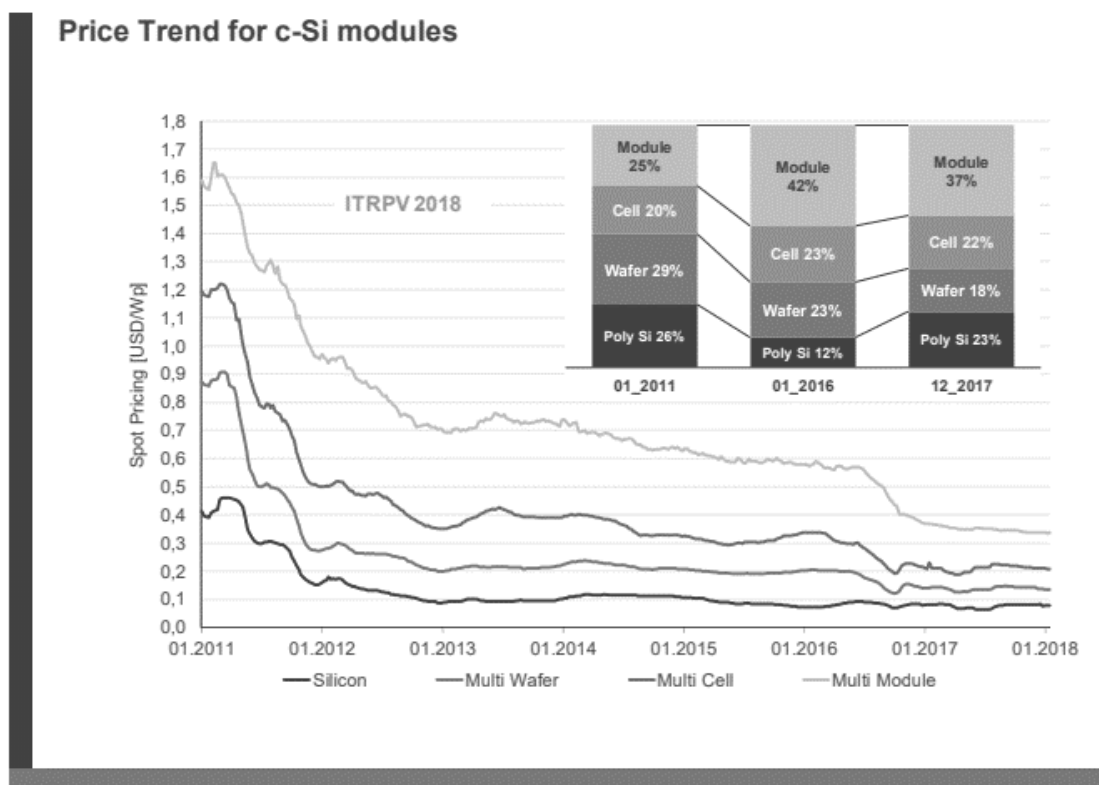
V grafu (obrázek 4) je vidět vývoj výkonu v jednotlivých letech. Těchto hodnot bylo dosaženo při laboratorním výzkumu, nikoliv komerčních modulů. Moduly s monokrystalického křemíků nezaznamenávají moc velký posun, i když v posledních letech je vidět mírný nárůst účinnosti, která se hodnotou 24,4 % pomalu blíží teoretické maximální účinnosti křemíku 29,1 %. [2] Větší skok je vidět u tenkovrstvých technologií, z kterých jsou zde uvedeny jen CIGS (Cu(InGa)Se_2), Kadmium-telluridové články a články z amorfního křemíku. Tenkovrstvé technologie zaznamenaly větší rozmach

kolem roku 2009, kdy například cena CdTe modulu klesla na hladinu 1 \$/Wp. Nicméně s poklesem ceny křemíku poklesl i zájem o tenkovrstvé moduly.[12]

Tabulka 4 - Predikce vývoje účinností komerčně prodávaných modulů [17]

	2015–2020	2020–2030/2050
Mono Si	23 %	25 %
Multi Si	19 %	21 %
a - Si	12 %	15 %
CIGS	15 %	18 %
CdTe	14 %	15 %

V budoucnu se očekává největší posun u tenkovrstvých křemíkových modulů a u CIGS. Důvodem vývoje právě těchto modulů může být snaha o snížení spotřeby krystalického křemíku. Právě do rok 2020 se očekává velký nárůst tenkovrstvých technologií.[17]



Obrázek 7 - Vývoj cen křemíkových fotovoltaických modulů, Zdroj: [18]

S dalším vývojem se úzce pojí i pohyb cen. S vývojem novějších technologií se mění mnoho faktorů, který mají vliv na pokles cen. Mezi ně například patří zvyšování účinnosti nebo redukce množství použitého materiálu.

Podle studie International Technology Roadmap for Photovoltaic ceny křemíkových modulů klesají i v roce 2018, nicméně pomaleji, než tomu bylo například v roce 2016, což je důsledkem omezení dotací v Číně.[19]

Vývoj v České republice

V České republice je průměrné roční ozáření na vodorovnou rovinu přibližně 1000 kWh/m² [20]. Lokalitou s nejvyšším úhrnem slunečního záření je Jihomoravský kraj, s nejnižším pak Krušné hory. Výkon dodaný fotovoltaickým panelem dále závisí na sklonu a natočení panelu vůči slunci. Pro Českou republiku je optimální sklon 35,2° [21] s orientací na jih.

Výstavba první solární elektrárny v České republice byla zahájena roku 1994 v Dukovanech a v roce 1998 byl zahájen provoz. Jmenovitý výkon elektrárny je 10 kW.[22]

Dle roční zprávy ERÚ z roku 2017 vzrostl instalovaný výkon od roku 2008 v ČR o 2 000 MW. Téměř 50 % z toho jsou elektrárny s instalovaným výkonem od 1 do 5 MW. Elektrárny do 10 kW tvoří 4 % z celkového instalovaného výkonu.[23] Podle dat mezinárodní agentury IRENA se však od roku 2013 instalovaný výkon nemění. Co se týče generované elektrické energie, agentura udává, že od roku 2011 do 2016 se roční výroba pohybuje mezi 2 000 a 2 300 GWh, ale mezi lety 2015 a 2016 nastal mírný propad. Všechny tyto údaje se týkají on-grid připojení.[24]

Další vývoj FVE v ČR je omezen prostorem, je nežádoucí využívat další zemědělskou půdu pro výstavbu fotovoltaických elektráren, naopak je záměr plochu do půdního fondu navracet. Instalace v příštích letech se předpokládají na střeších a budovách. V důsledku očekávaného nárůstu účinnosti se zvýší podíl vyrobené energie. Tento nárůst se očekává v letech 2025–2030 z důvodu vypršení životnosti stávajících panelů a nutnosti výměny. Očekává se i pokles cen panelů, což by zvýšilo míru návratnosti a to by mohlo znamenat vyšší atraktivitu pro zákazníka i bez příspěví dotací.[8][9]

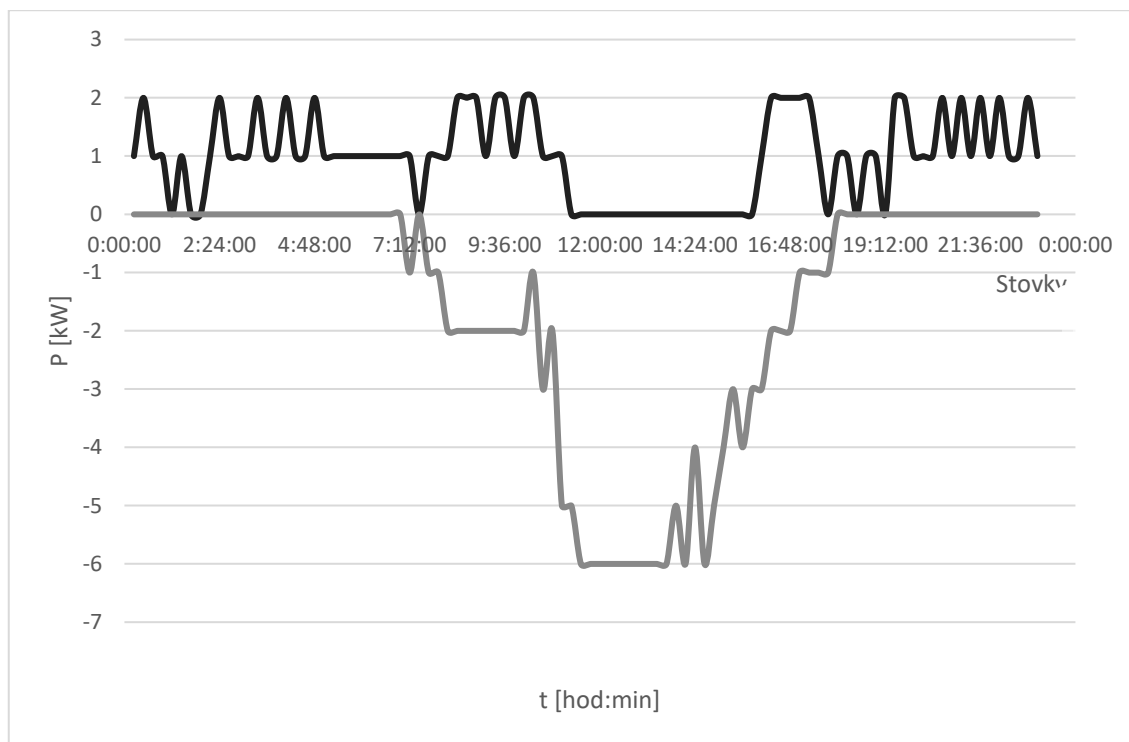
Domácí instalace

Fotovoltaická elektrárna může být i menšího měřítka, například jako instalace na střeše budovy. Energie pak může být spotřebováána rovnou v budově bez připojení do sítě, tzv. off-grid, nebo může do sítě být připojena, tzv. on-grid, a pak jsou případně přebytky dodávány do soustavy, zpravidla je to ale nyní zakázáno.

První dům se solárním systémem byl vystavěn v 80. letech 20. století Johnem Longem, jehož firma v roce 1988 vybudovala celý obytný blok v Phoenixu, který je napájen solární instalací na zemi. V 90. letech byl v Německu spuštěn „Program 1000 střeš“, který měl za cíl prosadit domácí střešní instalace. Projekt byl dále rozšířen v roce 1999 na „program 100 000 střeš“. Využití solárních panelů se tak dále rozšiřovalo i do dalších zemí, a to hlavně díky dotační politice. [25]

V dnešní době si lidé pořizují solární panely na střechu ze dvou hlavních důvodů. Tím hlavním je snížení množství odebírané energie ze sítě a tím finanční úspora. Pokud budeme uvažovat byt/dům o rozloze 100 m² a obývaný čtyřmi lidmi, můžeme odhadem říci, že při ohřevu teplé vody i topení elektřinou bude roční spotřeba 20 000 kWh.[26]

Pokud na střeche budou naistalovány panely o celkové ploše 30 m², celkově o výkonu 5 kWp, může být roční úspora až 4 900 kWh.[27] Dalším důvodem můžou být obavy z častějších výpadků sítě a snaha o vybudování energeticky soběstačného domu.



Obrázek 8 - Odběr + Dodávka FVE do sítě Rodinného domu, Zdroj: Měření RD

Na obrázku č. 7 je vidět průběh odebíraného výkonu ze sítě (černá) a výkon dodávaný do sítě (šedá) vyráběný fotovoltaické elektrárnou. Dodávaný výkon už jsou jen přebytky, které rodinný dům nespotřeboval. Je zde vidět, že v letních měsících, kdy při dnech s nízkou oblačností elektrárna dodává značný výkon, který rodinný dům všechen nespotřebuje. Data jsou udávána po 15 minutách, v oblastech, kde je zároveň odběr s FVE, se pravděpodobně vyskytla oblačnost. Pokud by nebyla možnost dodávat přebytky do sítě, bylo by nutné doplnit systém o akumulaci. V cestě k soběstačnosti domu je takovéto rozšíření nutné. Možnosti a druhy akumulace budou zmíněny v kapitole o akumulaci.

Elektromobilita

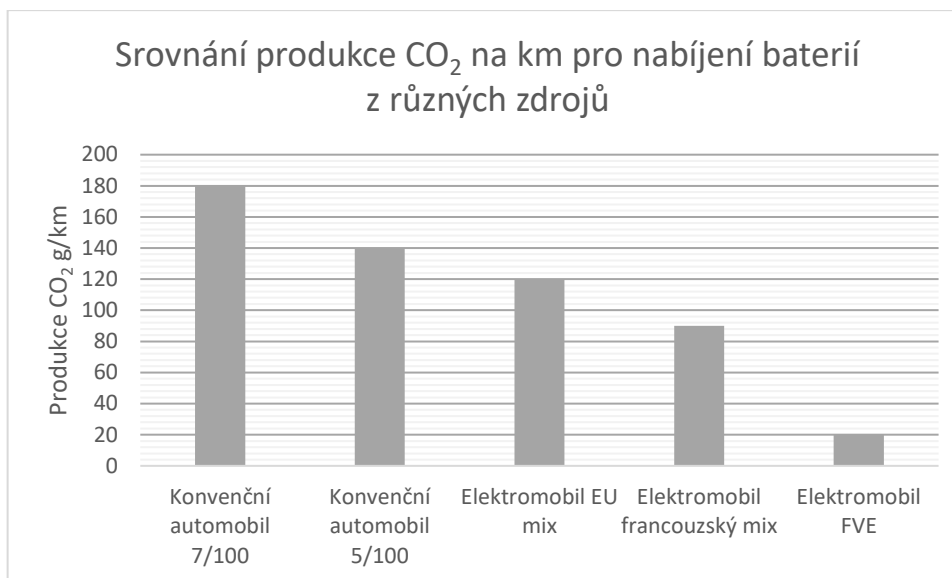
Význam slova mobilita je široký a ani do dneška není ustálený. Obecně lze říci, že jde o všechny aktivity spojené s přepravou zboží, osob a surovin. Z celkové světové spotřeby energie zhruba 30 % je využito na mobilitu. Největší podíl tvoří silniční doprava a automobily největší spotřebu. Do budoucna se očekává exponenciální nárůst počtu automobilů na světě i s ohledem na asijské země jako Indie a Čína. Zatím většina energie pro leteckou, lodní i automobilovou dopravu pochází ze spalování ropy. Ale tato ložiska nejsou nevyčerpatelná, odhady říkají, že ropa celosvětově vystačí přibližně na 30-50 let, pokud bude její spotřeba pokračovat v takové míře, jako doposud. Je tedy v zájmu všech států, aby hledaly jiná řešení. Existují úvahy, že by v budoucnu ropu

mohla nahradit uměle vyrobená z řas, což je ale stále ve fázi výzkumu a nelze na to spoléhat. Jedinou nyní reálnou možností je využití jiných paliv, jako je plyn anebo elektrická energie. Využití elektřiny s sebou přináší i částečné řešení druhého problému, zvyšující se produkci emisí CO₂. [28]

Tabulka a graf pod ní zobrazují produkci CO₂ při jízdě automobilem. V tabulce je vidět porovnání elektromobilu a klasického automobilu, kde je vidět, že elektromobil má menší hodnotu emisí, protože produkce při jízdě je nulová. Samozřejmě není možné říct, že elektromobily neprodukují vůbec žádné emise, protože při produkci samotné elektrické energie, kterou jsou vozidla poháněna, emise vznikají. Ovšem jen pokud jsou využité neobnovitelné zdroje. To je zobrazeno v grafu níže.

Tabulka 5 - Produkce CO₂ při jízdě automobilem, zdroj:[28]

		Well to Tank CO ₂ [g/km]	Tank to Wheels CO ₂ [g/km]	Celkové emise CO ₂ [g/km]
	Konvenční vozidlo:			
		25-35	90-180	115-215
	Elektrické vozidlo:			
EU-27 mix 2010	27 % Nukleární	85-105	0	85-105
	20 % Obnovitelné			
	53 % Fosilní			
Francouzský mix 2010	75 % Nukleární	20-25	0	20-25
	20 % Obnovitelné			
	5 % Fosilní			
Větší využití obnovitelných zdrojů	30% Photovoltaické články ve voze	18-22	0	18-22



Tabulka 6 - Srovnání produkce CO₂ na km pro nabíjení baterií, zdroj:[28]

Historie

První stroj, který lze považovat za elektromobil sestrojil Sibranius Stratingh ve třicátých letech 19. století. Na přelomu století se elektromobily rozšířily po USA. V Čechách sestrojil svůj první elektromobil František Křižík roku 1895. Jeho třetí model byl vlastně hybridem, protože zde zakomponoval i motor pohánějící dynamo, které dobíjelo akumulátory. Značnou výhodou bylo, že odpadly výdaje za tehdy velmi drahé pohonné hmoty a také omezení hluku a zplodin. Proti spalovacím motorům měly elektromobily díky jednoduchosti menší poruchovost. Jedním z důvodů, proč ale nepředčily používání spalovacích motorů, byla jejich dojezdová vzdálenost, proto byly považovány spíše za městská vozidla. Po vyřešení problémů s dodávkami benzínu silniční dopravou elektromobily téměř vymizely. Po roce 2000 přišla třetí generace elektromobilu. Současné automobily se konstrukčně podobají těm se spalovacím motorem, mají tedy jeden centrální pohon. V budoucnu se uvažuje o využití dvou až čtyř decentrálních pohonů.[29]

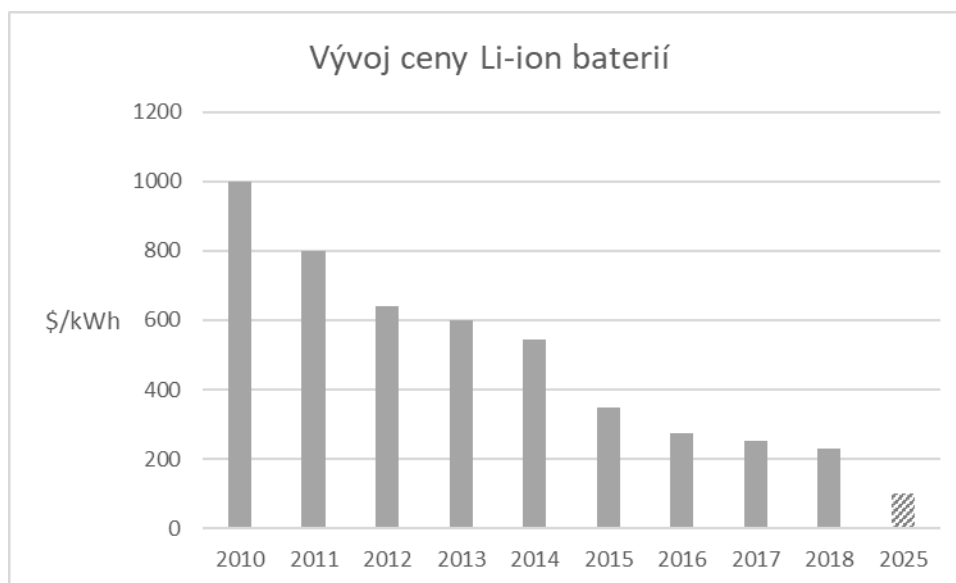
Energetický a automobilový průmysl se nyní na elektromobily zaměřuje, protože jsou částečným řešením pro lepší životní prostředí, jelikož využívá elektřinu jako nejčistší zdroj. Jediné produkované emise mohou být ze zdrojů výroby elektřiny, pokud je dodaná například z uhlé elektrárny. Tento problém odpadá, pokud se využívají obnovitelné zdroje. S malou dojezdovou vzdáleností oproti konvenčním automobilům je ideální pro dojíždění do práce. Jako podporu zavádění elektromobility existuje možnost bezplatného dobíjení na parkovištích, nižší sazby za povinné ručení, nižší silniční daň apod. Elektromobil lze výhodně využít ve spolupráci se smart grids. Dobíjení by probíhalo v době přebytků energie, elektromobil by byl tedy využit jako úložiště elektrické energie a při nedostatku by naopak mohl fungovat jako zdroj. Proto elektromobilita naskýtá hodně příležitostí pro energetiku. [30]

V případě samotných uživatelů je rozhodování spornější. Při porovnání jízdních vlastností elektromobilu a klasického automobilu je elektromobil jednoznačně výhodnější, nejvíce je to vidět na ceně za ujetý kilometr. Rozdíl cen je za současných nákladů na energii čtyřnásobný. Nejvýznamnějším problémem jsou akumulátory, jejich cena, kapacita a životnost. To všechno zatím vývoj a oblíbenost zpomaluje.

Vývoj ve světě

Podle Global EV Outlook 2017 bylo v roce 2016 celosvětově registrováno přes 2 miliony elektromobilů. Největší nárůst prodeje byl v roce 2015 a to o 70 %, v roce 2016 pak o 40 %.[31] I tak ale tvoří globální trh s elektrovozy pouze 2 % z celkového trhu s vozidly. Do roku 2040 se očekává nárůst na 52 % z celkového trhu.[32] Státy s největším podílem na prodejkách jsou Čína, Norsko, Nizozemí, Švédsko, Francie, Velká Británie a USA.[31]

Očekávaný nárůst podporuje i fakt, že klesá cena Li-ion akumulátorů. Jedním z důvodů poklesu je další vývoj v technologii a tím snížení míry využití vzácných kovů pro výrobu. Celkově roste produkce Li-ion akumulátorů s rostoucím počtem výrobních továren.[33]



Obrázek 9 - Vývoj cen Li-ion akumulátorů, Zdroj: [34]

Vývoj v ČR

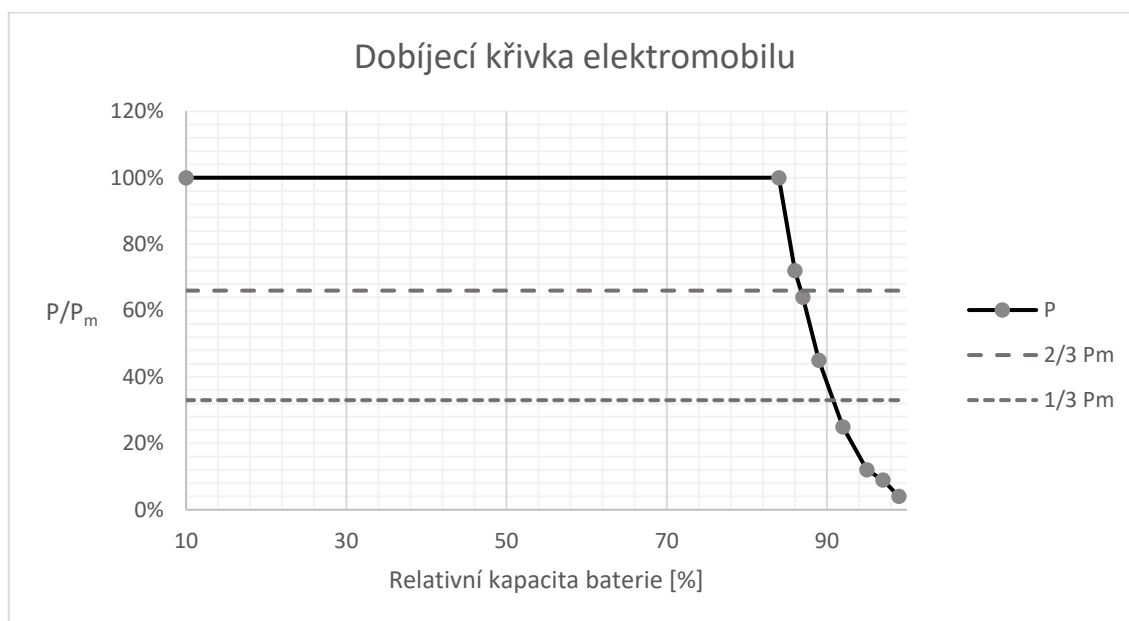
V ČR je nyní registrováno přes 3 200 elektromobilů a od roku 2020 se očekává exponenciální nárůst tak, že v roce 2025 jich bude registrováno kolem 115 000. K tomu přibude i čtyřikrát více nabíjecích stanic, než je v tomto roce.[32]

Velké plány do budoucna má i Hlavní město Praha. Hodlá rozšířit flotilu vozidel HMP o elektromobily a autobusy DPP by měly být nahrazeny elektrobusey. Samozřejmě je i podpora elektromobility v soukromém sektoru. Všechny tyto změny jsou v důsledku plnění snižování emisí a znečištění ve městech.[35]

Dobíjení elektromobilu

Dobíjení elektromobilu závisí na jeho modelu, jaká je v něm použitá baterie a také na druhu nabíječky. V domácnostech je častěji k nalezení nabíječka ze zásuvky 230 V, v rodinných domech lze najít i vícefázovou zásuvku na 16 A. Od toho se odvíjí délka nabíjení. Rychlonabíjení se v domácnostech očekává velmi zřídka, můžeme ho najít na veřejných dobíjecích stanicích.

Na obrázku níže je vidět průběh nabíjení akumulátoru v elektromobilu. Pro zjednodušení lze říci, že průběh je obdélníkový. Akumulátor bývá nabíjen konstantním proudem až do 80 % jeho kapacity, poté je proud snižován.



Obrázek 10 -Dobíjecí křivka elektromobilu, Zdroj: PREdi

V domácnostech se očekává dobíjení v časovém rozmezí od 14 hodin do půlnoci. V odpoledních hodinách přijíždějí lidé z práce a při předpokladu přiměřené dojezdové vzdálenosti, a tedy neúplného vybití akumulátoru lze očekávat, že do půlnoci bude elektromobil nabitý.

Akumulace

Když v sousedním Německu začne víc foukat vítr, větrné elektrárny na severu začnou generovat více energie, kterou je potřeba spotřebovat. Pokud ale není tak vysoká

poptávka, může nastat problém. Pokud tedy energii není kde spotřebovat, bylo by ideální jí někde skladovat a použít, když bude třeba. Ale není nutné ani chodit k tak krajnímu případu. Stačí se zaměřit na denní diagram zatížení ČR, kde v noci je spotřeba minimální a přes den jsou dvě velké špičky, jedna ráno a druhá odpoledne. V noci by tedy energie mohla být ukládána a přes den by v době největších špiček mohla být z úložiště spotřebována a nebylo by nutné zvyšovat výkony elektráren nebo některé zapínat. Nejvýhodnějším způsobem, který se zatím hojně využívá, je přečerpávací elektrárna. Dalšími možnostmi může být například ukládání elektrické energie ve formě tepla, ohřát vodu ve velkém výměníku a pak ji využívat k vytápění. Neznámějším způsobem je ukládání ve formě chemické, do akumulátorů.

Technologický plán pro oblast akumulace energie, který v roce 2014 vypracovala Mezinárodní energetická agentura (IEA) se zabývá požadavky v oblasti skladování energií, a to otázkou, jakou roli bude hrát akumulace energie při probíhající proměně energetických soustav. Ve studii se počítá s nyní využívanými technologiemi a představuje plány pro vývoj.[36]

Technologie pro akumulaci energie ukládají energii a po určité době ji mohou zpět dodat do soustavy nebo přímo koncovému spotřebiteli, pokud je třeba. Tento proces tak umožňuje překonat časové nebo geografické rozdíly mezi výrobou a spotřebou, to jak lokálně, tak i globálně.

V minulosti byly zdroje umožňující akumulaci energie instalovány především za účelem využití proměnné poptávky po energii. Protože z důvodu globálního oteplování je kladen důraz na snižování emisí CO₂ v energetice, stále se zvyšuje podíl obnovitelných zdrojů na celkové výrobě energie. Obzvláště u FVE a VTE je využívání akumulace více než důležité.

Technologie ukládání energie lze rozdělit podle:[10]

- požadovaného výkonu – okamžitý, záložní
- akumulací kapacity – malá, střední, velká
- fáze přeměny při akumulaci – homogenní, heterogenní
- počet cyklů – denní, týdenní, celoroční, nepravidelná
- forma ukládání energie – přímá, nepřímá
- rychlost a reakční rychlost u nabíjení/vybíjení – pomalá, rychlá

Akumulace je využívána ve všech energetických oblastech, v elektrizační soustavě, při zásobování teplem. Energii je možno uskladnit na různě dlouhou dobu v závislosti na potřebě. Uskladněnou energii lze dále využívat:[36]

- Sezónní uskladnění – Pokud jde energie uskladnit na libovolnou dobu, je možné například v létě, kdy mají solární elektrárny největší výkon, energii uskladnit a využít ji v zimě.
- Obchodování s uskladněnou energií – Velmi výhodné je, pokud se uskladňuje elektřina v čase, kdy není tak vysoká poptávka, tudíž její cena je malá. Při denní době, kdy se poptávka zvýší, stoupne její cena, a tedy lze uskladněnou elektřinu prodat draž.
- Regulace frekvence – Tuto funkci by využívala distribuční a přenosová soustava k udržení kvality dodávané elektrické energie

- Regulace napětí – Tuto funkci by využívala distribuční a přenosová soustava k udržení kvality dodávané elektrické energie
- Start ze tmy – Při výpadku části sítě a selhání všech podpůrných zařízení by hrozil blackout. Uložená energie by mohla sloužit k nastartování záložního zdroje a tím částečně obnovit dodávku, což by oddálilo blížící se kolizi sítě.
- Přesun spotřeby a snížení špičkového zatížení – Uložením by se dala vyhladit křivka denního diagramu zatížení.
- Spotřeba nepřipojená k soustavě (off-grid) – Spotřebitelé, kteří nejsou připojeni k soustavě, často využívají fosilní a intermitentní obnovitelné zdroje k získávání tepelné a elektrické energie. Akumulace energie zajišťuje možnost ekonomické a nepřetržité dodávky energie.
- Integrace intermitentních zdrojů energie – Větrné a fotovoltaické elektrárny mají velké výkyvy v závislosti na počasí a může se stát, že je přenosová soustava přetížena. Proto by se energie mohla využít k vyrovnání těchto zatížení.
- Využití odpadního tepla – Při mnoha procesech vzniká odpadní teplo, které by se dalo dále využívat. Pokud by v tu chvíli nebyla poptávka, uložilo by se do té doby, než by se dalo spotřebovat nebo využít k jinému procesu.
- Kombinovaná výroba elektřiny a tepla – Elektřina a teplo by byly uskladněny od doby výroby do doby, kdy by byly potřeba.

Vývoj technologií akumulace

Ukládání energie není neznámý koncept, ale co se týče konkrétních technologií, lze jej zařadit spíše do mladších odvětví, které se bude hodně vyvíjet. V oblasti ukládání energie ve větším měřítku jsou v dnešní době aktuálně v provozu přečerpávací elektrárny. Ve stádiu zkušebního provozu se nacházejí technologie jako různé druhy baterií – lithiové, NaS, ..., dále pomalu se točící setrvačníky a ukládání energie do stlačeného vzduchu. Ve stádiu výzkumu a vývoje se nachází vodíkové technologie, adiabatické stlačování vzduchu, SMES – ukládání do magnetického pole, superkapacity, rychlé setrvačníky nebo průtokové baterie. Další vývoj velmi závisí na financování výzkumných projektů.[36]

Elektromobilita jako akumulace

Pokud je elektromobil připojen do sítě, bylo by možné jej využít čistě jako akumulární zařízení. Bylo by pro to nutné řízení toků výkonů a spotřeby. V případě přebytků v síti by se elektromobily nabíjely, v případě nedostatku – výkonové špičky v denním diagramu zatížení, by baterie energii dodávala. I v případě, že by dům měl vlastní výrobu, např. FVE, nespotřebované přebytky energie by se ukládaly do baterií. Další možností akumulace by mohly opět být akumulátory pro elektromobily, které by ale byly uloženy ve stanicích, které by sloužily pro nabíjení a výměnu. Pro majitele elektromobilu by sloužily k výměně vybité baterie za nabitou a pro distribuční soustavu by šlo o akumulární jednotku s kapacitou až jednotky MWh. [37] Tato varianta je ale zatím z důvodu finanční nedostupnosti pouze na papíře.

Přístupy k výpočtům v distribuční síti

Pro výpočty sítě v ustáleném chodu je třeba znát činné a jalové výkony a dále parametry jednotlivých větví. Výsledkem výpočtu jsou pak napěťové poměry nebo ztráty na větvích. Výpočty se dělají pro maximální a minimální zatížení sítě. Síť popsaná činnými a jalovými výkony nelze popsat soustavou lineárních rovnic, je tedy popsitelná soustavou nelineární a pro řešení je třeba použít iterační metody.

Vychází se ze základních rovnic ustáleného chodu a ty lze sestavit metodou uzlových napětí nebo smyčkových proudů. Díky předpokladu souměrné soustavy i zatížení lze síť řešit jako jednofázovou.[38] V praxi se využívá metody uzlových napětí.

Pro výpočty je třeba znát impedance (admittance) všech prvků sítě, činný výkon v uzlech, které jsou definovány činným výkonem P a velikostí napětí U (PU uzel) a jalový výkon v uzlech, které jsou definovány výkony P a Q (PQ uzel). V této metodě jsou neznámými komplexní uzlová napětí a proudy. Poměry U a I v uzlech sítě jsou dány

$$(\hat{I}) = (\hat{Y}) \cdot (\hat{U}), \quad (1)$$

kde (\hat{Y}) je admitanční matice a (\hat{U}) je matice uzlových napětí. Admitanční matice je ve tvaru

$$\hat{Y} = \begin{pmatrix} -\hat{Y}_{11} & \cdots & \hat{Y}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Y}_{m1} & \cdots & -\hat{Y}_{mn} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Pro výkony v jednotlivých uzlech platí

$$\hat{S}_i = P_i + jQ_i = \hat{U}_i \cdot \hat{I}_i^* = \hat{U}_i \cdot (\sum_{j=1}^n \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j)^* \text{ pro } i, j = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Admitanci a napětí dále rozepíšeme

$$\hat{S}_i = \sum_{j=1}^n |\hat{U}_i| \cdot |\hat{U}_j| \cdot e^{j(\delta_i - \delta_j)} \cdot (G_{ij} - jB_{ij}) \text{ pro } i, j = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Tuto rovnici dále podle Eulerova vztahu upravíme na

$$\hat{S}_i = \sum_{j=1}^n |\hat{U}_i| \cdot |\hat{U}_j| \cdot [\cos(\delta_i - \delta_j) + j \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)] \cdot (G_{ij} - jB_{ij}), \quad (5)$$

z čehož lze vyjádřit činný a jalový výkon jako složka reálná a imaginární

$$\hat{P}_i = \sum_{j=1}^n |\hat{U}_i| \cdot |\hat{U}_j| \cdot [G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)], \quad (6)$$

$$\hat{Q}_i = \sum_{j=1}^n |\hat{U}_i| \cdot |\hat{U}_j| \cdot [G_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - jB_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)]. \quad (7)$$

Vzniklá soustava rovnic je nelineární a je proto nutné použít jednu z dvou níže popsanych iteračních metod. [38] [39] [40]

Gauss-Seidelova metoda

V této metodě je základem srovnání hodnot napětí stanovenými výpočtem a odhadem. Správnost odhadu se pak hodnotí velikostí rozdílů takto určených napětí. Pokud se hodnota nenachází v limitu požadované přesnosti, odhad a srovnání hodnot je třeba zopakovat.[41]

Základem je sestavení admitanční matice \hat{Y} . Dále je označen bilanční uzel sítě 1, kde známe napětí a fáze.

$$\hat{U}_1 = U_1. \quad (8)$$

Ostatní uzly jsou označeny jako zdrojové nebo odběrové a je u nich určen činný i jalový výkon. Neznámou je napětí U a jeho úhel δ . K tomu využijeme následující rovnice.

$$\frac{P_i - jQ_i}{3} + \hat{U}_i^* \sum_{j=1, j \neq i}^n \hat{U}_j Y_{ij} = Y_{ij} \hat{U}_i \hat{U}_i^*, \quad (9)$$

$$\hat{U}_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{3\hat{U}_i^*} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \hat{U}_j Y_{ij} \right) \quad i = 2, \dots, n, \quad (10)$$

$$\hat{U}_i^{(p+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{3\hat{U}_i^*} + \sum_{j=1}^{i-1} \hat{U}_j^{(p+1)} Y_{ij} + \sum_{j=i+1}^n \hat{U}_j^{(p)} Y_{ij} \right) \quad i = 2, \dots, n. \quad (11)$$

Rovnice (10) platí pro uzly typu PQ, pro uzly PU je jalový výkon neznámý a je třeba jej dopočítat.

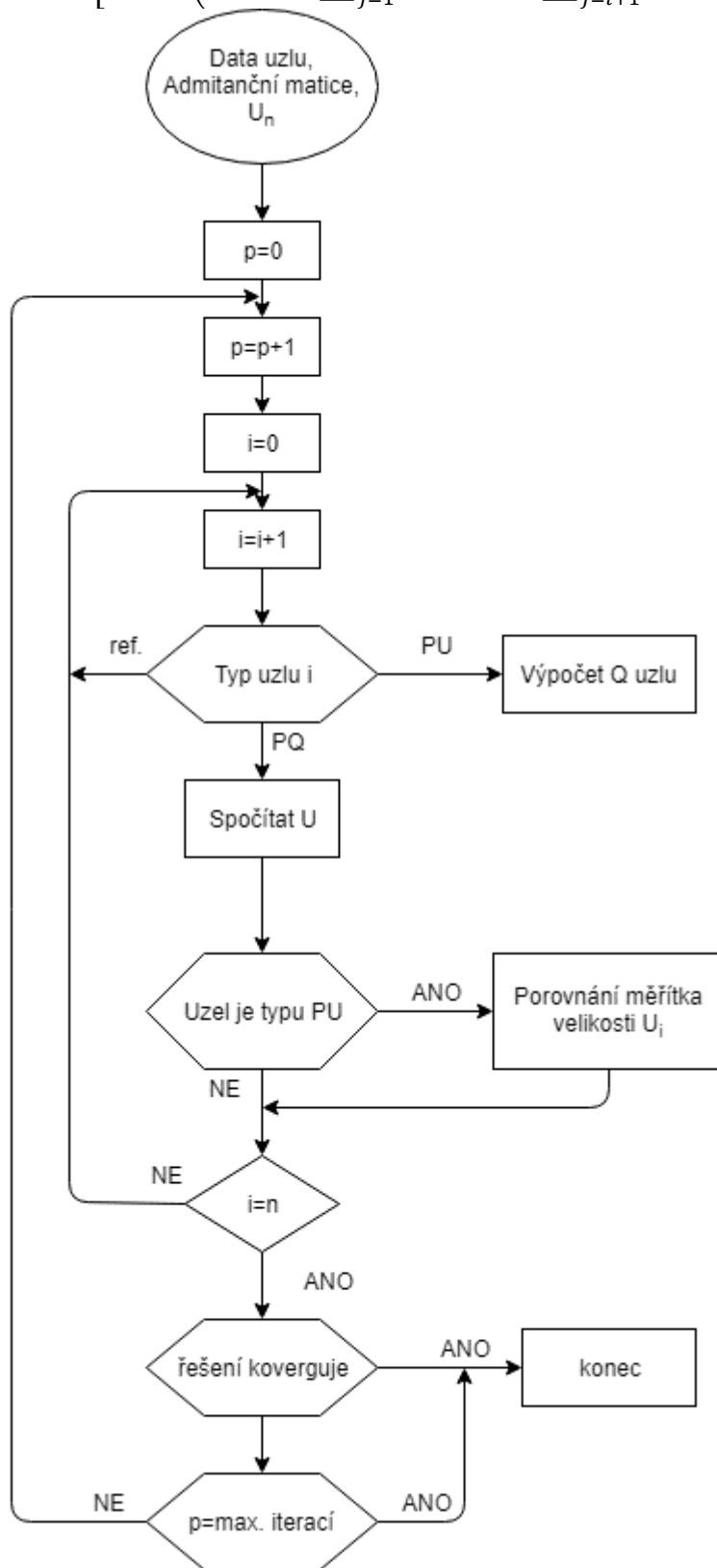
$$Q_i^{(p+1)} = 3Im \left[\hat{U}_i^{(p)} \left(\hat{I}_i^{(p)} \right)^* \right], \quad (12)$$

za proud dosadíme

$$\hat{I}_i = Y_{ii} \hat{U}_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} \hat{U}_j \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

a dostaneme

$$Q_i^{(p+1)} = 3Im \left[(\hat{U}_i^{(p)}) \left(Y_{ii} U_i^{(p)} - \sum_{j=1}^{i-1} U_j^{(p+1)} Y_{ij} - \sum_{j=i+1}^n U_j^{(p)} Y_{ij} \right)^* \right]. \quad (14)$$



Obrázek 11 - Vývojový diagram Gauss-Seidelovy metody, Zdroj:[39]

Newton-Rapsonova metoda

Metoda pro řešení nelineárního problému využívá algoritmus, kde při každé iteraci je nelineární rovnice aproximována rovnicí lineární.

$$\hat{F} \cdot (x^{(p-1)}) = -J(x^{(p-1)}) \cdot \Delta x^{(p)}, \quad (15)$$

$$\Delta x^{(p)} = x^{(p)} - x^{(p-1)}, \quad (16)$$

kde \hat{F} je vektor funkcí $f_1 \dots f_n$ neznámých $x_1 \dots x_n$ a J je čtvercová Jacobiho matice, kde je element ij je $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}$. [39]

Pro použití této metody je třeba sestavit pro každý PQ uzel dvě rovnice a jednu pro PU uzel. Pro referenční uzel není rovnice potřeba.

Z rovnic dostaneme uzly pro PQ rovnice

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0, \quad (17)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0. \quad (18)$$

Algoritmus pak vypadá takto

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{P}^{(p-1)} \\ \Delta \hat{Q}^{(p-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{H}^{(p-1)} & \hat{N}^{(p-1)} \\ \hat{J}^{(p-1)} & \hat{L}^{(p-1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(p)} \\ \Delta U^{(p)} \\ U^{(p-1)} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Za prvky Jacobiho matice dosadíme

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad N_{ij} = U_j \frac{\partial P_i}{\partial U_j} \quad J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad L_{ij} = U_j \frac{\partial Q_i}{\partial U_j}. \quad (20)$$

Tato matice není pro velké sítě obvykle hustě zaplněna, nenulové hodnoty jsou zde pouze v případě, že jsou uzly fyzicky propojeny.

Pokud parciálně zderivujeme základní rovnice, lze vypočítat prvky Jacobiho matice. [39]

Pro $i \neq j$:

$$H_{ij} = L_{ij} = U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}), \quad (21)$$

$$N_{ij} = -J_{ij} = U_i U_k (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}), \quad (22)$$

a pro $i = j$:

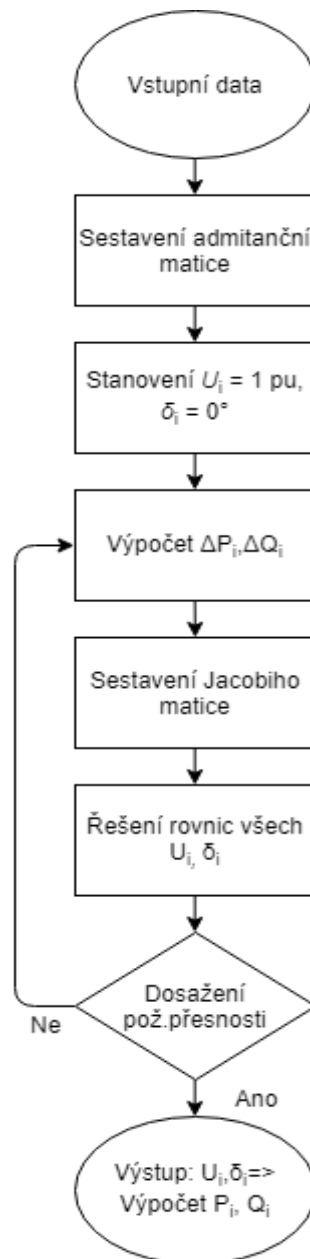
$$H_{ii} = -B_{ii} U_i^2 = Q_i, \quad (23)$$

$$J_{ii} = -G_{ii} U_i^2 + P_i, \quad (24)$$

$$N_{ii} = G_{ii} U_i^2 + P_i, \quad (25)$$

$$L_{ii} = -B_{ii} U_i^2 + Q_i. \quad (26)$$

Algoritmus je shrnut ve zjednodušeném vývojovém diagramu níže.



Obrázek 12 - Postup výpočtu Newton-Rapsonovou metodou, Zdroj:[42]

Pravděpodobnostní přístup

S očekávaným nárůstem decentralizovaných zdrojů jako fotovoltaické panely, elektromobily, akumulátory, mikrokogenerace nebo VTE, se je třeba vyrovnat s určitými problémy, které s sebou přinášejí v případě výpočtů chodu sítě. Problémy jsou dvojího druhu. Jedním z nich je špatná prediktabilita chování decentralizované výroby, protože ji její ovlivňuje více faktorů, než je specifické pro běžné výrobní zdroje a zátěž. Jedním z příkladů může být vliv počasí na výkon fotovoltaické elektrárny. Z hlediska návrhu distribuční sítě je hlavním problémem, že není možné vědět dopředu, jestli si zákazníci pořídí fotovoltaické panely na střechu nebo elektromobil. Z tohoto hlediska je velká variace možností, které je potřeba vzít v potaz. Dále se nabízí otázka, na jaký moment v roce síť dimenzovat. Obvykle se chod počítá a na zimní maximum. Ale v tomto případě by se dalo uvažovat i o stavu v létě, kdy fotovoltaika dosahuje svých maxim. Zdá se nutné všechny případy přepočítat, a to stavuje velké požadavky na výpočetní systémy. Řešením by byla změna přístupu k výpočtům chodu sítě.[43]

Protože k výpočtům nejsou dostupná přesná data, je možné chování zákazníka popsat pravděpodobnostmi. A to konkrétně hustotou pravděpodobnosti zátěže $f(l)$. [43] Dodaný, resp. odebíraný výkon lze popsat jako spojitou náhodnou veličinu. Toto pravděpodobnostní chování lze popsat distribuční funkcí. [44]

$$F(x) = P(X \leq x), \forall x \in R \quad (27)$$

Pokud distribuční funkci zderivujeme, dostaneme hustotu pravděpodobnosti náhodné proměnné x .

„Náhodná veličina X má rozdělení spojitěho typu, existuje-li nezáporná reálná funkce $f(x)$ taková, že pro x se dá distribuční funkce $F(x)$ vyjádřit ve tvaru

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt, -\infty < x < \infty. \quad (28)$$

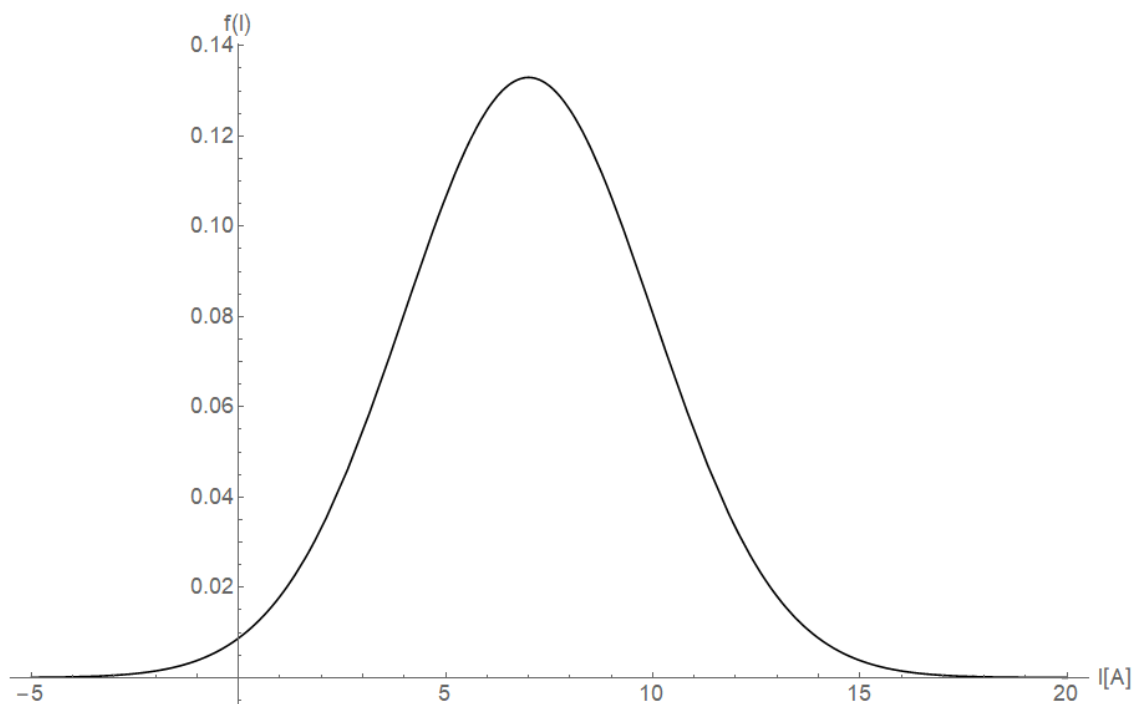
Funkce $f(x)$ se pak nazývá hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny X .“[44] Pro hustotu pravděpodobnosti platí

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (29)$$

Graf hustoty pravděpodobnosti má rozsah $<-\infty; \infty>$, což je ideální pro popis chování výkonu u zákazníka. Interval je dán hlavním jističem zákazníka.[43]

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{l_1} dl_1 = 1. \quad (30)$$

Oblast pod křivkou $f_{l_1}(l_1)$ reprezentuje pravděpodobnost, že náhodná proměnná leží v daném intervalu.



Obrázek 13 - Rozložení hustoty pravděpodobnosti, Zdroj: vlastní zpracování

Na hlavní ose grafu hustoty pravděpodobnosti jsou hodnoty odběru proudu I [A], na vedlejší ose hustota pravděpodobnosti $f(I)$. Hustota pravděpodobnosti zohledňuje dvě hlediska – náhodnost, s jakou zákazník odebírá nebo dodává výkon z/do sítě a váhu ovlivnění výsledné hustoty pravděpodobnosti. V případě, že je třeba zohlednit více vlivů, je to možné pomocí konvoluce.

Konvoluce je metoda, kterou lze zpracovat více vstupů najednou a zároveň je možné určit výstup systému, kde jednotlivým vstupům je přiřazena určitá váha. Výstup Y nabývá hodnoty v intervalu mezi $(\max(I_1)+\max(I_2))$ a $(\min(I_1)+\min(I_2))$ [45]

$$Y = I_1 + I_2 \leftrightarrow I_2 = Y - I_1. \quad (31)$$

Pokud je jednotlivým vstupům potřeba přiřadit jejich váha n , změní se rovnice takto[45]

$$Y = n_1 I_1 + n_2 I_2 + \dots + n_n I_n. \quad (32)$$

Jestliže jsou funkce f_{I_1} a f_{I_2} spojité, je možné konvoluci přepsat jako integrál. Za využití vztahu (30) a (31) dostaneme

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{I_1}(y - I_2) \cdot f_{I_2}(I_2) dI_2. \quad [43] \quad (33)$$

Výsledkem výpočtů je částečně napěťová a výkonová hustota pravděpodobnosti. Díky tomu je pak možné určit stupeň pravděpodobnosti pokrývající proudové a napěťové rozmezí v jednotlivých uzlech. Ze znalosti poměru v jednotlivých uzlech je pak možné určit výkonové toky v jednotlivých větvích pomocí tzv. PLF (Probability Load Flow), jehož výsledkem je hustota pravděpodobnosti proudu nebo výkonu.[43]

DC Load Flow

Pro zjednodušení výpočtů PLF využijeme DC Load Flow, což je metoda, která díky zanedbání jalového výkonu umožňuje řešit nelineární problém jako lineární. Zjednodušení lze provést za těchto předpokladů:[46]

1. Velikost činného odporu je zanedbatelná, tedy $R \ll X$
2. Úhlové rozdíly jsou minimální, platí $\sin \theta = 0, \cos \theta = 1$
3. Uzlová napětí jsou 1 p.j.

Tyto předpoklady platí v případě, že se řeší úloha pro síť VVN. V případě sítě NN je předpoklad 1 opačný, tedy $X \ll R$

Pro každý uzel lze psát

$$P_i = \sum_{j=1}^n B_{ij} \cdot (\theta_i - \theta_j), \quad (34)$$

kde B_{ij} je imaginární část admitanční matice (dle předpokladu 1) (V síti NN bude B_{ij} reálnou částí admitanční matice). Potom pro každou větev mezi uzly r a s platí

$$P_{Li} = \frac{1}{X_{Li}} (\theta_s - \theta_r), \quad (35)$$

kde X_{Li} je reaktance větve i . Přepsáním rovnic do maticového tvaru dostaneme

$$\mathbf{P} = \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\theta}, \quad (36)$$

kde \mathbf{P} je vektor výkonů $N \times 1$ pro jednotlivé uzly, $\boldsymbol{\theta}$ je fázový úhel v uzlu i a \mathbf{B} je admitanční matice sítě.

Protože matice \mathbf{B} je singulární, nelze ji invertovat. Proto zvolíme referenční uzel a vytvoříme submatici \mathbf{B}' , ve které je řádek a sloupec spojený s referenčním uzlem eliminovaný. To samé provedeme s vektory $\boldsymbol{\theta}$ a \mathbf{P} . Potom lze psát

$$\mathbf{P}' = \mathbf{B}' \boldsymbol{\theta}', \quad (37)$$

$$\boldsymbol{\theta}' = \mathbf{B}'^{-1} \mathbf{P}'. \quad (38)$$

Rovnici 35 lze přepsat do maticového tvaru takto

$$\mathbf{P}_L = \mathbf{H} \boldsymbol{\theta}'. \quad (39)$$

Matice \mathbf{H} je citlivostní matice linkových toků a je sestavena z parametrů sítě dle rovnic 35.

Po dosazení rovnice 38 do rovnice 39 dostaneme

$$P_L = H B^{-1} P'. \quad (40)$$

Součin matic H a B^{-1} nazveme maticí S , která představuje maticový síťový faktor, jinde známou jako Shift faktorovou matici. Tato matice udává vztah mezi toky větvemi a odběry v uzlech.[47][48]

$$P_L = S P'. \quad (41)$$

Při využití pravděpodobnostního přístupu jsou jednotlivé odběry v matici P' reprezentovány hustotami pravděpodobnosti.

Abychom mohli spočítat úbytky napětí, je třeba výkon přepočítat na proud. Protože v NN síti uvažujeme pouze činný výkon, lze jednoduše využít vztahu

$$P = 3 \cdot U I, \quad (42)$$

$$I' = \frac{P'}{3 \cdot 230 V}, \quad (43)$$

$$I_L = S I'. \quad (44)$$

Poté pomocí Ohmova zákona můžeme vyjádřit úbytky napětí.

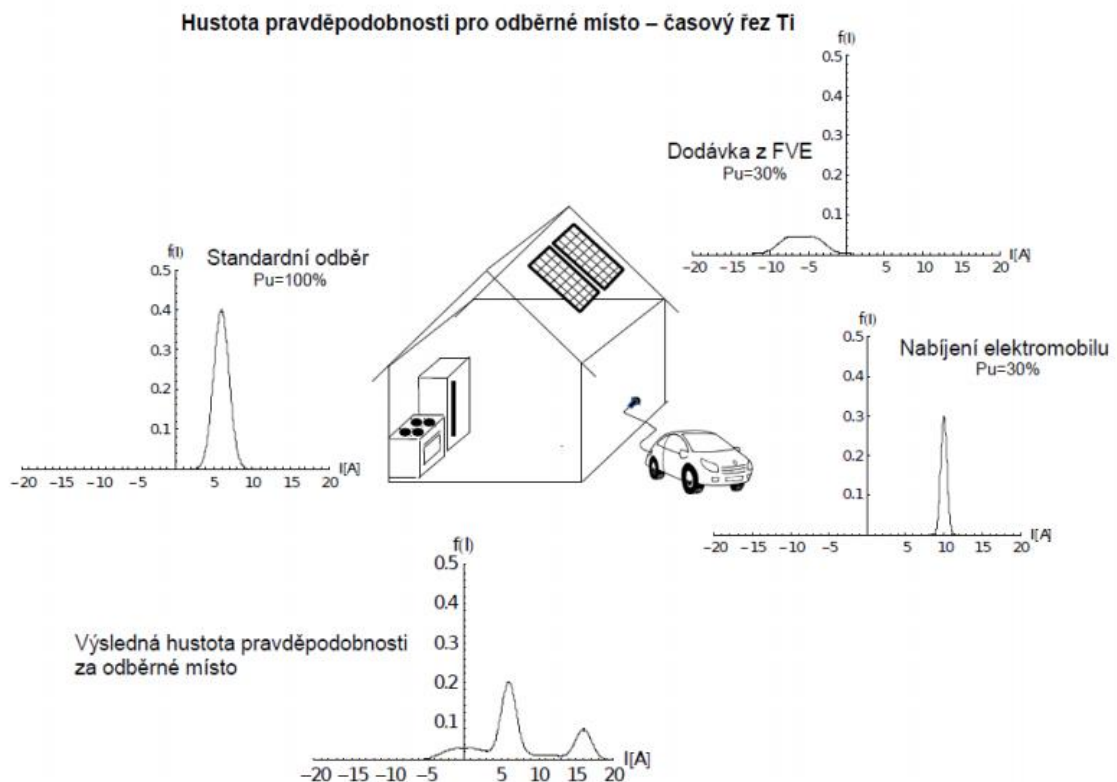
$$\Delta U' = Y^{-1} \cdot I'. \quad (45)$$

Pokud chceme získat napětí na jednotlivých uzlech, odečteme od hodnot U' $U_0 = 230 V$.

Aplikace výpočetních přístupů

Pravděpodobnostní model odběrného místa

Odběrná místa, se kterými budeme počítat představují rodinný dům s klasickým odběrem, který představuje hustota pravděpodobnosti Standardního odběru. Dále budeme uvažovat, že s určitou pravděpodobností (na obrázku 30 %) bude dům mít fotovoltaické panely na střeše. Jejich dodaný výkon představuje hustota pravděpodobnosti Dodávka z FVE. Posledním uvažovaným odběrem bude elektromobil, který dle obrázku je vlastněn s pravděpodobností 30 % a jeho odběr je popsán hustotou pravděpodobnosti Nabíjení elektromobilu. Když všechny tyto hustoty pravděpodobnosti zkonvolujeme, dostaneme hustotu pravděpodobnosti výsledného průběhu výkonu na odběrném místě.



Obrázek 14 - Model odběrného místa, Zdroj: [43]

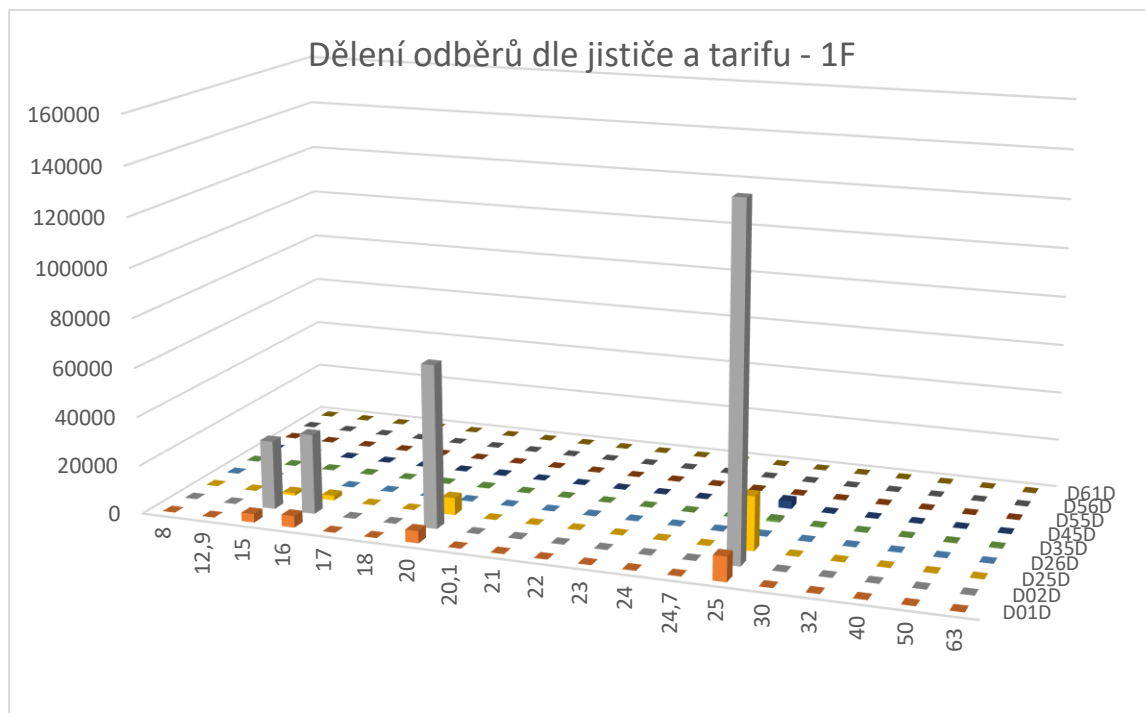
Výpočty a určení těchto hustot pravděpodobností je popsán v kapitole níže.

Výběr dat

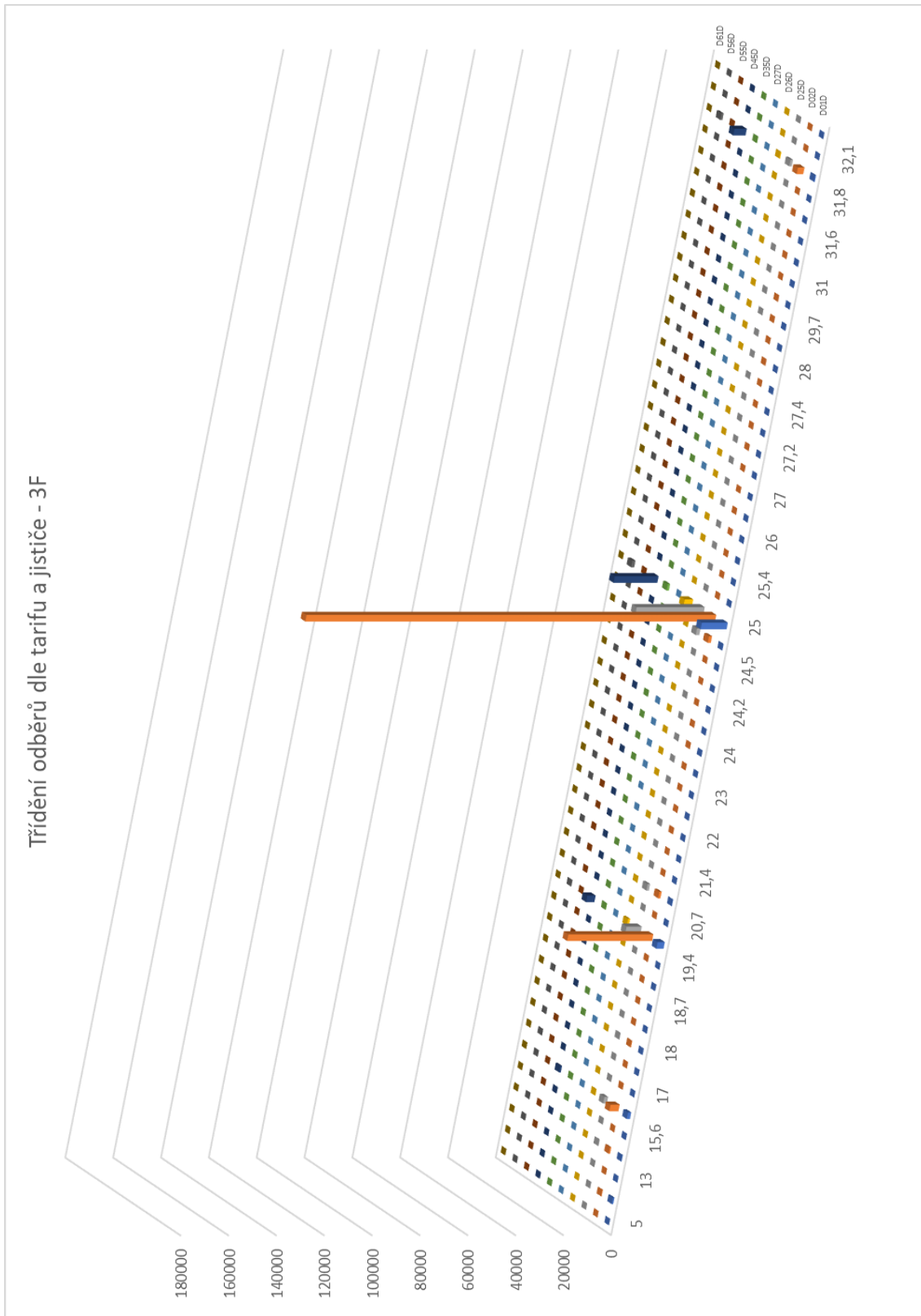
Pro vytvoření hustoty pravděpodobnosti odběru je třeba mít dostatečně široký statistický vzorek, aby data měla nějakou výpovědní hodnotu. K dispozici mi byla poskytnuta data ve tvaru odebíraný/dodávaný výkon (pokud dům měl FVE) v závislosti na čase. Protože odebíraný výkon závisí na velikosti odběrného místa, a tedy na velikosti

jističe, rozhodli jsme se určit, v jakých kategoriích je největší četnost odběrných míst. Třídění jsem provedla podle velikosti jističe a zároveň podle druhu tarifu. Dalším dělením bylo podle počtů fáze.

Z obou 3D grafů je vidět, že nejčetněji zastoupené jsou odběry s jističem 25 A s tarify D02 (u 1F šedou barvou, u 3F oranžovou) a D25 (u 1F žlutou, u 3F šedou). Oba grafy byly vytvořeny pro plný rozsah hodnot jističe, ale pro lepší přehlednost byly odstraněny hodnoty s nízkým až nulovým zastoupením v oblastech minimální a maximální hodnoty velikosti jističe.



Obrázek 15 - Třídění odběrů dle tarifu a jističe - 1F, Zdroj: vlastní zpracování

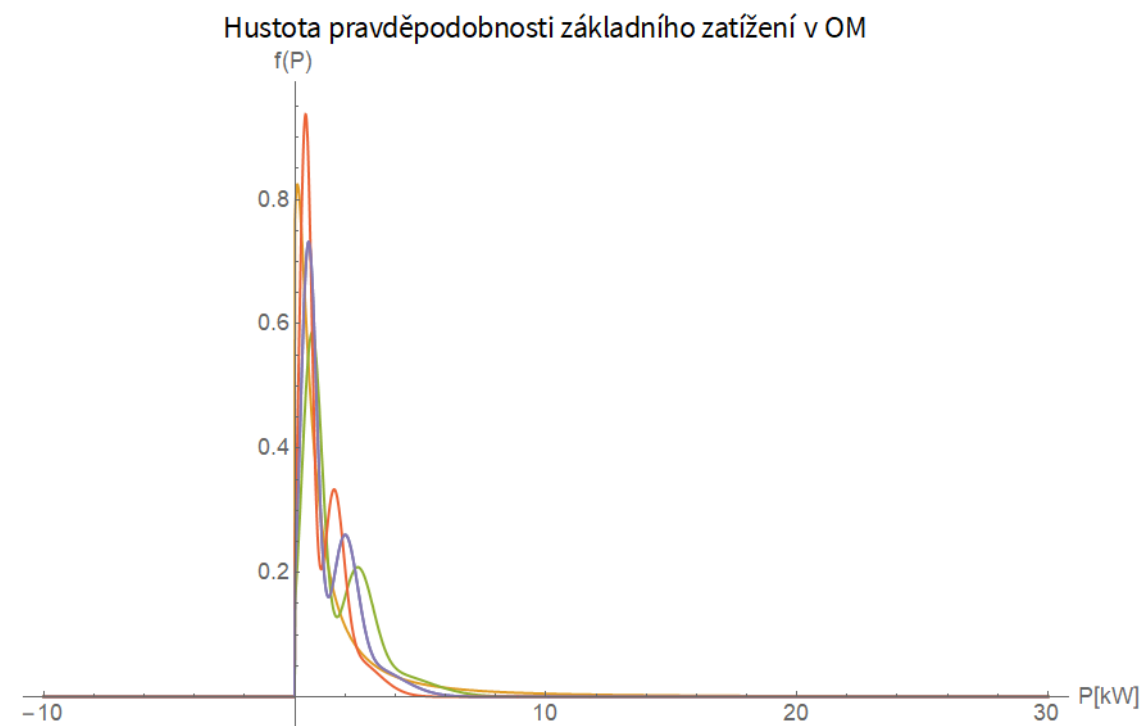


Obrázek 16 - Třídění odběrů dle tarifu a jističe - 3F, Zdroj: vlastní zpracování

Stanovení pravděpodobností

Odběr výkonu

Pravděpodobnost odběru výkonu byla stanovena z dat poskytnutých PREDi. K dispozici byly minutové nebo čtvrt hodinové údaje o odběrech na určitých místech. Odběrná místa byla roztržena dle počtu fází, typu jističe a druhu odběru. Z těchto hodnot byly vypočteny hodinové průměry v MS Excel a poté nahrány do Wolfram Mathematica. V jednotlivých hodinách byly určeny četnosti vyskytovaných se hodnot a vyneseny histogram s funkcí PDF – Probability Density Function, která z hodnot vytvořila hustotu pravděpodobnosti v časovém řezu, zde v 16:00. Tato funkce ale vykreslila průběh i do záporných hodnot – druhého kvadrantu, což je nežádoucí, klasické odběrné místo výkon pouze odebírá a ne dodává. Proto byl průběh vynásoben jednotkovým skokem, a tím hodnoty v druhém kvadrantu odstraněny.



Obrázek 17 - Hustota pravděpodobnosti zatížení jednotlivých RD

FVE

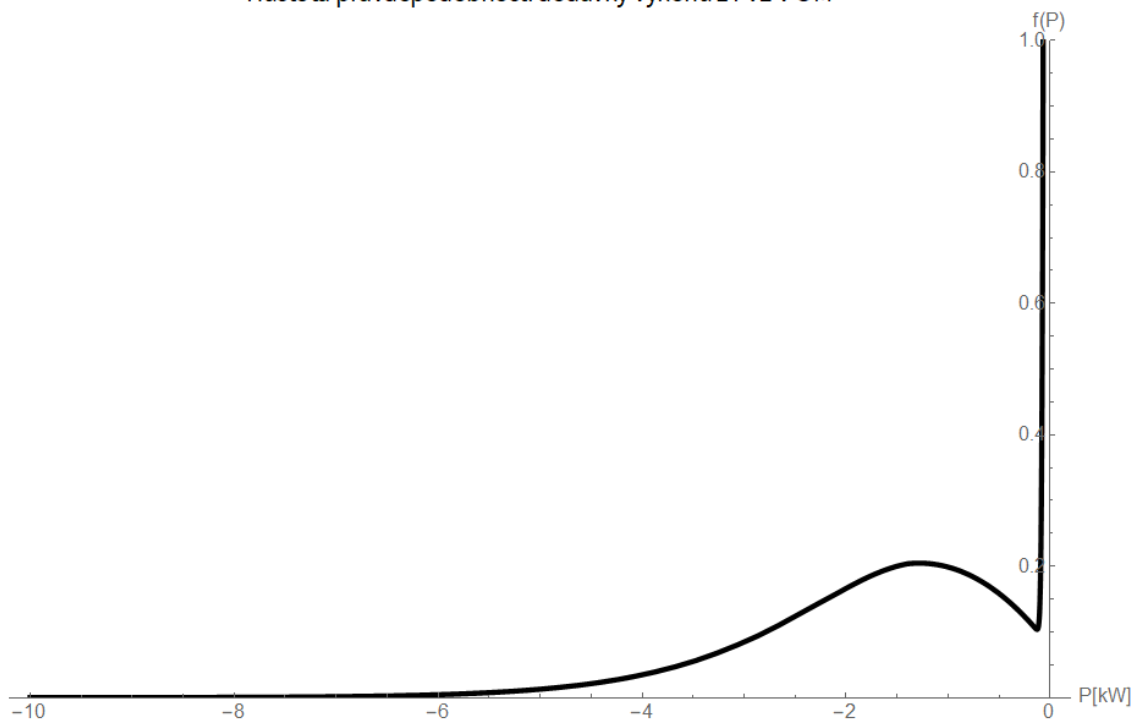
K určení pravděpodobnosti byla využita data z devíti solárních elektráren, které používají software Solar monitor¹. Díky němu může majitel FVE sledovat výkon své elektrárny online na jejich webové stránce. U některých bylo možné tato data v podobě hodinových průměrů za libovolné období získat. K hodnocení byla použita data z období

¹ <http://portal.solarmonitor.cz/>

duben–říjen. Zpracování bylo provedeno obdobně jako u odběru, výsledkem je histogram s hustotou pravděpodobnosti. Hodnoty jsou uvedeny jako záporné, aby bylo rozlišeno, že jde o dodání výkonu. Řez je udělán pro 16. hodinu. Vybrali jsme tuto hodinu, protože jsme potřebovali čas, kdy FVE vyrábí a elektromobil se dobíjí. To očekáváme právě odpoledne, protože slunce ještě svítí a zároveň se lidé vrací z práce a zapojují elektromobil do nabíjení. Protože hodnoty jsou normovány na instalovaný výkon, je třeba určit, jak velkou elektrárnu bude odběrné místo mít. V případě, že by existovala data, z kterých by se dala sestavit statistika, by se dala sestavit hustota pravděpodobnosti pro instalovaný výkon elektrárny. Tato data zatím nejsou, proto vezmeme předpoklad, že všechny elektrárny budou o instalovaném výkonu 7 kW (vybíráme hodnotu mezi 0 a 10 kW). Touto hodnotou vynásobíme průběh – roztáhneme osu x.

Pokud se data vykreslí v histogramu, všechny sloupce se nachází v druhém kvadrantu. Z důvodu dalšího zpracování byla ale použita funkce PDF, která vykreslí průběh hustoty pravděpodobnosti a tím se ale průběh dostane i do kladných hodnot. To ale u fotovoltaické elektrárny nepředpokládáme, FVE má výkon jen dodávat. Proto jsem funkci přenásobila jednotkovým skokem, abych hodnoty v prvním kvadrantu vynulovala.

Hustota pravděpodobnosti dodávky výkonu z FVE v OM



Obrázek 18 - Hustota pravděpodobnosti FVE v odběrném místě

Dále bylo třeba určit, s jakou pravděpodobností si zákazník FVE pořídí. V tomto případě jde pouze o odhad na základě statistických údajů. Podle ERÚ zaujímají solární elektrárny od 10 kW 4 % z celkové vyrobené energie FVE. [21] Dále je zaznamenáno 28 382 provozoven.

$$0,04 \cdot 28\,383 = 1\,125,28 \text{ provozoven do 10 kW.} \quad (46)$$

Podle Českého statistického úřadu bylo v roce 2011 v ČR:

Tabulka 7 - Počty budov v roce 2011, Zdroj:[49]

Rodinné domy	1 901 126
Bytové domy	214 760
Ostatní	42 233
Celkem	2 158 119

$$\frac{\text{počet provozoven do 10 kW}}{\text{Celkový počet rodinných domů}} = \frac{1\,125,28}{1\,901\,126} = 0,0006. \quad (47)$$

Pravděpodobnost pořízení FVE je tedy 0,06 %. S takto malým číslem by výsledné průběhy nebyly moc čitelné, vezmu proto pravděpodobnost pro rok 2040.

Počet rodinných domů budu uvažovat 2 mil. a počet provozoven do 10 kW 800 000. Zde vycházím z údaje, že v roce 2040 se očekává celkový instalovaný výkon 5 884 MW a z toho 4 001 MW bude instalováno do sítě NN. Odhadem jsem určila, že polovina budou provozovny do 5 kW a druhá polovina do 10 kW, tedy 200 000 a 400 000. Celkem bude tedy 800 000 provozoven.

$$\frac{\text{počet provozoven do 10 kW}}{\text{Celkový počet rodinných domů 2040}} = \frac{800\,000}{2\,000\,000} = 0,4. \quad (48)$$

Násobení průběhu hustoty pravděpodobnosti konstantou

Abychom započítali i pravděpodobnosti, že odběrné místo bude FVE mít, nabízí se daný průběh touto konstantou vynásobit. Vlastností hustoty pravděpodobnosti je, že plocha pod křivkou se rovná jedné. Pokud ji ale vynásobíme číslem jiným než jedna, integrál vyjde nejedničkový. Je třeba tedy vymyslet jiné řešení. Započítání pravděpodobnosti výskytu znamená, že celkový průběh se zmenší, ale aby byla plocha pod křivkou zachována, je třeba přidat nulové hodnoty.

Ideální by bylo stávající průběh vynásobit pravděpodobností a pak k funkci přičíst Diracovu funkci přenásobenou členem (1-pravděpodobnost výskytu). Diracova funkce je nekonečně úzká špička v 0 s hodnotou integrálu 1. U výpočtů jsme ale bohužel narazili na problém s numerickou integrací. Protože jako funkci konvoluce používáme její matematickou definici, není možné se bez numerických integrálů obejít. Pokud numericky integrujeme Diracovu funkci, numerický integrál ji přeskočí, protože v praxi nelze počítat s nekonečně malým krokem. Integrace tedy špičku Diracovy funkce přeskočí a dá na její místo 0.

Další možností je přičíst normálové rozdělení, které bude mít parametry takové, aby střední hodnota byla 0 a rozptyl takový, aby průběh byl co nejužší. Toto rozdělení opět vynásobíme (1- pravděpodobnost výskytu). V tomto případě je ale třeba useknout nežádoucí hodnoty v prvním kvadrantu, aby to nevypadalo, že FVE spotřebovává energii.

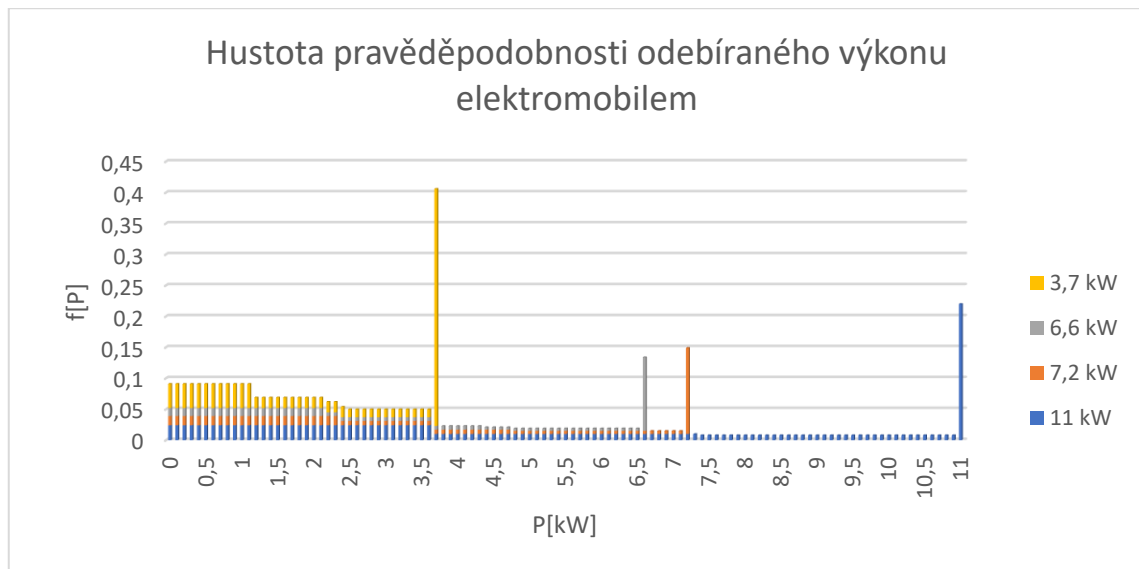
Elektromobilita

U elektromobility je určení pravděpodobnosti odběru složitější. K jejímu určení jsme vzali v potaz více faktorů: nabíjecí křivku elektromobilu, typy nejčastěji se vyskytujících elektromobilů a jejich nabíjecí výkon. S elektromobily Tesla se ve výpočtech není uvažováno z důvodu vyšších požadavků na nabíjecí výkon.

Tabulka 8 - Nejčastější zastoupení elektromobilů v ČR, Zdroj: PREdi

Model elektromobilu	Dobíjecí výkon [kW]	Počet registrovaných vozů
Volkswagen e-Golf	7,2	68
Nissan Leaf	6,6	58
BMW i3	11	109
Volkswagen e-Up!	3,7	36
PHEV	3,7	179

Podle nabíjecí křivky v kapitole Dobíjení elektromobilu (obr. 10) je vidět, že 84 % dobíjení je plným výkonem a poté výkon exponenciálně klesá. Tento pokles byl rozdělen na třetiny. Pokud se elektromobil nabíjí $P_{\max} = 3,7$ kW, pak 84 % doby nabíjení nabíjí tímto výkonem, 3 % času výkonem v intervalu $(3,7; 2,5 >$, 4 % času v intervalu $(2,5; 1,1 >$ a 9 % času v intervalu $(1,1; 0 >$. Pokud toto uděláme se všemi ostatními druhy elektromobilů s jinými P_{\max} , zjistíme, že se intervaly překrývají. Hodnoty jsou děleny pouze po desetinných. Poté je určena četnost u každé hodnoty, a nakonec je vypočítán poměr $\frac{\text{četnost hodnoty}}{\sum \text{všech četností}}$. Tím je získána hustota pravděpodobnosti odebíraného výkonu.



Obrázek 19 - Hustota pravděpodobnosti odebíraného výkonu elektromobilem, Zdroj: vlastní zpracování

V legendě grafu jsou popsány nabíjecí výkony vybraných typů elektromobilů.

Dále je třeba určit, s jakou pravděpodobností si domácnost elektromobil pořídí. Opět bude pravděpodobnost určena odhadem na základě těchto údajů: počet obyvatel v ČR, počet osob v domácnosti a počet registrovaných elektromobilů.

$$\frac{\text{počet registrovaných elektromobilů}}{\frac{\text{počet obyvatel}}{\text{počet osob v domácnosti}}} = \frac{1\,793}{\frac{10\,580\,000}{2,3}} = \frac{1\,793}{4\,500\,000} = 0,0004. \quad (49)$$

Tímto výpočtem získáme pravděpodobnost 0,04 %, že si domácnost pořídí elektromobil.

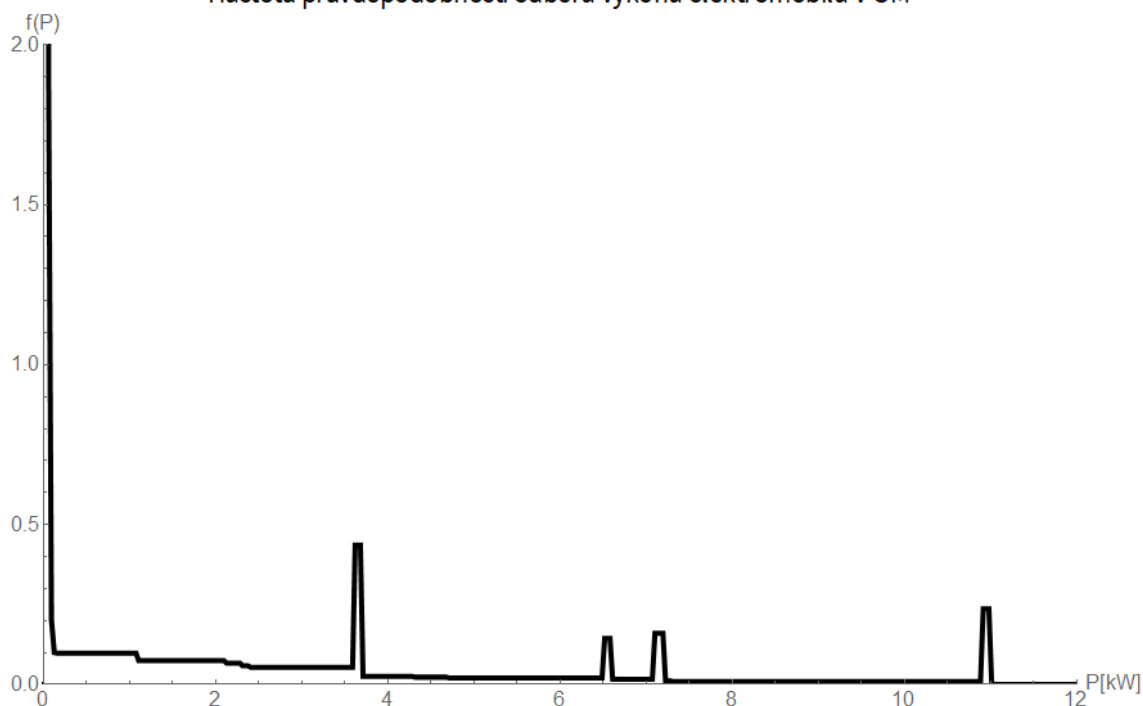
Bohužel s tímto malým číslem by výsledky byly velmi nepřehledné, vezmu předpokládaný počet registrovaných elektromobilů v roce 2040 přibližně mezi středním a vysokým scénářem nárůstu elektromobility. Předpokládám i mírný nárůst počtu obyvatelstva. Výsledek se pak změní takto:

$$\frac{\text{počet registrovaných elektromobilů 2040}}{\frac{\text{počet obyvatel 2040}}{\text{počet osob v domácnosti}}} = \frac{3\,700\,000}{\frac{11\,000\,000}{2,3}} = \frac{2\,391\,304}{4\,782\,608} = 0,5. \quad (50)$$

Pak vezmeme pravděpodobnostní křivku a vynásobíme ji hodnotou 50 % a dostaneme tak celkovou pravděpodobnost, že v domácnosti bude určitý odběr díky elektromobilu.

Po tomto násobení je třeba použít stejné metody úpravy jako u FVE, tedy přičíst normálové rozdělení tak, aby integrál celkové funkce byl stále jedna.

Hustota pravděpodobnosti odběru výkonu elektromobilu v OM

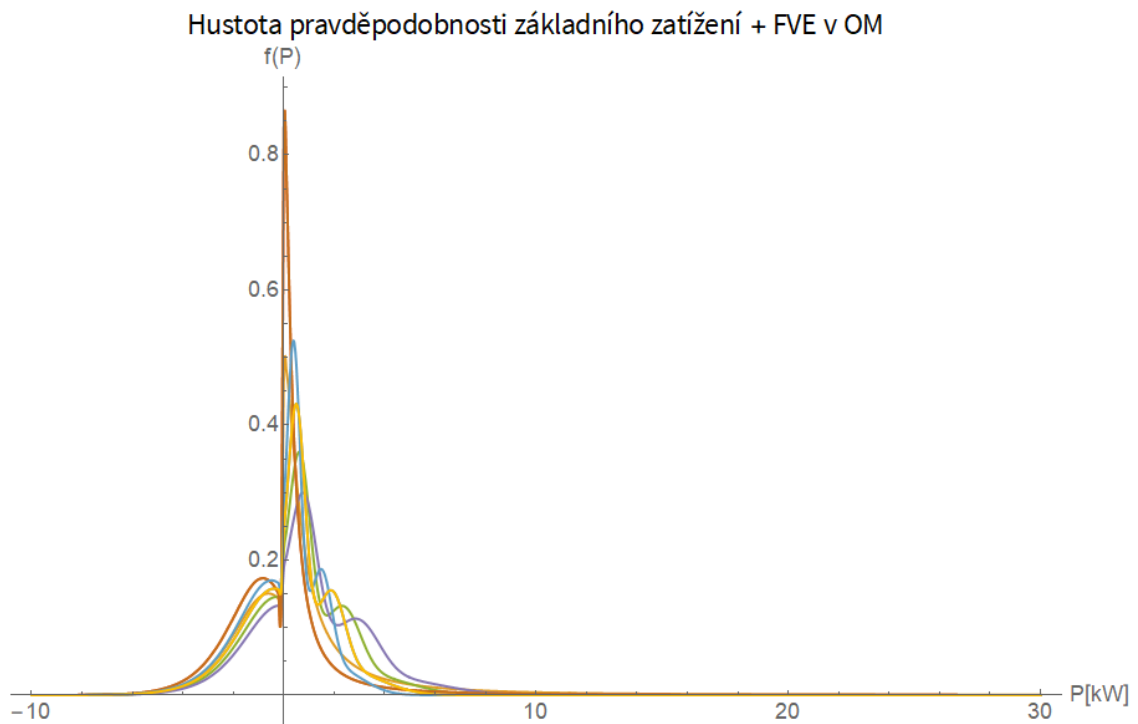


Obrázek 20 - Výsledná hustota pravděpodobnosti odběru elektromobilu

Konvoluce hustot pravděpodobností

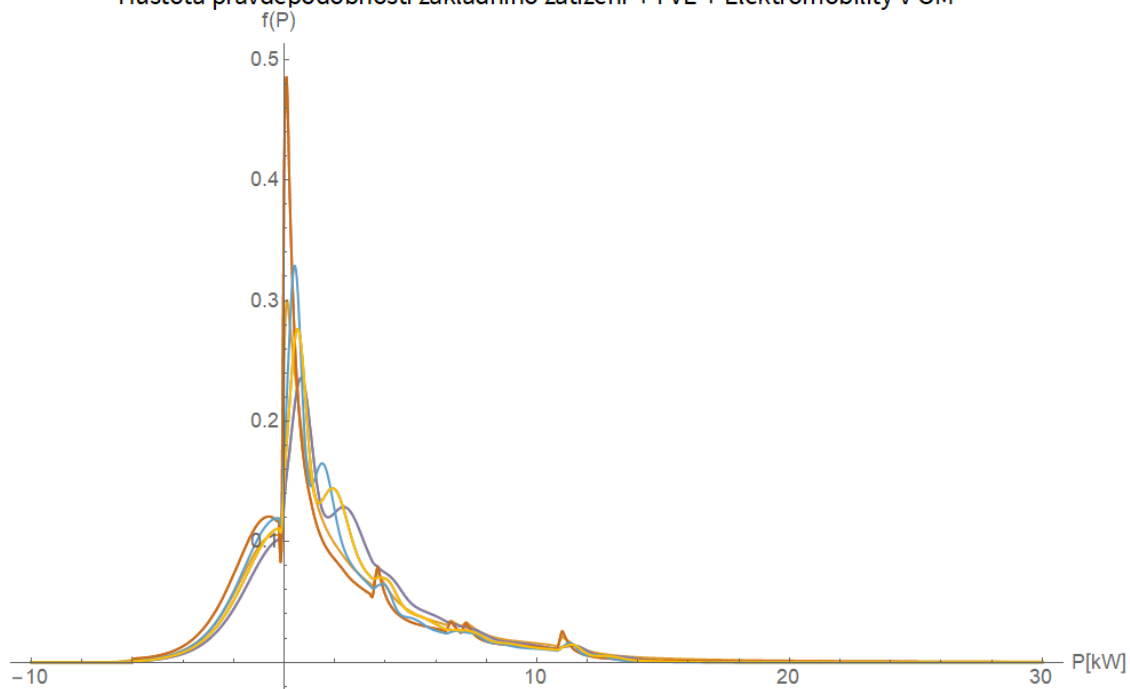
Hustoty pravděpodobnosti nejde sčítat klasicky, je třeba použít konvoluci. Pro konvoluci jednotlivých průběhů jsme použili její matematickou definici přes integrál.

Nejprve jsme provedli konvoluci jednotlivých odběrů s průběhem FVE a poté jsme výsledky zkonvolovali s průběhem elektromobility. V grafech jsou vyneseny průběhy pro všechna odběrná místa.



Obrázek 21 - Průběh konvoluce FVE + odběr

Hustota pravděpodobnosti základního zatížení + FVE + Elektromobility v OM

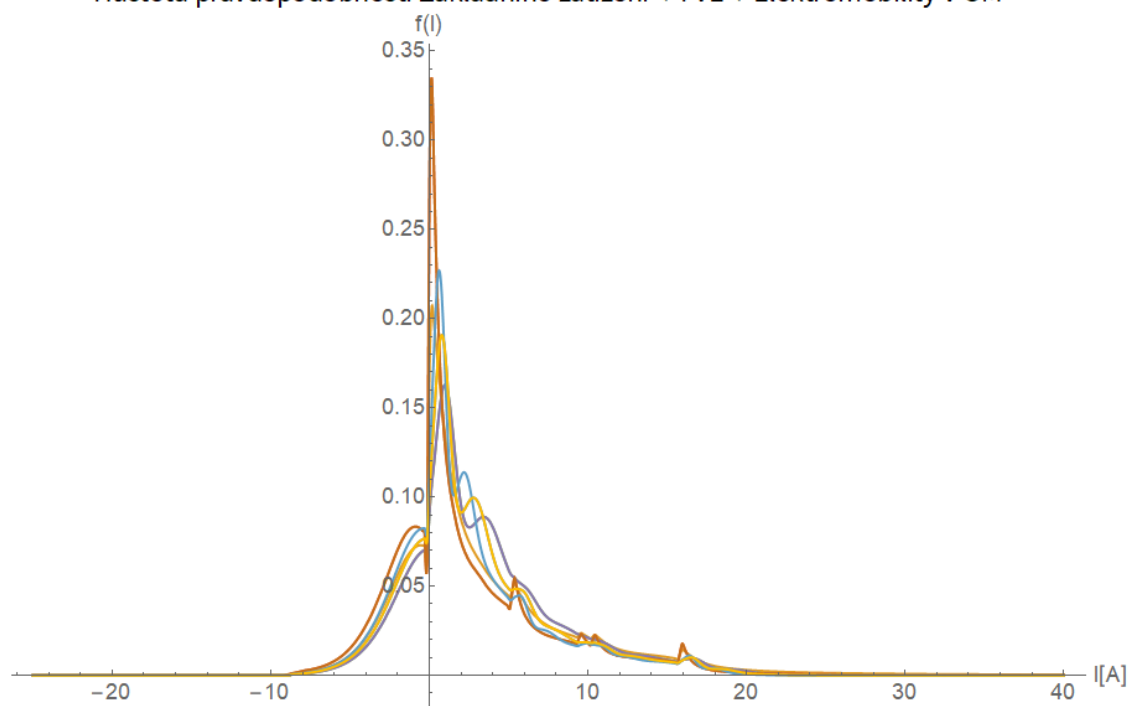


Obrázek 22 - Celková hustota pravděpodobnosti odběrných míst, průběhy výkonu

Grafy na obrázcích 20 a 21 jsou průběhy výkonu v kW. Pro další výpočty je třeba výkon přepočítat na proud.

Přepočítané průběhy jsou ukázány na obrázku 22 níže.

Hustota pravděpodobnosti Základního zatížení + FVE + Elektromobility v OM

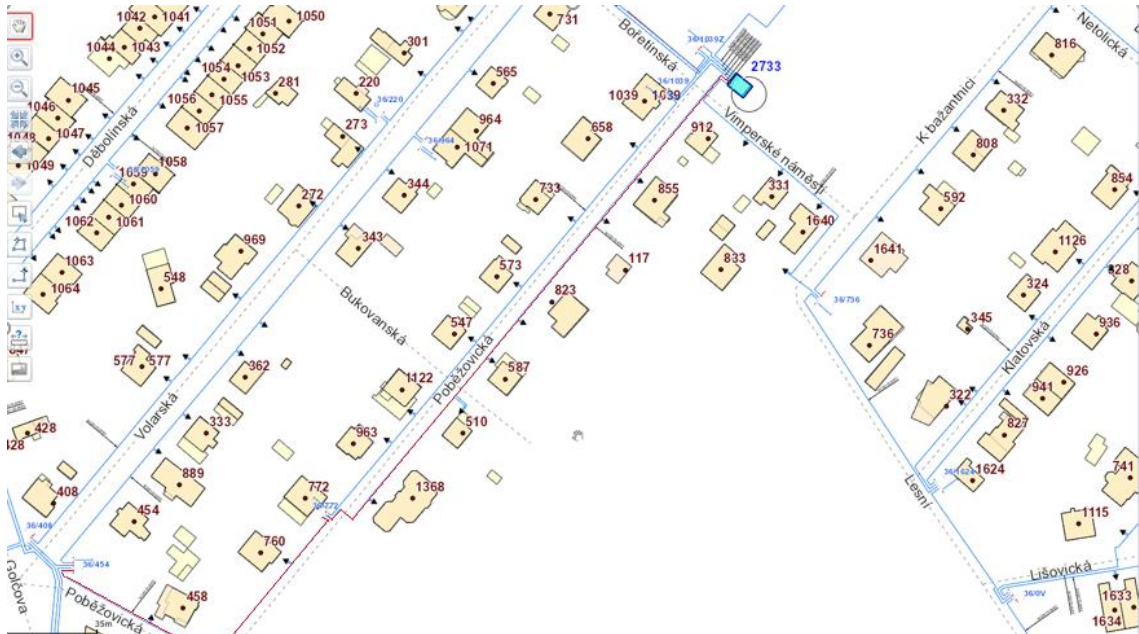


Obrázek 23 - Celková hustota pravděpodobnosti odběrných míst, průběhy proudu

Výpočet na reálném vývodu NN z distribuční transformační stanice VN/NN

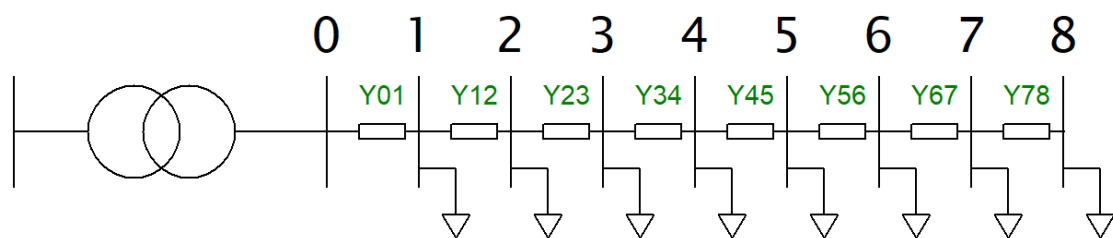
Popis vývodu

K výpočtu byla vybrána oblast v Kunraticích, vývod č.5 z TR 2733. Vývod má 8 odběrných míst. Pro další výpočty je předpokládáno, že všechna odběrná místa jsou rodinné domy.



Obrázek 24 - Mapa vybrané oblasti, Zdroj: PREDistribuce, a.s.

Každá větev je popsána parametry $R_0 \dots 8$ a $X_0 \dots 8$.



Obrázek 25 - Schéma sítě, vlastní zpracování

Tabulka 9 - Popis odběrných míst, Zdroj: PREdistribuce, a.s.

dTS	Vývod	Průřez kabelu [mm ²]	Vzdálenost od dTS [m]	Fáze	Jistič [A]	Tarif	Druh místa spotřeby	Uzel č.
2733	5	120	59	3F	32	D25	Rodinný dům	1
2733	5	120	136	3F	50	D02	Rodinný dům	2
2733	5	120	158	3F	50	D25	Rodinný dům	3
2733	5	120	186	3F	25	D02	Rodinný dům	4
2733	5	120	245	3F	50	D25	Rodinný dům	5
2733	5	120	271	3F	25	D02	Rodinný dům	6
2733	5	120	296	3F	25	D25	Rodinný dům	7
2733	5	120	372	3F	32	D25	Rodinný dům	8

Mezi jednotlivými odběrnými místy je položené kabelové vedení CYKY 3x120+70, měděné, které má parametry:

$$r = 0,257 \Omega/\text{km}$$

$$x = 0,070 \Omega/\text{km}$$

Pravděpodobnostní výpočet chodu sítě na vývodu NN

Sestavení admitanční matice B

Podle údajů z tabulky 7 a parametrů kabelového vedení můžu spočítat jednotlivé admitance vedení a sestavit admitanční matici. Nejprve je třeba přepočítat parametry vedení z Ω/km na Ω .

$$R_{01} = r \cdot l_{01} = 0,257 \cdot 0,059 = 0,0152 \Omega, \quad (51)$$

$$X_{01} = x \cdot l_{01} = 0,070 \cdot 0,059 = 0,0041 \Omega. \quad (52)$$

Admitanční matice vypadá takto:

$$\hat{Y} = \begin{pmatrix} \hat{Y}_{11} & \cdots & -\hat{Y}_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -\hat{Y}_{m1} & \cdots & \hat{Y}_{nm} \end{pmatrix}. \quad (53)$$

Na diagonále je součet admitancí v uzlu s kladným znaménkem a na ostatních pozicích jednotlivé admitance mezi uzly se znaménkem záporným. Po dosazení všech hodnot dostaneme matici:

0.0636319	-0.0636319	0	0	0	0	0	0	0
-0.0636319	0.112389	-0.0487569	0	0	0	0	0	0
0	-0.0487569	0.219406	-0.170649	0	0	0	0	0
0	0	-0.170649	0.304731	-0.134081	0	0	0	0
0	0	0	-0.134081	0.197713	-0.0636319	0	0	0
0	0	0	0	-0.0636319	0.208027	-0.144395	0	0
0	0	0	0	0	-0.144395	0.294567	-0.150171	0
0	0	0	0	0	0	-0.150171	0.19957	-0.0493984
0	0	0	0	0	0	0	-0.0493984	0.0493984

Obrázek 26 - Výsledná admitanční matice B , Wolfram Mathematica

Z této matice je potřeba pro další výpočty vytvořit matici redukovanou a to tak, že odstraníme sloupec a řádek týkající se referenčního uzlu. Zde je to uzel 0, odstraníme tedy první řádek a první sloupec.

0.0636319	-0.0636319	0	0	0	0	0	0	0
-0.0636319	0.112389	-0.0487569	0	0	0	0	0	0
0	-0.0487569	0.219406	-0.170649	0	0	0	0	0
0	0	-0.170649	0.304731	-0.134081	0	0	0	0
0	0	0	-0.134081	0.197713	-0.0636319	0	0	0
0	0	0	0	-0.0636319	0.208027	-0.144395	0	0
0	0	0	0	0	-0.144395	0.294567	-0.150171	0
0	0	0	0	0	0	-0.150171	0.19957	-0.0493984
0	0	0	0	0	0	0	-0.0493984	0.0493984

Obrázek 27 - Redukovaná admitanční matice B_{red}

Sestavení citlivostní matice linkových toků H

Tuto matici používáme při přepočítávání vektoru úhlu na vektor toku výkonů na linkách. Matice lze sestavit jednoduše z rovnic pro linkové toky.

$$P_{01} = (\theta_1 - \theta_0)Y_{01}, \quad (54)$$

$$P_{12} = (\theta_2 - \theta_1)Y_{12}, \quad (55)$$

$$\vdots$$

$$P_{mn} = (\theta_n - \theta_m)Y_{mn}. \quad (56)$$

Po roznásobení můžeme sestavit matici, která bude po redukování ($\theta_0 = 0$) vypadat takto:

$$\begin{pmatrix} 0.0636319 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0487569 & 0.0487569 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.170649 & 0.170649 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.134081 & 0.134081 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0636319 & 0.0636319 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.144395 & 0.144395 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.150171 & 0.150171 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0493984 & 0.0493984 \end{pmatrix}$$

Obrázek 28 - Redukovaná citlivostní matice linkových toků H_{red}

Podle vztahu 40 a 41 po vynásobení matic H a B , kdy B je invertovaná, dostaneme matici shift faktorů S , díky které pak dostaneme vztah mezi odběry a toky na linkách.

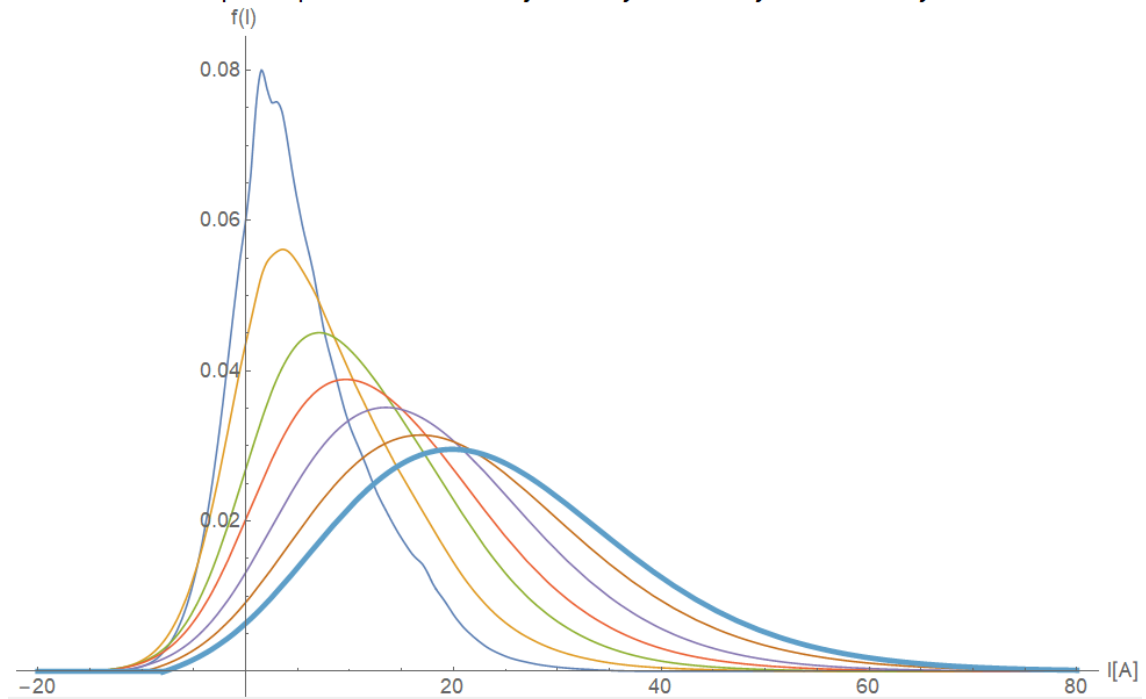
$$\begin{pmatrix} 1. & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. \\ 3.33067 \times 10^{-16} & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. \\ -8.88178 \times 10^{-16} & -8.88178 \times 10^{-16} & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. \\ 4.44089 \times 10^{-16} & 8.88178 \times 10^{-16} & 1.77636 \times 10^{-15} & 1. & 1. & 1. & 1. & 1. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 1. & 1. & 1. & 1. \\ 8.88178 \times 10^{-16} & 1.77636 \times 10^{-15} & 1.77636 \times 10^{-15} & 2.66454 \times 10^{-15} & 1.77636 \times 10^{-15} & 1. & 1. & 1. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 1.77636 \times 10^{-15} & 1. & 1. \\ 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. & 0. \end{pmatrix}$$

Obrázek 29 - Matice Shift faktorů S

Pravděpodobnostní výpočty toků na větvích sítě

Dalším krokem je výpočet toků na větvích sítě. Protože síť je jednoduchá bez paralelních větví, jde o sčítání, což v případě pravděpodobnosti musíme opět provést konvolucí. Podle obrázku 24 je vidět, že odběr č.8 je zároveň zatížení na větví 78, a zatížení na větví 67 je součtem zatížení na větví 78 a odběru 7. Po provedení sedmi konvolucí jsme průběhy zatížení vynesli do grafu. Tučně je vyznačeno zatížení na první větví 01, tedy i zatížení transformátoru. Z hlediska dalšího plánování obnovy a rozvoje je toto místo nejslabším článkem, protože zatížení zde dosahuje nejvyšších hodnot.

Hustota pravděpodobnosti zatížení jednotlivých kabelových úseků na vývodu

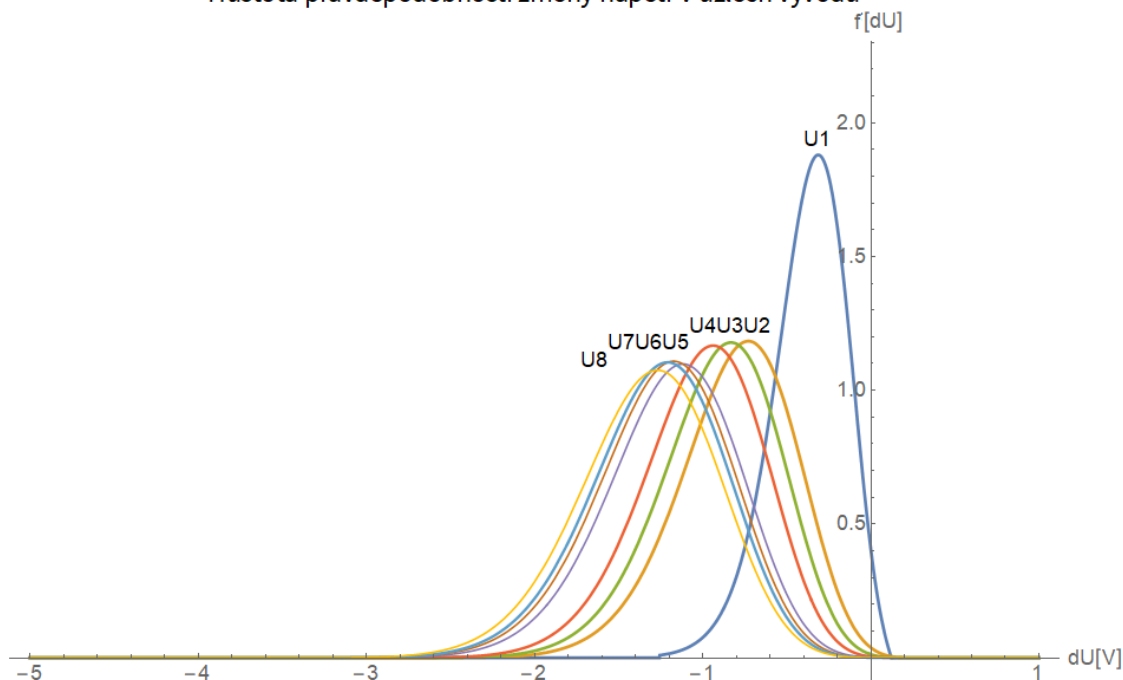


Obrázek 30 - Průběhy zatížení na jednotlivých větvích

Pravděpodobnostní výpočet úbytku napětí v síti

Při znalosti parametrů sítě a pravděpodobnostního průběhu proudu na jednotlivých větvích lze vypočítat úbytky na jednotlivých větvích a dále pak úbytky, které způsobují jednotlivé odběry. Z průběhů je vidět, že může dojít k záporné i kladné změně napětí. Úbytky způsobí klasický odběr (odběr + elektromobil), příbytky dodávání výkonu do sítě (FVE).

Hustota pravděpodobnosti změny napětí v uzlech vývodu



Obrázek 31 - Hustota pravděpodobnosti úbytků napětí v uzlech vývodu

Deterministický výpočet

Pro deterministický výpočet je třeba stanovit odběr každého rodinného domu a s tím dále počítat. Nevýhodou těchto výpočtů je nutnost spočítat všechny varianty odběrů, tedy kombinace FVE, elektromobility a odběru. Pro srovnání stanovíme dva extrémní případy, pro které provedeme výpočet. Budeme počítat se dvěma scénáři.

Scénář 1

Scénář 1 bude představovat slunný den, FVE tedy pojede na plno, odběr domu bude minimální a elektromobil se nebude nabíjet. U FVE jsme v pravděpodobnostním výpočtu stanovili pravděpodobnost 40 %, že dům bude mít FVE, využijeme to i zde. Elektrárnu umístíme na tří libovolných domů z osmi. Výkon elektromobility bude 0 kW a odběr domu stanovíme všude na 1 kW. Tyto odběry sečteme a dostaneme celkový výkon na odběrném místě. Následně vypočítáme odběrový proud. Kladné znaménko znamená, že systém výkon odebírá, záporné, že dodává výkon do sítě.

Tabulka 10 - Tabulka odběrů pro scénář 1, Zdroj: vlastní zpracování

	RD1 ₃₂	RD2 ₅₀	RD3 ₄₀	RD4 ₂₅	RD5 ₅₀	RD6 ₂₅	RD7 ₂₅	RD8 ₃₂
FVE [kW]	-7	0	0	-7	0	0	-7	0
Elm [kW]	0	0	0	0	0	0	0	0
Odběr [kW]	1	1	1	1	1	1	1	1
Celkem P [kW]	-6	1	1	-6	1	1	-6	1
Celkem I [A]	-8,70	1,45	1,45	-8,70	1,45	1,45	-8,70	1,45

Odběrové proudy dále umístíme do vektoru odběrů a přes Shift faktorovou matici **S** dostaneme proudy na linkách.

Vektor odběru I' dosadíme do vztahu

$$I_L = S I', \quad (57)$$

$$I_{L1} = S \cdot \begin{pmatrix} -8,7 \\ 1,45 \\ 1,45 \\ 1,45 \\ -8,7 \\ 1,45 \\ -8,7 \\ 1,45 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -18,85 \\ -10,15 \\ -11,6 \\ -13,05 \\ -14,5 \\ -5,8 \\ -7,25 \\ 1,45 \end{pmatrix} \text{ A,}$$

a dostaneme proud tekoucí větvemi. Proudů větvemi se postupně od posledního odběrného místa až transformátoru sčítají, vedení mezi prvním odběrným místem a transformátorem je nejvíce zatíženo. Záporné znaménko značí, že výkon není ze sítě odebírán, nýbrž dodáván.

Pokud chceme vypočítat úbytky napětí vytvořené jednotlivými odběry, použijeme tento vztah

$$\Delta U = [B_{red}]^{-1} \cdot I', \quad (58)$$

$$\Delta U_1 = [B_{red}]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -8,7 \\ 1,45 \\ 1,45 \\ 1,45 \\ -8,7 \\ 1,45 \\ -8,7 \\ 1,45 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,30 \\ -0,50 \\ -0,57 \\ -0,67 \\ -0,90 \\ -0,94 \\ -0,99 \\ -0,96 \end{pmatrix} \text{ V.}$$

Změna napětí je zde záporná, jde tedy o příbytky, což je následek dodávaného výkonu do sítě z odběrných míst.

Scénář 2

Scénář 2 představuje den se zataženou oblohou, FVE tedy výkon nedodává, ale všechny elektromobily na vývodu se nabíjí a odběr domů bude vyšší. Pro elektromobilitu jsme stanovili pravděpodobnosti 50 %, že ji bude dané odběrné místo vlastnit, proto umístíme tyto odběry ke čtyřem domům a vybereme nejhorší variantu a umístíme je na konec vývodu. Každý rodinný dům může mít jinou velikost jističe, která se odvíjí od instalovaného výkonu domu, proto jsme stanovený odběr 2 kW pro 25A jistič vždy přenasobili poměrem velikosti jističe ku 25A jističi. Velikost daného jističe je v tabulce jako dolní index názvu odběrného místa.

Tabulka 11 - Tabulka odběrů pro scénář 2, Zdroj: Vlastní zpracování

	RD1 ₃₂	RD2 ₅₀	RD3 ₄₀	RD4 ₂₅	RD5 ₅₀	RD6 ₂₅	RD7 ₂₅	RD8 ₃₂
FVE [kW]	0	0	0	0	0	0	0	0
Elm [kW]	7,20	0	3,70	0	11,00	0	3,70	0
Odběr [kW]	2,56	4,00	3,20	2,00	4,00	2,00	2,00	2,56
Celkem P [kW]	9,76	4,00	6,90	2,00	15,00	2,00	5,70	2,56
Celkem I [A]	14,14	5,80	10,00	2,90	21,74	2,90	8,26	3,71

Opět provedeme stejné výpočty jako u předchozího scénáře.

$$I_{L2} = S \cdot \begin{pmatrix} 14,14 \\ 5,8 \\ 10 \\ 2,9 \\ 21,74 \\ 2,9 \\ 8,26 \\ 3,71 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 69,45 \\ 55,31 \\ 49,51 \\ 39,51 \\ 36,61 \\ 14,87 \\ 11,97 \\ 3,71 \end{pmatrix} \text{ A.}$$

Výpočet ukazuje, že první větev mezi transformátorem a prvním odběrem je zatížena nejvíce.

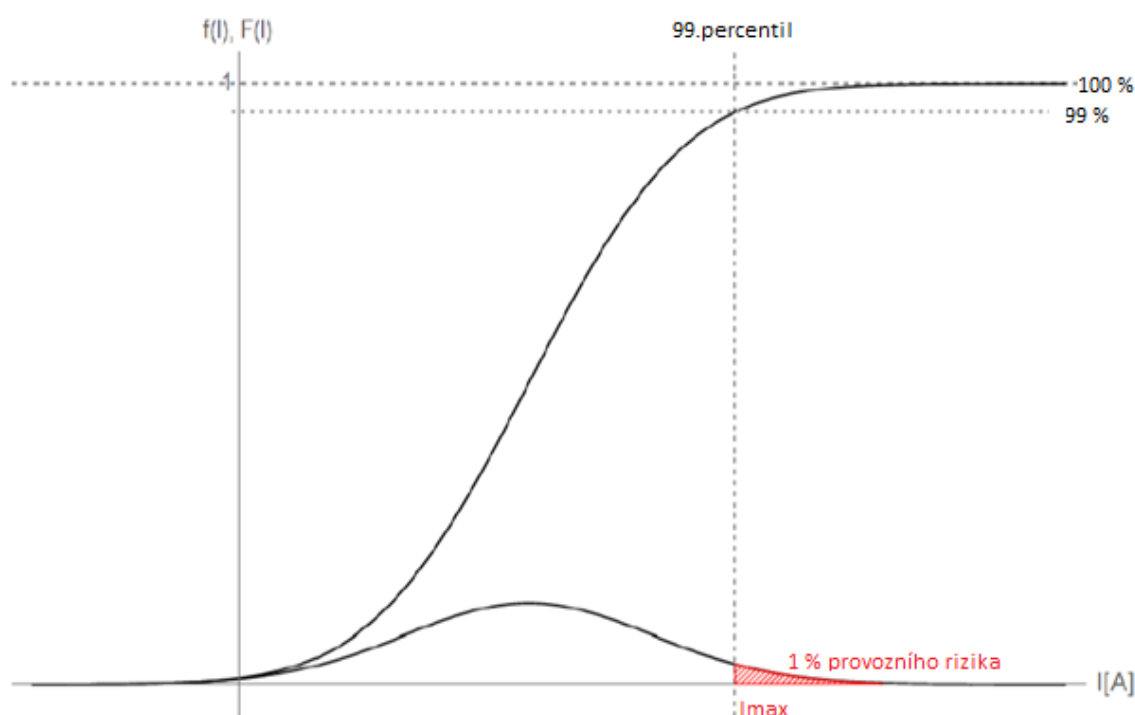
Úbytky napětí pro tento scénář budou vypadat takto

$$\Delta U_2 = [B_{red}]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 14,14 \\ 5,8 \\ 10 \\ 2,9 \\ 21,74 \\ 2,9 \\ 8,26 \\ 3,71 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,09 \\ 2,23 \\ 2,52 \\ 2,81 \\ 3,39 \\ 3,49 \\ 3,57 \\ 3,64 \end{pmatrix} \text{ V.}$$

U změny napětí je tomu opačně, úbytky napětí se se vzdáleností od transformátoru zvětšují, nejvyšší úbytek najdeme v posledním uzlu 8.

Porovnání pravděpodobnostního a deterministického přístupu

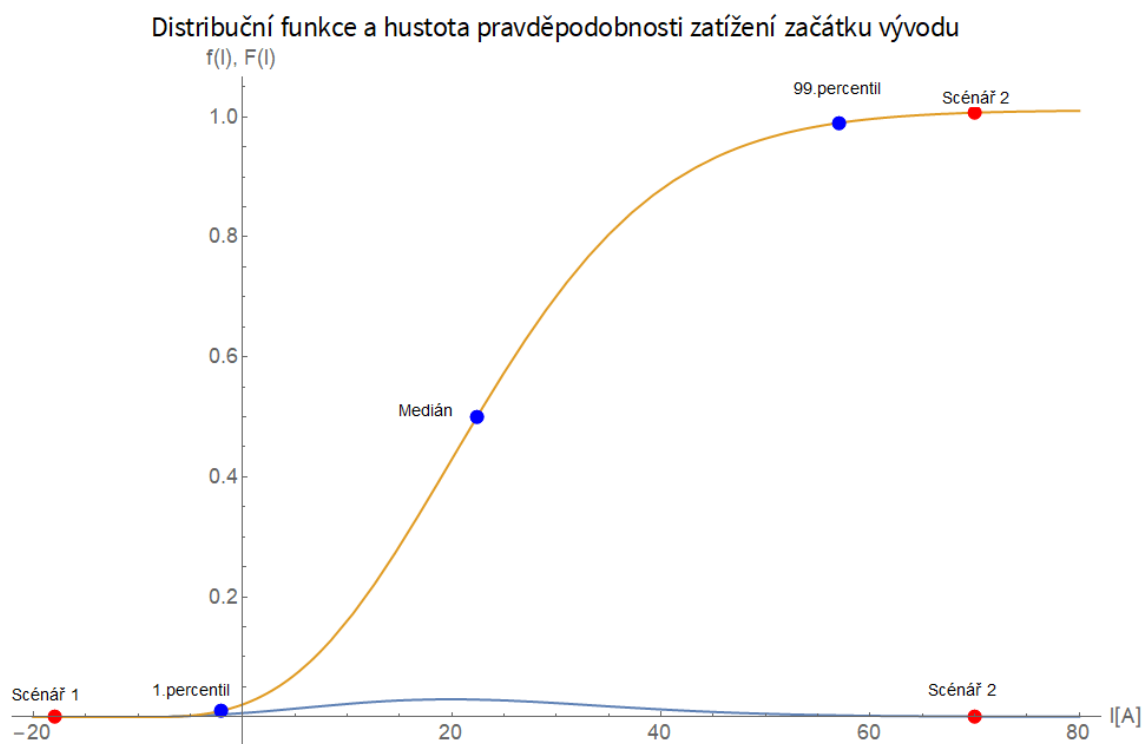
Při vyhodnocování pravděpodobnostních výpočtů určujeme, s jakou pravděpodobností nastanou určité případy, zde hladina zatížení. V obrázku níže je zobrazena hustota pravděpodobnosti obecného zatížení spolu s distribuční funkcí. Vyznačený 99. percentil říká, že ve 1 % pravděpodobnosti nastane případ s hodnotou zatížení vyšší než I_{\max} (omezený velikostí transformátoru a průřezem kabelového vedení) a s 99 % nižší. Tato hranice provozního rizika by byla pro každý prvek a každou soustavu různá.



Obrázek 32 - Vyhodnocování pravděpodobnostního přístupu, vlastní zpracování

Je potřeba, aby proud vývodem nepřekračoval I_{\max} a aby fluktuace napětí nepřekročila povolených $\pm 10\%$.

1. Pravděpodobnost překročení $I_{\max} > 1\%$ → posílení vývodu/transformátoru
2. Pravděpodobnost překročení $U_{\min} > 1\%$ → posílení vývodu/transformátoru
3. Pravděpodobnost překročení $U_{\max} > 1\%$ → posílení vývodu/transformátoru



Obrázek 33 - Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti zatížení začátku vývodu

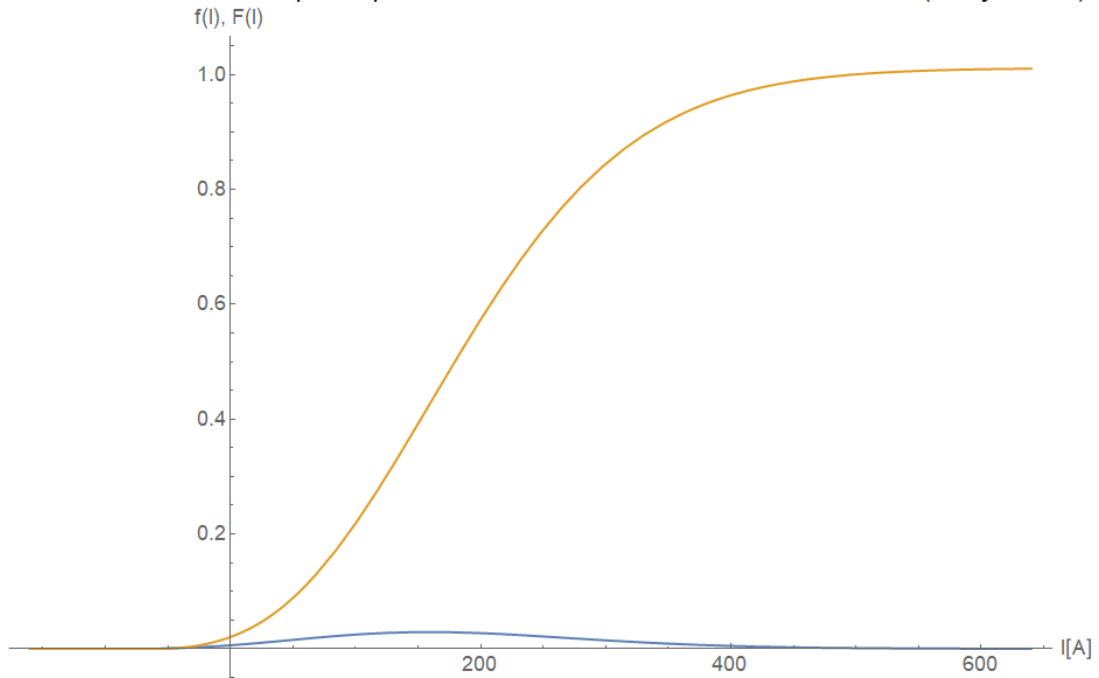
V obrázku 34 už jsou vyneseny konkrétní průběhy hustoty pravděpodobnosti zatížení na začátku vývodu, jeho distribuční funkce a pak oba scénáře z deterministických výpočtů. Dále jsou zde zobrazeny percentily.

- 1.percentil = -2,052 A
- 50.percentil (medián) = 22,441 A
- 99.percentil = 56,995 A

Z obrázku je vidět, že oba scénáře by nastaly s pravděpodobností menší než 1 %. Při přesnějším výpočtu vyšla u scénáře 2 pravděpodobnost 0,5 %. U scénáře 1 vyšla hodnota menší než 0,5 %.

Transformační stanice má z pravidla osm vývodů, pokud tedy vezmeme začátek vývodu a vynásobíme osmkrát, dostaneme celkové zatížení transformátoru při předpokladu, že vývody budou podobné až identické.

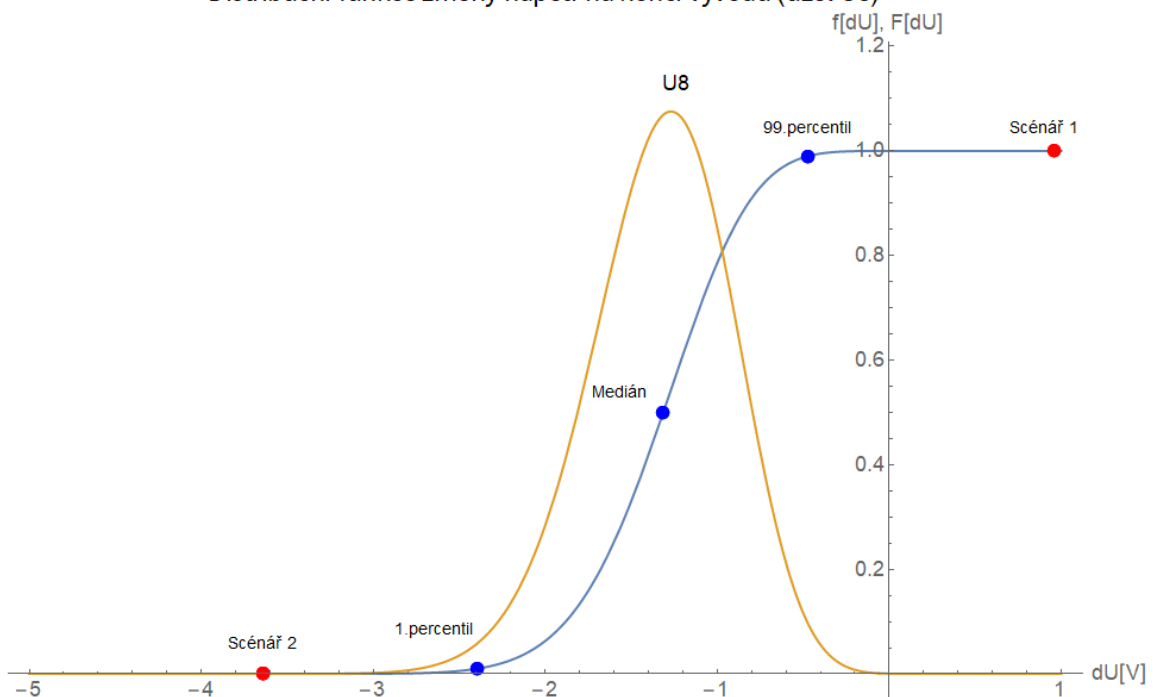
Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti zatížení distribučního transformátoru (8 x vývod NN)



Obrázek 34 - Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti zatížení transformátoru s osmi vývody

Stejně porovnání lze udělat i při výpočtech úbytků napětí. Největší úbytek napětí je na konci vývodu, který je označen č. 8. Do jednoho grafu jsme vynesli křivky hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkci. Body představují hodnoty změny napětí v uzlu 8 pro scénáře vypočítané klasickým výpočtem. Zde vyšla pravděpodobnost, že tyto scénáře nastanou natolik malá, řádově 10^{-5} %, že ji spíše považujeme za numerickou chybu výpočtu.

Distribuční funkce změny napětí na konci vývodu (uzel U8)



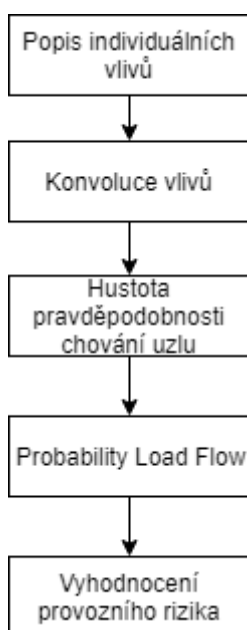
Obrázek 35 - Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti úbytku napětí na konci vývodu

- 1.percentil = -2,396 V
- 50.percentil (medián) = -1,314 V
- 99.percentil = -0,471 V

Výhodou pravděpodobnostní metody výpočtu je, že výsledkem je jeden průběh započítávající všechny kombinace prvků v soustavě, oproti klasické metodě, kde pro každou novou kombinace je nutný nový výpočet. Dále jsme zjistili, že krajní scénáře mohou nastat s nízkou pravděpodobností, takovou, která se už může pohybovat v oblasti provozního rizika.

Závěr

Cílem této práce bylo představit použití pravděpodobnostního přístupu k výpočtům distribuční sítě. Při výpočtech chodu sítě se nyní běžně uvažuje nejnáročnější provozní stav, kterým je zimní maximum nebo letní minimum, kdy bývá zatížení sítě nejvyšší, resp. nejnižší. Nastupující nové trendy v oblasti decentralizace, kterými jsou například fotovoltaika a akumulace, případně rozvoj elektromobility, snižují vypovídací schopnost klasických výpočetních přístupů. Tyto prvky s sebou přinášejí dva hlavní problémy, jsou obtížně predikovatelné a zároveň je zde neurčitost, jestli se tyto prvky v odběrném místě uplatní. To vše přináší mnoho scénářů, které je třeba všechny propočítat a nalézt pak nejnáročnější stav pro síť, což klade vysoké nároky na výpočty a jejich vyhodnocení. Možným řešením je změna výpočetního přístupu na pravděpodobnostní.



Postup pravděpodobnostního výpočtu, který byl proveden, je znázorněn na vývojovém diagramu. Mezi individuální vlivy zde patří popis chování odběrného místa, fotovoltaické elektrárny a elektromobility. Tato práce navrhuje možný způsob zpracování pravděpodobnostních charakteristik.

Pravděpodobnostní chování odběrného místa bylo sestaveno na základě měření z elektroměrů. Hromadnou analýzou dat byly určeny parametry pro výběr odběrných míst s nejvyšším zastoupením, jejichž data z elektroměrů poskytnuté společností PREdistribuce, a.s. byla dále zpracována.

Pravděpodobnostní charakteristika pro FVE byla opět sestavena na základě měření z elektroměrů. Zároveň byla provedena analýza jak současného stavu výskytu, tak stavu budoucího v roce 2040, která vycházela z dat prognózy rozvoje FVE v ASEK a NAP.

Obrázek 36 - Vývojový diagram pravděpodobnostního výpočtu, Zdroj:[48]

Dále byla analyzována data společnosti PREdistribuce, a.s. týkající se míry stávajícího a predikovaného rozvoje elektromobility v ČR. Do charakteristiky byly zahrnuty nejčastěji se vyskytované dobíjecí výkony a zároveň byla respektována dobíjecí křivka elektromobilu. Analýza stavu v současnosti i budoucnosti byla provedena stejným způsobem jako u FVE.

Celkový výpočet byl proveden na vybraném vývodu z distribuční transformační stanice PREdistribuce, a.s., který byl zvolen na periférii Prahy, kde odběrná místa představují rodinné domy. Výpočet zatížení vývodu a úbytků napětí byl proveden klasickým a pravděpodobnostním způsobem pro jeden časový řez. Do budoucna by bylo vhodné rozšířit výpočty o více časových řezů během dne. Oba přístupy byly vzájemně porovnány. Klasický přístup zde byl demonstrován na dvou krajních scénářích, které popisují pouze dva z možných stavů, ve kterých se síť může nacházet. Na základě

pravděpodobnostních výpočtů bylo stanoveno, že tyto dva scénáře mohou nastat s pravděpodobností menší než 0,5 %. Zároveň byl navržen možný způsob vyhodnocování pravděpodobnosti stanovením procentuální hranice pro návrh zařízení, která vymezuje provozní riziko. Vyhodnocování pravděpodobnostních výpočtů chodu distribuční soustavy je možné založit na posuzování velikosti provozního rizika. Velikost přípustného provozního rizika lze stanovit pro jednotlivé prvky elektrizační soustavy např. dle jejich důležitosti, či počtu odběrných míst, jejichž napájení je na daném prvku závislé.

Dle analýzy prognóz rozvoje méně predikovatelných prvků bude kvůli jejich očekávanému velkému rozvoji výhodné změnit přístup k výpočtům chodu elektrizační soustavy pro návrh a provozování ES. Vhodnou metodou se jeví využití pravděpodobnostního přístupu.

Seznam použité literatury

- [1] “WADE : World Alliance for Decentralized Energy.” [Online]. Available: http://www.localpower.org/deb_what.html. [Accessed: 11-Oct-2018]
- [2] “WADE : World Alliance for Decentralized Energy.” [Online]. Available: http://www.localpower.org/deb_technologies.html. [Accessed: 11-Oct-2018]
- [3] R. Buchta, “Národní energetický mix — OTE, a.s.” [Online]. Available: <http://www.ote-cr.cz/statistika/narodni-energeticky-mix/narodni-energeticky-mix>. [Accessed: 10-Oct-2018]
- [4] “Energy: new ambitious targets on renewables and energy efficiency | News | European Parliament,” 13-Nov-2018. [Online]. Available: <http://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20181106IPR18315/energy-new-ambitious-targets-on-renewables-and-energy-efficiency>. [Accessed: 28-Dec-2018]
- [5] J. Schonek, “How big are Power line losses?,” *Schneider Electric Blog*, 25-Mar-2013. [Online]. Available: <https://blog.schneider-electric.com/energy-management-energy-efficiency/2013/03/25/how-big-are-power-line-losses/>. [Accessed: 18-Oct-2018]
- [6] “Electric power transmission and distribution losses (% of output) | Data.” [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?locations=CZ>. [Accessed: 18-Oct-2018]
- [7] “Decentralized Energy Systems.pdf.” [Online]. Available: <http://www.europarl.europa.eu/document/activities/cont/201106/20110629ATT22897/20110629ATT22897EN.pdf>. [Accessed: 18-Oct-2018]
- [8] “Státní energetická koncepce ČR.” [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52841/60959/636207/priloha006.pdf>. [Accessed: 27-Nov-2018]
- [9] “Aktualizace státní energetické koncepce ČR.” [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52841/60959/636209/priloha004.pdf>. [Accessed: 27-Nov-2018]
- [10] P. Mastný, *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [11] “Sg - Národní akční plán pro chytré sítě.pdf.” [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2016/11/Narodni-akcni-plan-pro-chytre-site.pdf>. [Accessed: 27-Nov-2018]
- [12] M. D. Archer and M. A. Green, Eds., *Clean electricity from photovoltaics*, 2nd edition. London: Imperial College Press, 2014.
- [13] “Stručná historie fotovoltaiky - TZB-info.” [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>. [Accessed: 10-Oct-2018]
- [14] “solar_timeline.pdf.” [Online]. Available: https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf. [Accessed: 10-Oct-2018]
- [15] “Global PV capacity is expected to reach 969GW by 2025 - Power Technology.” [Online]. Available: <https://www.power-technology.com/comment/global-pv-capacity-expected-reach-969gw-2025/>. [Accessed: 10-Oct-2018]
- [16] M. A. Green, Y. Hishikawa, E. D. Dunlop, D. H. Levi, J. Hohl-Ebinger, and A. W. Y. Ho-Baillie, “Solar cell efficiency tables (version 52),” *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 26, no. 7, pp. 427–436, Jul. 2018 [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.3040>. [Accessed: 10-Oct-2018]
- [17] International Energy Agency, *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy*. OECD Publishing, 2010 [Online]. Available: <http://www.oecd->

- ilibrary.org/energy/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy_9789264088047-en. [Accessed: 26-Nov-2018]
- [18] Colective of Authors, "International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), Results 2017 including maturity report 2018, Ninth Edition." Sep-2018 [Online]. Available: <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/>
- [19] pv magazine, "Module Price Index," *pv magazine International*. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/features/investors/module-price-index/>. [Accessed: 26-Nov-2018]
- [20] V. Benda, "Aplikace solárních systémů," ČVUT, 2018-2017.
- [21] K. Staněk, České vysoké učení technické v Praze, Katedra konstrukcí pozemních staveb, Česko, and Ministerstvo průmyslu a obchodu, *Fotovoltaika pro budovy*. Praha: Grada pro Katedru konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze, 2012.
- [22] Ing. Hylský, Ing. Strachala, and Doc. Ing. Vaněk, Ph.D., "Nejstarší fotovoltaická elektrárna v České republice," *TZB-info*. [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13447-nejstarsi-fotovoltaicka-elektrarna-v-ceske-republice>. [Accessed: 10-Oct-2018]
- [23] "Rocni_zprava_provoz_ES_2017.pdf." [Online]. Available: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2017.pdf/521bff99-fdcf-4c86-8922-3a346af0bb88. [Accessed: 10-Oct-2018]
- [24] "Solar energy," */solar*. [Online]. Available: */solar*. [Accessed: 11-Oct-2018]
- [25] P. Wolfe, *The solar generation: childhood and adolescence of terrestrial photovoltaics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc, 2018.
- [26] "Jak odhadnout spotřebu elektřiny v domácnosti | Přehled dodavatelů elektrické energie a zemního plynu." [Online]. Available: <https://dodavatelektřiny.cz/uzitecne-informace/jak-odhadnout-spotrebu-elektřiny>. [Accessed: 12-Oct-2018]
- [27] "Jak velkou fotovoltaickou elektrárnu potřebujete?," *Solární Experti*, 06-May-2018. [Online]. Available: <https://www.solarniexpert.cz/kolik-solarnich-panelu-na-strechu-potrebuje/>. [Accessed: 12-Oct-2018]
- [28] Z. Prof. Čeřovský, "Pohony a trakce 2."
- [29] J. Ing. Košťál, "Elektromobilita včera, dnes a zítra," *Elektromobilita* [Online]. Available: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Specialy/03/Special_03_output/web/Special_03_opf_files/WebSearch/page0004. [Accessed: 12-Nov-2018]
- [30] J. Tlustý, *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [31] "Global EV Outlook 2018," p. 141, 2018.
- [32] 24net s.r.o, "Konference Elektromobilita 2018 nastínila vize pro ČR a Evropu v číslech," *fDrive.cz*. [Online]. Available: <https://fdrive.cz/clanky/konference-elektromobilita-2018-nastinila-vize-pro-cr-a-evropu-v-cislech-2393>. [Accessed: 03-Dec-2018]
- [33] S. S. s r o-l. S. standa(at)s2studio.cz GRAFIKA, VÝROBA REKLAMY, MARKETING, <http://www.s2studio.cz>, "Cena Li-ion akumulátorů pro auta prudce padá, Audi prý nakupuje za 100 €/kWh," *Teslafan.cz*. [Online]. Available: <https://www.teslafan.cz/clanky/cena-li-ion-akumulatoru-pro-auta-prudce-pada-audi-pry-nakupuje-za-100-kwh>. [Accessed: 03-Dec-2018]
- [34] "Batteries Keep On Getting Cheaper," *CleanTechnica*, 11-Dec-2017. [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/2017/12/11/batteries-keep-getting-cheaper/>. [Accessed: 03-Dec-2018]
- [35] "Realizační program 2018." [Online]. Available: http://www.iprpraha.cz/uploads/assets/dokumenty/ssp/realizacni_program/sp_r1_digital.pdf. [Accessed: 03-Dec-2018]
- [36] "Technology Roadmap Energy storage," p. 64, 2014.
- [37] N. Sg, "Národní akční plán pro chytré sítě," p. 140.

- [38] E. Haluzík, *Řízení provozu elektrizačních soustav*, 2. vyd. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1987.
- [39] J. Mertlová, P. Hejtmánková, T. Tajtl, Západočeská univerzita, and Elektrotechnická fakulta, *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004.
- [40] "Přenos a rozvod elektrické energie (B1M15PRE) - přednášky" [Online]. Available: <http://www.powerwiki.cz/wiki/PRE>
- [41] D. Kučera, *Přenos a rozvod elektrické energie*, 3. vyd. Brno: Ediční středisko Vysokého učení technického, 1989.
- [42] S. Resch, "Betriebsverhalten elektrische Energiesysteme," Erlangen, 2017.
- [43] Z. Brettschneider, R. Hanuš, and Z. Müller, "A Probabilistic Approach to Power Flow Analysis," presented at the 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, 2015, p. 5 [Online]. Available: http://cired.net/publications/cired2015/papers/CIRED2015_1284_final.pdf
- [44] L. Marek, *Pravděpodobnost*. Praha: Professional Publishing, 2012.
- [45] O. Krause, J. Schwippe, and M. Eghbal, "Probabilistic Calculus in Power System Analysis and Design," presented at the AUPEC 2011, Brisbane, QLD, Australia, 2011, p. 6 [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6102561>
- [46] "Appendix A: DC load flow." [Online]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/bbm%3A978-3-642-17989-1%2F1.pdf>. [Accessed: 06-Dec-2018]
- [47] R. Treinen, "Shift Factors: Methodology and Example, Market Operations," California ISO, 2005.
- [48] Z. Brettschneider and R. Hanuš, "New approach to calculate Load Flow for network planning and management of the distribution system," Jun-2016.
- [49] "Veřejná databáze, Český statistický úřad." [Online]. Available: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/cs/index.jsf?page=uziv-dotaz#k=5>. [Accessed: 02-Jan-2019]

Přílohy

Příloha A – Výpočet hustoty pravděpodobnosti odběru s tarifem D02

```
In[ ]:= Clear["Global`*"]
$HistoryLength = 2;
SetDirectory[NotebookDirectory[]];

(*BARRANDOV+SMICHOV D02 3F 25A*)

Barrandov = Import["Barrandov_importWolfram.xlsx"];
Smichov = Import["Smichov_importWolfram.xlsx"];
BarrandovUpr = Barrandov[[1]] // Transpose;
SmichovUpr = Smichov[[1]] // Transpose;

(*Vyber pozadovanych ADD*)
BarrandovVybr =
{
[REDACTED]
};
BarrandovVybrDATA = Table[If[MemberQ[BarrandovVybr, BarrandovUpr[[i, 1]]],
BarrandovUpr[[i]], Nothing], {i, 1, Length[BarrandovUpr]}];
SmichovVybrDATA = Table[If[MemberQ[SmichovVybr, SmichovUpr[[i, 1]]],
SmichovUpr[[i]], Nothing], {i, 1, Length[SmichovUpr]}];

(*ZADANI HODINY*)
h = 16;
hodina = {" 16:00:00"};

(*Spojeni dat se sloupcem casu*)
```

Printed by Wolfram Mathematica Student Edition

```

BarrandovvybrDATAcas = Flatten[{{BarrandovUpr[[1]]}, BarrandovVybrDATA}, 1] // Transpose;

BarrandovpodleCasu = Table[If[StringContainsQ[BarrandovvybrDATAcas[[i, 1]], hodina],
  BarrandovvybrDATAcas[[i]], Nothing], {i, 1, Length[BarrandovvybrDATAcas]};
BarrandovpodleCasu = Drop[#, {1}] & /@ BarrandovpodleCasu // Flatten;

SmichovvybrDATAcas = Flatten[{{SmichovUpr[[1]]}, SmichovVybrDATA}, 1] // Transpose;
SmichovpodleCasu = Table[If[StringContainsQ[SmichovvybrDATAcas[[i, 1]], hodina],
  SmichovvybrDATAcas[[i]], Nothing], {i, 1, Length[SmichovvybrDATAcas]};
SmichovpodleCasu = Drop[#, {1}] & /@ SmichovpodleCasu // Flatten;

BarrSmich = Divide[Join[BarrandovpodleCasu, SmichovpodleCasu], 1000];

(*SPOJENI DAT*)

dataDodavkad02 =
  Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, 6}] & /@ FileNames["RD*_d02_25_leden.xlsx"]];
dataOdberd02 = Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, 8}] & /@
  FileNames["RD*_d02_25_leden.xlsx"]];
dodavkad02 = Chop[Select[dataDodavkad02, NumberQ]][[h ;; ; 24]];
odberd02 = Chop[Select[dataOdberd02, NumberQ]][[h ;; ; 24]];
join = Join[dodavkad02, odberd02, BarrSmich];
RDhd02 = Normal[Counts@Sort[join]] /. Rule -> List;
RDh1d02 = RDhd02 /. {x_, y_} -> {x,  $\frac{y}{\text{Length[Join[dodavkad02, odberd02, BarrSmich]}}$ } // N;

ListLinePlot[RDh1d02, AxesLabel -> {HoldForm[P[kW]], HoldForm[ $\frac{\text{četnost}}{\text{změření}}$ ]},
  PlotLabel -> HoldForm["25A, D02D, 3F"], LabelStyle -> {GrayLevel[0]}, PlotRange -> All];
SmoothHistogram[join, 0.15, "PDF", PlotRange -> All]
xx = Histogram[join, {0.15}, "PDF", PlotRange -> All]

dist = FindDistribution[join]
HistogramDistribution[join]
PDF[dist, x]

Plot[PDF[dist, x], {x, 0, 4}, PlotRange -> All]

```



```

RDhd25 =
  Normal[Counts@Sort[Join[(*dodavkad25,*)odberd25, BarrSmich]]] /. Rule -> List;
RDh1d25 = RDhd25 /. {x_, y_} -> {x,  $\frac{y}{\text{Length}[Join[(*dodavkad25,*)odberd25, BarrSmich]]}$ } // N;
join = Join[(*dodavkad25,*)odberd25, BarrSmich];
(*ListLinePlot[RDh1d25, AxesLabel -> {HoldForm[P[kW]], HoldForm[ $\frac{\text{čistota}}{\text{změření}}$ ]},
  PlotLabel -> HoldForm["25A, D25D, 3F"], LabelStyle -> {GrayLevel[0]}, PlotRange -> All] *)
SmoothHistogram[join, 0.15, "PDF", AxesLabel -> {"P[kW]", "fP[-]"},
  PlotStyle -> Black, PlotStyle -> Thick]
Length[join]
dist = FindDistribution[join]
PDF[dist, P]
Plot[PDF[dist, x], {x, 0, 4}, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"P[kW]", "fP[-]"}]

```

Příloha C – Výpočet pravděpodobnosti pro FVE

```
Clear["Global`*"]
$HistoryLength = 2;
SetDirectory[NotebookDirectory[]];

duben = Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, {1, 3}}] & /@ FileNames["*_duben.xlsx", 1];
kveten = Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, {1, 3}}] & /@ FileNames["*_kveten.xlsx", 1];
cerven = Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, {1, 3}}] & /@ FileNames["*_cerven.xlsx", 1];
cervenec =
  Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, {1, 3}}] & /@ FileNames["*_cervenec.xlsx", 1];
srpen = Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, {1, 3}}] & /@ FileNames["*_srpen.xlsx", 1];
zari = Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, {1, 3}}] & /@ FileNames["*_zari.xlsx", 1];
rijen = Flatten[Import[#, {"Data", 1, All, {1, 3}}] & /@ FileNames["*_rijen.xlsx", 1];

data = Join[duben, kveten, červen, červenec, srpen, zari, rijen];

hodina = {" 16:00:00"};
dataCas = Table[If[StringContainsQ[DateString[data[[i, 1]]], hodina],
  data[[i]], Nothing], {i, 1, Length[data]};
dataCas = Drop[#, {1}] & /@ dataCas // Flatten;

histogram = SmoothHistogram[dataCas, 0.05, "PDF",
  AxesLabel -> {"P[kW]", "fP[-]"}, PlotStyle -> Black, PlotStyle -> Thick]
dist = FindDistribution[dataCas]
PDF[dist, P]
Plot[PDF[dist, x], {x, -1, 1}, AxesLabel -> {"P[kW]", "fP[-]"}]
```


Příloha D – Výpočet pravděpodobnosti pro elektromobil

```
In[*]:= $HistoryLength = 2;  
SetDirectory[NotebookDirectory[]];  
  
pocytAut = Flatten[Import["elektromobil_pravdepodobnost.xlsx"], 1] // Transpose;  
pocytAutUpr = Flatten[Drop[pocytAut, 1]];  
Counts[pocytAutUpr]  
Histogram[pocytAutUpr, {1}, "PDF", Ticks -> {3.7, 6.6, 7.2, 11}]  
dist = FindDistribution[pocytAutUpr]  
  
Plot[PDF[dist, x], {x, 0, 12}]  
  
In[*]:= autoVykon = Flatten[Import["elektromobil_rozsirenap.xlsx"], 1];  
autoVykonUpr = Flatten[Drop[autoVykon, 1]];  
distAuto = FindDistribution[autoVykonUpr]  
  
ListLinePlot[autoVykon, PlotRange -> All]  
interpolace[P_] := Interpolation[autoVykon, InterpolationOrder -> 0] [P]  
  
In[*]:= interpolace[P]  
  
In[*]:= Plot[interpolace[x], {x, -5, 30}, PlotRange -> All]
```


Příloha E – Pravděpodobnostní výpočet

```

(*PRAVDEPODOBNOSTI pro 16:00*)

(*Funkce FVE a odberu D02, D25 *)

μ = 0;
σ = 0.03;

normRoz[P_] :=  $\frac{E^{-\frac{(P-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2 * \text{Pi} * \sigma}}$ ;
NIntegrate[normRoz[P], {P, -1, 1}]

1.

Clear[fve]

Pfve = 0.4;
Pelektromobil = 0.5;
fve1[P_] :=
UnitStep[-P] *  $\left( \left( 2.4288789407903028 * 10^{-20} E^{-7.726238175312029 * 10^{-22} (4.863946335000509 + (P))^{31.436759852309507} + (4.863946335000509 + (P))^{30.436759852309507} \right) \right)$ ;

odberD25[P_] := UnitStep[P] *  $\left( 0.05710483064013431 E^{-0.5244243756755219 (-2.3709576124594274 + P)^2} + 0.28364004854151803 E^{-3.1540071656691397 (-1.54767203222598 + P)^2} + 0.8967767704451712 E^{-7.584717493111182 (-0.4254502849193085 + P)^2} \right) * \frac{1}{0.9707858686898956}$ ;

odberD02[P_] := UnitStep[P] *  $\left( \frac{0.4034573287219225 E^{-\frac{0.3144225114882837 (0.20768165422224635 + P)^2}{2.283169346915405}}}{(0.20768165422224635 + P)^{2.283169346915405}} \right) * \frac{1}{0.901876358880893}$ ;

fve2[P_] := Interpolation[Table[{i * 7, fve1[i] * 1/7}, {i, -20, 0, 0.1}]] [P];
fve[P_] := (UnitStep[-P] * (Pfve * fve2[P] + ((1 - Pfve) normRoz[P])))

Plot[fve[x], {x, -10, 0}, PlotRange -> All]

NIntegrate[fve[i], {i, -10, 0}, WorkingPrecision -> 10]
0.6824766427

```

```

odberD25[P_] := UnitStep[P] * (0.05710483064013431 E^-0.5244243756755219 (-2.3709576124594274+P)^2 +
0.28364004854151803 E^-3.1540071656691397 (-1.54767203222598+P)^2 +
0.8967767704451712 E^-7.584717493111182 (-0.4254502849193085+P)^2) *  $\frac{1}{0.9707858686898956}$ ;

odberD02[P_] := UnitStep[P] *  $\left( \frac{0.4034573287219225 E^{-\frac{0.3144225114802837}{(0.2076816542224635+P)^2 - 283309340915405}}}{(0.2076816542224635+P)^2 + 2.283169346915405} \right) * \frac{1}{0.901876358880893}$ ;

fven[P_] := (UnitStep[-P - 0.1] *
(Pfve * (2.4288789407903028 *^-20 E^-7.726238175312029 *^-22 (4.863946335000509+P)^31.436759852309507
(4.863946335000509+P)^30.436759852309507)) +
((1 - Pfve) * 10 * (UnitStep[-P + 0] * UnitStep[P + 0.1]))) * 1 / 0.8979073874357574;

Plot[{fve[P]}, {P, -10, 0}, PlotRange -> {All, {0, 1}}, AxesLabel -> {"P[kW]", "f(P)"},
PlotLabel -> Style["Hustota pravděpodobnosti dodávky výkonu z FVE v OM",
"Title", 24, Black], LabelStyle -> {FontSize -> 18}]

Plot[{odberD25[P], odberD02[P]}, {P, -5, 5}, PlotRange -> All]
(*kontrola integral=1*)

NIntegrate[normRoz[x], {x, -5, 5}]
NIntegrate[odberD25[x], {x, -10, 50}]
NIntegrate[fve[x], {x, -10, 0}]
NIntegrate[fve[x], {x, -10, 0}]

(*Funkce Elektromobility *)

elektromobil[P_] :=
UnitStep[P] * ((interpolace[P] * Pelektromobil) + (1 - Pelektromobil) * normRoz[P]) *
1 / 0.465749999999667;

NIntegrate[elektromobil[x], {x, -10, 100}]

Plot[{elektromobil[x]}, {x, -20, 80}, PlotRange -> All]

(*Prepocet odberu RD dle velikosti jistice *)

```

```

RD1odberD25j32 =
  Interpolation[Table[{i * 32 / 25, odberD25[i] * 25 / 32}, {i, -10, 30, 0.001}]];
RD2odberD02j50 = Interpolation[
  Table[{i * 50 / 25, odberD02[i] * 25 / 50}, {i, -10, 30, 0.001}]];
RD3odberD25j50 = Interpolation[Table[{i * 40 / 25, odberD25[i] * 25 / 40},
  {i, -10, 30, 0.001}]];
RD4odberD02j25 = Interpolation[Table[{i * 25 / 25, odberD02[i] * 25 / 25},
  {i, -10, 30, 0.001}]];
RD5odberD25j50 = Interpolation[Table[{i * 50 / 25, odberD25[i] * 25 / 50},
  {i, -10, 30, 0.001}]];
RD6odberD02j25 = Interpolation[Table[{i * 25 / 25, odberD02[i] * 25 / 25},
  {i, -10, 30, 0.001}]];
RD7odberD25j25 = Interpolation[Table[{i * 25 / 25, odberD25[i] * 25 / 25},
  {i, -10, 30, 0.001}]];
RD8odberD25j32 = Interpolation[Table[{i * 32 / 25, odberD25[i] * 25 / 32},
  {i, -10, 30, 0.001}]];

Plot[{RD1odberD25j32[x], RD2odberD02j50[x],
  RD3odberD25j50[x], RD7odberD25j25[x], RD8odberD25j32[x]},
  {x, -10, 30}, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"P[kW]", "f(P)"}, PlotLabel ->
  Style["Hustota pravděpodobnosti základního zatížení v OM", "Title", 24, Black],
  LabelStyle -> {FontSize -> 18}, PlotStyle -> Thick]

(*Kontorla Integralu = 1*)

NIntegrate[RD1odberD25j32[x], {x, -10, 30}, WorkingPrecision -> 10]
NIntegrate[RD2odberD02j50[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[RD3odberD25j50[x], {x, -10, 30}, WorkingPrecision -> 10]
NIntegrate[RD4odberD02j25[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[RD5odberD25j50[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[RD6odberD02j25[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[RD7odberD25j25[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[RD8odberD25j32[x], {x, -10, 30}]

(*Konvoluce RDodber s FVE *)

fRD1odberFVED25j32 = Interpolation[Table[
  {P12, NIntegrate[RD1odberD25j32[P12 - P] * fve[P], {P, -10, 30}]}, {P12, -10, 30, 0.1}]];
fRD2odberFVED02j50 = Interpolation[Table[
  {P12, NIntegrate[RD2odberD02j50[P12 - P] * fve[P], {P, -10, 30}]}, {P12, -10, 30, 0.1}]];
fRD3odberFVED25j50 = Interpolation[Table[
  {P12, NIntegrate[RD3odberD25j50[P12 - P] * fve[P], {P, -10, 30}]}, {P12, -10, 30, 0.1}]];
fRD4odberFVED02j25 = Interpolation[Table[
  {P12, NIntegrate[RD4odberD02j25[P12 - P] * fve[P], {P, -10, 30}]}, {P12, -10, 30, 0.1}]];
fRD5odberFVED25j50 = Interpolation[Table[
  {P12, NIntegrate[RD5odberD25j50[P12 - P] * fve[P], {P, -10, 30}]}, {P12, -10, 30, 0.1}]];
fRD6odberFVED02j25 = fRD4odberFVED02j25;

```

```
fRD7odberFVED25j25 = Interpolation[Table[
  {P12, NIntegrate[RD7odberD25j25[P12 - P] * fve[P], {P, -10, 30}]}, {P12, -10, 30, 0.1}]]];
```

```
fRD8odberFVED25j32 = fRD1odberFVED25j32;
```

```
(*Kontorla Integralu = 1*)
```

```
NIntegrate[fRD1odberFVED25j32[x], {x, -10, 30}]
```

```
NIntegrate[fRD2odberFVED02j50[x], {x, -10, 30}]
```

```
NIntegrate[fRD3odberFVED25j50[x], {x, -10, 30}]
```

```
NIntegrate[fRD4odberFVED02j25[x], {x, -10, 30}]
```

```
NIntegrate[fRD5odberFVED25j50[x], {x, -10, 30}]
```

```
NIntegrate[fRD6odberFVED02j25[x], {x, -10, 30}]
```

```
NIntegrate[fRD7odberFVED25j25[x], {x, -10, 30}]
```

```
NIntegrate[fRD8odberFVED25j32[x], {x, -10, 30}]
```

```
Plot[{fRD1odberFVED25j32[x], fRD2odberFVED02j50[x],
  fRD3odberFVED25j50[x], fRD4odberFVED02j25[x], fRD5odberFVED25j50[x],
  fRD6odberFVED02j25[x], fRD7odberFVED25j25[x], fRD8odberFVED25j32[x]},
{x, -10, 30}, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"P[kW]", "f(P)"}, PlotLabel ->
  Style["Hustota pravděpodobnosti základního zatížení + FVE v OM", "Title", 24, Black],
  LabelStyle -> {FontSize -> 18}, PlotStyle -> Thick]
```

```
elektromobilupr =
```

```
Interpolation[Table[{i, elektromobil[i]}, {i, -20, 30, 0.001}], InterpolationOrder -> 0]
```

```
Plot[{elektromobilupr[x]}, {x, -2, 15},
```

```
PlotRange -> {All, {0, 1}}, AxesLabel -> {"P[kW]", "f(P)"},
```

```
PlotLabel -> Style["Hustota pravděpodobnosti zatížení dobíjení elektromobilu v OM",
```

```
"Title", 24, Black], LabelStyle -> {FontSize -> 18}]
```

```
NIntegrate[elektromobil[x], {x, -10, 30}]
```

```
(*Konvoluce RDodberFVE s elektromobilitou*)
```

```
RD1odberFVEelm = Interpolation[
```

```
Table[{P123, NIntegrate[fRD1odberFVED25j32[P123 - P] * elektromobil[P], {P, -10, 30}]},
  {P123, -10, 30, 0.1}]]];
```

```
RD2odberFVEelm = Interpolation[
```

```
Table[{P123, NIntegrate[fRD2odberFVED02j50[P123 - P] * elektromobil[P], {P, -10, 30}]},
  {P123, -10, 30, 0.1}]]];
```

```
RD3odberFVEelm = Interpolation[
```

```
Table[{P123, NIntegrate[fRD3odberFVED25j50[P123 - P] * elektromobil[P], {P, -10, 30}]},
  {P123, -10, 30, 0.1}]]];
```

```

RD4odberFVEelm = Interpolation[
  Table[{P123, NIntegrate[fRD4odberFVED02j25[P123 - P] * elektromobil[P], {P, -10, 30}]},
    {P123, -10, 30, 0.1}]];
RD5odberFVEelm = RD3odberFVEelm;
RD6odberFVEelm = RD4odberFVEelm;

RD7odberFVEelm = Interpolation[
  Table[{P123, NIntegrate[fRD7odberFVED25j25[P123 - P] * elektromobil[P], {P, -10, 30}]},
    {P123, -10, 30, 0.1}]];
RD8odberFVEelm = RD1odberFVEelm

Plot[{RD1odberFVEelm[x], RD2odberFVEelm[x], RD3odberFVEelm[x], RD4odberFVEelm[x],
  RD5odberFVEelm[x], RD6odberFVEelm[x], RD7odberFVEelm[x], RD8odberFVEelm[x]},
  {x, -10, 30}, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"P[kW]", "f(P)"}, PlotLabel ->
  Style["Hustota pravděpodobnosti základního zatížení + FVE + Elektromobility v OM",
  "Title", 24, Black], LabelStyle -> {FontSize -> 18}, PlotStyle -> Thick]

RD1odberFVEelmupr = Interpolation[Table[
  {i, (UnitStep[i + 6] * UnitStep[-i + 30] * RD1odberFVEelm[i]) / 1.}, {i, -10, 80, 0.01}]];
RD2odberFVEelmupr = Interpolation[Table[
  {i, (UnitStep[i + 6] * UnitStep[-i + 30] * RD2odberFVEelm[i]) / 1.}, {i, -10, 80, 0.01}]];
RD3odberFVEelmupr = Interpolation[Table[
  {i, (UnitStep[i + 6] * UnitStep[-i + 30] * RD3odberFVEelm[i]) / 1.}, {i, -10, 80, 0.01}]];
RD4odberFVEelmupr = Interpolation[Table[
  {i, (UnitStep[i + 6] * UnitStep[-i + 30] * RD4odberFVEelm[i]) / 1.}, {i, -10, 80, 0.01}]];
RD5odberFVEelmupr = Interpolation[Table[
  {i, (UnitStep[i + 6] * UnitStep[-i + 30] * RD5odberFVEelm[i]) / 1.}, {i, -10, 80, 0.01}]];
RD6odberFVEelmupr = Interpolation[Table[
  {i, (UnitStep[i + 6] * UnitStep[-i + 30] * RD6odberFVEelm[i]) / 1.}, {i, -10, 80, 0.01}]];
RD7odberFVEelmupr = Interpolation[Table[
  {i, (UnitStep[i + 6] * UnitStep[-i + 30] * RD7odberFVEelm[i]) / 1.}, {i, -10, 80, 0.01}]];
RD8odberFVEelmupr = Interpolation[Table[
  {i, (UnitStep[i + 6] * UnitStep[-i + 30] * RD8odberFVEelm[i]) / 1.}, {i, -10, 80, 0.01}]];

Plot[{RD1odberFVEelmupr[x], RD2odberFVEelmupr[x], RD3odberFVEelmupr[x],
  RD4odberFVEelmupr[x], RD5odberFVEelmupr[x], RD6odberFVEelmupr[x],
  RD7odberFVEelmupr[x], RD8odberFVEelmupr[x]}, {x, -10, 30}, PlotRange -> All,
  AxesLabel -> {"P[kW]", "f[-]"}, AxesLabel -> {"P[kW]", "f(P)"}, PlotLabel ->
  Style["Hustota pravděpodobnosti základního zatížení + FVE + Elektromobility v OM",
  "Title", 24, Black], LabelStyle -> {FontSize -> 18}, PlotStyle -> Thick]
(*kontrola integralu=
1*)

```

```

NIntegrate[odberD25[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[odberD02[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[fve[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[fRD1odberFVE[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[fRD2odberFVE[x], {x, -10, 30}]
NIntegrate[elektromobil[x], {x, -10, 30}, WorkingPrecision -> 10]
NIntegrate[RD1odberFVEelmupr[x], {x, -10, 80}, WorkingPrecision -> 10]
NIntegrate[RD2odberFVEelmupr[x], {x, -10, 80}, WorkingPrecision -> 10]
NIntegrate[RD3odberFVEelmupr[x], {x, -10, 80}, WorkingPrecision -> 10]
NIntegrate[RD4odberFVEelmupr[x], {x, -10, 80}, WorkingPrecision -> 10]
NIntegrate[RD7odberFVEelmupr[x], {x, -10, 80}, WorkingPrecision -> 10]
(*prepcitani vykonu na proud*)

fRD1odberIFVEelm = Interpolation[
  Table[{i / (3 * 0.230), RD1odberFVEelmupr[i] * (3 * 0.230)}, {i, -10, 80, 0.1}]];
fRD2odberIFVEelm = Interpolation[
  Table[{i / (3 * 0.230), RD2odberFVEelmupr[i] * (3 * 0.230)}, {i, -10, 80, 0.1}]];
fRD3odberIFVEelm = Interpolation[
  Table[{i / (3 * 0.230), RD3odberFVEelmupr[i] * (3 * 0.230)}, {i, -10, 80, 0.1}]];
fRD4odberIFVEelm = Interpolation[
  Table[{i / (3 * 0.230), RD4odberFVEelmupr[i] * (3 * 0.230)}, {i, -10, 80, 0.1}]];
fRD5odberIFVEelm = Interpolation[
  Table[{i / (3 * 0.230), RD5odberFVEelmupr[i] * (3 * 0.230)}, {i, -10, 80, 0.1}]];
fRD6odberIFVEelm = Interpolation[
  Table[{i / (3 * 0.230), RD6odberFVEelmupr[i] * (3 * 0.230)}, {i, -10, 80, 0.1}]];
fRD7odberIFVEelm = Interpolation[
  Table[{i / (3 * 0.230), RD7odberFVEelmupr[i] * (3 * 0.230)}, {i, -10, 80, 0.1}]];
fRD8odberIFVEelm = Interpolation[
  Table[{i / (3 * 0.230), RD8odberFVEelmupr[i] * (3 * 0.230)}, {i, -10, 80, 0.1}]];
(*kontrola integralu=
1*)

NIntegrate[fRD1odberIFVEelm[x], {x, -10, 80}]
NIntegrate[fRD2odberIFVEelm[x], {x, -10, 80}]
NIntegrate[fRD3odberIFVEelm[x], {x, -10, 80}]
NIntegrate[fRD4odberIFVEelm[x], {x, -10, 80}]
NIntegrate[fRD5odberIFVEelm[x], {x, -10, 80}]
NIntegrate[fRD6odberIFVEelm[x], {x, -10, 80}]
NIntegrate[fRD7odberIFVEelm[x], {x, -10, 80}]
NIntegrate[fRD8odberIFVEelm[x], {x, -10, 80}]

Plot[{fRD1odberIFVEelm[x], fRD2odberIFVEelm[x], fRD3odberIFVEelm[x], fRD4odberIFVEelm[x],
  fRD5odberIFVEelm[x], fRD6odberIFVEelm[x], fRD7odberIFVEelm[x], fRD8odberIFVEelm[x]},
{x, -25, 40}, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"I[A]", "f(I)"}, PlotLabel ->
Style["Hustota pravděpodobnosti Základního zatížení + FVE + Elektromobility v OM",
  "Title", 24, Black], LabelStyle -> {FontSize -> 18}, PlotStyle -> Thick]

```

```

VykonJ78 = Interpolation[
  Table[{J78, NIntegrate[fRD7odberIFVEelm[J78 - J] * fRD8odberIFVEelm[J], {J, -20, 80}]},
    {J78, -20, 80, 0.5}]];

VykonJ67 = Interpolation[
  Table[{J67, NIntegrate[VykonJ78[J67 - J] * fRD6odberIFVEelm[J], {J, -20, 80}]},
    {J67, -20, 80, 0.5}]];

VykonJ56 = Interpolation[
  Table[{J56, NIntegrate[VykonJ67[J56 - J] * fRD5odberIFVEelm[J], {J, -20, 80}]},
    {J56, -20, 80, 0.5}]];

VykonJ45 = Interpolation[
  Table[{J45, NIntegrate[VykonJ56[J45 - J] * fRD4odberIFVEelm[J], {J, -5, 80}]},
    {J45, -20, 80, 0.5}]];

VykonJ34 = Interpolation[
  Table[{J34, NIntegrate[VykonJ45[J34 - J] * fRD3odberIFVEelm[J], {J, -20, 80}]},
    {J34, -20, 80, 0.5}]];

VykonJ23 = Interpolation[
  Table[{J23, NIntegrate[VykonJ34[J23 - J] * fRD2odberIFVEelm[J], {J, -20, 80}]},
    {J23, -20, 80, 0.5}]];

VykonJ12 = Interpolation[
  Table[{J12, NIntegrate[VykonJ23[J12 - J] * fRD1odberIFVEelm[J], {J, -20, 80}]},
    {J12, -20, 80, 0.5}]];

NIntegrate[VykonJ78[x], {x, -20, 80}]
NIntegrate[VykonJ67[x], {x, -20, 80}]
NIntegrate[VykonJ56[x], {x, -20, 80}]
NIntegrate[VykonJ45[x], {x, -20, 80}]
NIntegrate[VykonJ34[x], {x, -20, 80}]
NIntegrate[VykonJ23[x], {x, -10, 80}]
NIntegrate[VykonJ12[x], {x, -7, 80}]

Plot[{VykonJ78[x], VykonJ67[x], VykonJ56[x], VykonJ45[x], VykonJ34[x], VykonJ23[x],
  VykonJ12[x]}, {x, -20, 80}, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"I[A]", "f[-]"}]

Plot[{VykonJ78[x], VykonJ67[x], UnitStep[x + 13] * VykonJ56[x],
  UnitStep[x + 13] * VykonJ45[x], UnitStep[x + 12] * VykonJ34[x],
  UnitStep[x + 10] * VykonJ23[x], UnitStep[x + 8] * VykonJ12[x]},
{x, -20, 80}, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"I[A]", "f(I)"}, PlotLabel ->
Style["Hustota pravděpodobnosti zatížení jednotlivých kabelových úseků na vývodu",
  "Title", 24, Black], LabelStyle -> {FontSize -> 18},
PlotStyle -> {Normal, Normal, Normal, Normal, Normal, Normal, Thickness[0.005]}]

(*Hustota zatížení distribučního transformátoru*)
ProudnaTrafuHustota = (Interpolation[
  Table[{x, UnitStep[x + 7] * VykonJ12[x] * 1/1.0102484556102096}, {x, -20, 80, 0.001}]]);

```

```

NIntegrate[ProudnaTrafuHustota[x], {x, -20, 80}]

ProudnaTrafuDistrFce =
  Interpolation[Table[{i, NIntegrate[UnitStep[x + 7] * VykonJ12[x], {x, -20, i}]},
    {i, -20, 80, 0.1}]/1.012640429257994];

plot1 = Plot[{ProudnaTrafuHustota[x], ProudnaTrafuDistrFce[x]},
  {x, -20, 80}, AxesLabel → {"I[A]", "f(I), F(I)"}, PlotLabel →
  Style["Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti zatížení začátku vývodu",
    "Title", 24, Black], LabelStyle → {FontSize → 18}, PlotStyle → Thick]

Show[plot1, ListPlot[{{-18, ProudnaTrafuHustota[-18]}},
  PlotStyle → {Red}, PlotStyle → {Red}, PlotLabels → Placed[{"Scénář 1"}, Above]],
  ListPlot[{{70, ProudnaTrafuHustota[70]}}, PlotStyle → {Red},
  PlotLabels → Placed[{"Scénář 2"}, Above]], ListPlot[{{70, ProudnaTrafuDistrFce[70]}},
  PlotStyle → {Red}, PlotLabels → Placed[{"Scénář 2"}, Above]],
  ListPlot[{x /. Percentil01, 0.01}], PlotStyle → {Blue},
  PlotLabels → Placed[{"1.percentil"}, Above]], ListPlot[{x /. Percentil99, 0.99}],
  PlotStyle → {Blue}, PlotLabels → Placed[{"99.percentil"}, Above]], ListPlot[
  {x /. Percentil50, 0.5}], PlotStyle → {Blue}, PlotLabels → Placed[{"median"}, Above]]]

plotTS = Plot[{ProudnaTrafuHustota[x/8], ProudnaTrafuDistrFce[x/8]},
  {x, -20*8, 80*8}, AxesLabel → {"I[A]", "f(I), F(I)"},
  PlotLabel → Style["Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti
    zatížení distribučního transformátoru (8 x vývod NN)",
    "Title", 24, Black], LabelStyle → {FontSize → 18}, PlotStyle → Thick]

Percentil01 = NSolve[ProudnaTrafuDistrFce[x] == 0.01, x] // Flatten
Percentil95 = NSolve[ProudnaTrafuDistrFce[x] == 0.95, x] // Flatten
Percentil99 = NSolve[ProudnaTrafuDistrFce[x] == 0.99, x] // Flatten
Percentil50 = NSolve[ProudnaTrafuDistrFce[x] == 0.50, x] // Flatten

```


$U0 = 230;$
 $R = 0.257;$
 $X = 0.07;$

$l01 = 0.059;$
 $l12 = 0.077;$
 $l23 = 0.022;$
 $l34 = 0.028;$
 $l45 = 0.059;$
 $l56 = 0.026;$
 $l67 = 0.025;$
 $l78 = 0.076;$

$R01 = R * l01;$
 $R12 = R * l12;$
 $R23 = R * l23;$
 $R34 = R * l34;$
 $R45 = R * l45;$
 $R56 = R * l56;$
 $R67 = R * l67;$
 $R78 = R * l78;$

$X01 = X * l01;$
 $X12 = X * l12;$
 $X23 = X * l23;$
 $X34 = X * l34;$
 $X45 = X * l45;$
 $X56 = X * l56;$
 $X67 = X * l67;$
 $X78 = X * l78;$

$$Z01 = \sqrt{R01^2 + X01^2}$$

$$Z12 = \sqrt{R12^2 + X12^2}$$

$$Z23 = \sqrt{R23^2 + X23^2}$$

$$Z34 = \sqrt{R34^2 + X34^2}$$

$$Z45 = \sqrt{R45^2 + X45^2}$$

$$Z56 = \sqrt{R56^2 + X56^2}$$

$$Z67 = \sqrt{R67^2 + X67^2}$$

$$Z78 = \sqrt{R78^2 + X78^2}$$

```

Plot[{VykonJ78[x], VykonJ67[x], UnitStep[x + 13] * VykonJ56[x],
      UnitStep[x + 13] * VykonJ45[x], UnitStep[x + 13] * VykonJ34[x],
      UnitStep[x + 10] * VykonJ23[x], UnitStep[x + 8] * VykonJ12[x]},
{x, -20, 80}, PlotRange → All, AxesLabel → {"I[A]", "f(I)"}, PlotLabel →
Style["Hustota pravděpodobnosti zatížení jednotlivých kabelových úseků na vývodu",
      "Title", 24, Black], LabelStyle → {FontSize → 18}]

Ubytek01 = Interpolation[Table[{i * Z01,
      UnitStep[-i + 80] * (UnitStep[i + 8] * VykonJ12[i]) * 1 / Z01}, {i, -20, 200, 0.001}]];
Ubytek12 = Interpolation[Table[{i * Z12, UnitStep[-i + 80] *
      (UnitStep[i + 10] * VykonJ23[i]) * 1 / Z12}, {i, -20, 200, 0.001}]];
Ubytek23 = Interpolation[Table[{i * Z23, UnitStep[-i + 80] *
      (UnitStep[i + 13.8] * VykonJ34[i]) * 1 / Z23}, {i, -20, 200, 0.001}]];
Ubytek34 = Interpolation[Table[{i * Z34, UnitStep[-i + 80] *
      (UnitStep[i + 13] * VykonJ45[i]) * 1 / Z34}, {i, -20, 200, 0.001}]];
Ubytek45 = Interpolation[Table[{i * Z45, UnitStep[-i + 80] *
      (UnitStep[i + 13] * VykonJ56[i]) * 1 / Z45}, {i, -20, 200, 0.001}]];
Ubytek56 = Interpolation[Table[{i * Z56, UnitStep[-i + 80] *
      (UnitStep[i + 13] * VykonJ67[i]) * 1 / Z56}, {i, -20, 200, 0.001}]];
Ubytek67 = Interpolation[Table[{i * Z67, UnitStep[-i + 80] *
      (UnitStep[i + 20] * VykonJ78[i]) * 1 / Z67}, {i, -20, 200, 0.001}]];
Ubytek78 = Interpolation[Table[{i * Z78, UnitStep[-i + 80] *
      (UnitStep[i + 20] * fRD8odberIFVEelm[i]) * 1 / Z78}, {i, -20, 200, 0.001}]];

Plot[{Ubytek01[x], Ubytek12[x], Ubytek23[x], Ubytek34[x], Ubytek45[x], Ubytek56[x],
      Ubytek67[x], Ubytek78[x]}, {x, -1, 2}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]

Plot[{Ubytek01[x]}, {x, -1, 3}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]
Plot[{Ubytek12[x]}, {x, -1, 3}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]
Plot[{Ubytek23[x]}, {x, -1, 3}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]
Plot[{Ubytek34[x]}, {x, -1, 3}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]
Plot[{Ubytek45[x]}, {x, -1, 3}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]
Plot[{Ubytek56[x]}, {x, -1, 3}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]
Plot[{Ubytek67[x]}, {x, -1, 3}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]
Plot[{Ubytek78[x]}, {x, -1, 3}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"}]

NIntegrate[Ubytek01[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[Ubytek12[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[Ubytek23[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[Ubytek34[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[Ubytek45[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[Ubytek56[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[Ubytek67[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[Ubytek78[x], {x, -10, 10}]

```

```

U1 = Ubytek01;
U2 = Interpolation[
  Table[{uu, NIntegrate[Ubytek01[uu - u] * Ubytek12[u], {u, -2, 10}]}, {uu, -2, 10, 0.1}]];
U3 = Interpolation[
  Table[{uu, NIntegrate[U2[uu - u] * Ubytek23[u], {u, -2, 10}]}, {uu, -2, 10, 0.1}]];
U4 = Interpolation[
  Table[{uu, NIntegrate[U3[uu - u] * Ubytek34[u], {u, -2, 10}]}, {uu, -2, 10, 0.1}]];
U5 = Interpolation[
  Table[{uu, NIntegrate[U4[uu - u] * Ubytek45[u], {u, -2, 10}]}, {uu, -2, 10, 0.1}]];
U6 = Interpolation[
  Table[{uu, NIntegrate[U5[uu - u] * Ubytek56[u], {u, -2, 10}]}, {uu, -2, 10, 0.1}]];
U7 = Interpolation[
  Table[{uu, NIntegrate[U6[uu - u] * Ubytek67[u], {u, -2, 10}]}, {uu, -2, 10, 0.1}]];
U8 = Interpolation[
  Table[{uu, NIntegrate[U7[uu - u] * Ubytek78[u], {u, -2, 10}]}, {uu, -2, 10, 0.1}]];

Plot[{U1[-x], U2[-x], U3[-x], U4[-x], U5[-x]},
{x, -5, 1}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"},
PlotLabels → Placed[{"U1", "U2", "U3", "U4", "U5", "U6", "U7", "U8"}, Above],
PlotLabel → Style["Hustota pravděpodobnosti změny napětí v uzlech vývodu",
  "Title", 24, Black], LabelStyle → {FontSize → 18}]

Plot[{U1[-x], U2[-x], U3[-x], U4[-x], U5[-x], U6[-x], U7[-x], U8[-x]},
{x, -5, 1}, PlotRange → All, AxesLabel → {"dU[V]", "f[-]"},
PlotLabels → Placed[{"U1", "U2", "U3", "U4", "U5", "U6", "U7", "U8"}, Above],
PlotLabel → Style["Hustota pravděpodobnosti změny napětí v uzlech vývodu",
  "Title", 24, Black], LabelStyle → {FontSize → 18}]

NIntegrate[Ubytek01[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[U2[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[U3[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[U4[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[U5[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[U6[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[U7[x], {x, -10, 10}]
NIntegrate[U8[x], {x, -10, 10}]

(*Distribucni funkce Napeti v Uzlech*)
DistrFcedU1 = Interpolation[
  Table[{i, NIntegrate[U1[-x] / 1.0103319096704513, {x, -5, i}]}, {i, -5, 1, 0.1}]];

```

```

DistrFcedU2 = Interpolation[
  Table[{i, NIntegrate[U2[-x]/1.024313016306515, {x, -5, i}], {i, -5, 1, 0.1}}];
DistrFcedU3 = Interpolation[Table[{i, NIntegrate[U3[-x]/1.0415506032033996, {x, -5, i}],
  {i, -5, 1, 0.1}}];
DistrFcedU4 = Interpolation[Table[{i, NIntegrate[U4[-x]/1.0597181318340805, {x, -5, i}],
  {i, -5, 1, 0.1}}];
DistrFcedU5 = Interpolation[Table[{i, NIntegrate[U5[-x]/1.0826397291168905, {x, -5, i}],
  {i, -5, 1, 0.1}}];
DistrFcedU6 = Interpolation[Table[{i, NIntegrate[U6[-x]/1.1053765430652511, {x, -5, i}],
  {i, -5, 1, 0.1}}];
DistrFcedU7 = Interpolation[Table[{i, NIntegrate[U7[-x]/1.1078704762142568, {x, -5, i}],
  {i, -5, 1, 0.1}}];

DistrFcedU8 = Interpolation[
  Table[{i, NIntegrate[U8[-x]/1.1087311304561165, {x, -5, i}], {i, -5, 1, 0.01}}];
Plot[DistrFcedU8[x], {x, -5, 5}]

Plot[{DistrFcedU1[x], DistrFcedU2[x], DistrFcedU3[x], DistrFcedU4[x],
  DistrFcedU5[x], DistrFcedU6[x], DistrFcedU7[x], DistrFcedU8[x]},
{x, -5, 1}, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"dU[V]", "F[dU]"},
PlotLabels -> Placed[{"U1", "U2", "U3", "U4", "U5", "U6", "U7", "U8"}, Above],
PlotLabel -> Style["Distribuční funkce změny napětí v uzlech vývodu", "Title", 24, Black],
LabelStyle -> {FontSize -> 18}, PlotStyle -> Thick]

plot2 = Plot[{DistrFcedU8[x], U8[-x]}, {x, -5, 1}, PlotRange -> All,
  AxesLabel -> {"dU[V]", "f[dU]", "F[dU]"}, PlotLabels -> Placed[{"U8"}, Above], PlotLabel ->
  Style["Distribuční funkce změny napětí na konci vývodu (uzel U8)", "Title", 24, Black],
  LabelStyle -> {FontSize -> 18}, PlotStyle -> Thick]

DistrFcedU8[-2.3961]
Percentil01u = x -> -2.3961
Percentil01u = NSolve[DistrFcedU8[x] == 0.01, x] // Flatten
Percentil95u = NSolve[DistrFcedU8[x] == 0.95, x] // Flatten
Percentil99u = NSolve[DistrFcedU8[x] == 0.99, x] // Flatten
Percentil50u = NSolve[DistrFcedU8[x] == 0.50, x] // Flatten

```

```
Show[plot2, ListPlot[{{0.96, DistrFcedU8[0.96]}}, PlotStyle -> {Red},
  PlotStyle -> {Red}, PlotLabels -> Placed[{"Scénář 1"}, Above]], ListPlot[
  {{-3.64, U8[-3.64]}}, PlotStyle -> {Red}, PlotLabels -> Placed[{"Scénář 2"}, Above]],
ListPlot[{{-3.64, DistrFcedU8[-3.64]}}, PlotStyle -> {Red},
  PlotLabels -> Placed[{"Scénář 2"}, Above]], ListPlot[{{x /. Percentil01u, 0.01}},
  PlotStyle -> {Blue}, PlotLabels -> Placed[{"1.percentil"}, Above]],
ListPlot[{{x /. Percentil99u, 0.99}}, PlotStyle -> {Blue},
  PlotLabels -> Placed[{"99.percentil"}, Above]], ListPlot[{{x /. Percentil50u, 0.5}},
  PlotStyle -> {Blue}, PlotLabels -> Placed[{"median"}, Above]]]
```

```
DistrFcedU8[-3.64]
```

```
DistrFcedU8[-3]
```


Příloha F – Klasický výpočet

ln[-] = (*parametry site*)

ln[-] = U0 = 230;
R = 0.257;
X = 0.07;
m = 10⁻³; (*potřebuju vzdalenost v km*)

l01 = 59 m;
l12 = 77 m;
l23 = 22 m;
l34 = 28 m;
l45 = 59 m;
l56 = 26 m;
l67 = 25 m;
l78 = 76 m;

R01 = R * l01;
R12 = R * l12;
R23 = R * l23;
R34 = R * l34;
R45 = R * l45;
R56 = R * l56;
R67 = R * l67;
R78 = R * l78;

X01 = X * l01;
X12 = X * l12;
X23 = X * l23;
X34 = X * l34;
X45 = X * l45;
X56 = X * l56;
X67 = X * l67;
X78 = X * l78;

Z01 = $\sqrt{R01^2 + X01^2}$
Z12 = $\sqrt{R12^2 + X12^2}$
Z23 = $\sqrt{R23^2 + X23^2}$
Z34 = $\sqrt{R34^2 + X34^2}$;
Z45 = $\sqrt{R45^2 + X45^2}$;
Z56 = $\sqrt{R56^2 + X56^2}$;
Z67 = $\sqrt{R67^2 + X67^2}$;
Z78 = $\sqrt{R78^2 + X78^2}$;

Y01 = 1 / Z01;
Y12 = 1 / Z12;

```

Y23 = 1 / Z23;
Y34 = 1 / Z34;
Y45 = 1 / Z45;
Y56 = 1 / Z56;
Y67 = 1 / Z67;
Y78 = 1 / Z78;
(*admitancni matice + redukovana*)
B = {{Y01, -Y01, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
      {-Y01, (Y01 + Y12), -Y12, 0, 0, 0, 0, 0}, {0, -Y12, (Y12 + Y23), -Y23, 0, 0, 0, 0},
      {0, 0, -Y23, (Y23 + Y34), -Y34, 0, 0, 0}, {0, 0, 0, -Y34, (Y34 + Y45), -Y45, 0, 0, 0},
      {0, 0, 0, 0, -Y45, (Y45 + Y56), -Y56, 0, 0}, {0, 0, 0, 0, 0, -Y56, (Y56 + Y67), -Y67, 0},
      {0, 0, 0, 0, 0, -Y67, (Y67 + Y78), -Y78}, {0, 0, 0, 0, 0, 0, -Y78, Y78}};
Bred = {{(Y01 + Y12), -Y12, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, {-Y12, (Y12 + Y23), -Y23, 0, 0, 0, 0, 0},
        {0, -Y23, (Y23 + Y34), -Y34, 0, 0, 0, 0}, {0, 0, -Y34, (Y34 + Y45), -Y45, 0, 0, 0},
        {0, 0, 0, -Y45, (Y45 + Y56), -Y56, 0, 0}, {0, 0, 0, 0, -Y56, (Y56 + Y67), -Y67, 0},
        {0, 0, 0, 0, 0, -Y67, (Y67 + Y78), -Y78}, {0, 0, 0, 0, 0, 0, -Y78, Y78}};
(*citlivostni matice linkovych toku + redukovana*)
Hred1 = {{Y01, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}, {-Y12, Y12, 0, 0, 0, 0, 0, 0},
         {0, -Y23, Y23, 0, 0, 0, 0, 0}, {0, 0, -Y34, Y34, 0, 0, 0, 0}, {0, 0, 0, -Y45, Y45, 0, 0, 0},
         {0, 0, 0, 0, -Y56, Y56, 0, 0}, {0, 0, 0, 0, 0, -Y67, Y67, 0}, {0, 0, 0, 0, 0, 0, -Y78, Y78}};
(*matice shift faktoru (PTDF)*)
S = Hred1.Inverse[Bred];
(*zadani odberu v [A], odber x... scenar 1, odber xx... scenar 2*)
odber1 = odber5 = odber7 = -8.7;
odber2 = odber3 = odber4 = odber6 = odber8 = 1.45;
odber11 = 14.14;
odber22 = 5.8;
odber33 = 10;
odber44 = 2.9;
odber55 = 21.74;
odber66 = 2.9;
odber77 = 8.26;
odber88 = 3.71;

(*vektor odberu*)
OdberyScenar1 =
  {{odber1, odber2, odber3, odber4, odber5, odber6, odber7, odber8}} // Transpose;
OdberyScenar2 = {{odber11, odber22, odber33, odber44, odber55, odber66, odber77, odber88}} //
  Transpose;

(*proudy ve vetvich*)
Ilines1 = S.OdberyScenar1;
Ilines2 = S.OdberyScenar2;

(*ubytky napeti*)
Ubytky1 = Inverse[Bred].OdberyScenar1;
Ubytky2 = Inverse[Bred].OdberyScenar2;
(*napeti v uzlech*)
U1 = U0 - Inverse[Bred].OdberyScenar1;

```



```
U2 = U0 - Inverse[Bred].OdberyScenar2;  
(*ubytky v procentech*)  
 $\Delta U1 = (U1 / 230) * 100 // N$ ;  
 $\Delta U2 = (U2 / 230) * 100 // N$ ;  
  
Print["Ilines1=", Ilines1 // MatrixForm, " A"]  
Print["Ilines2=", Ilines2 // MatrixForm, " A"]  
Print["Ubytky1=", Ubytky1 // MatrixForm, " V"]  
Print["Ubytky2=", Ubytky2 // MatrixForm, " V"]  
Print[" $\Delta U1$ =",  $\Delta U1$  // MatrixForm, "% U0"]  
Print[" $\Delta U2$ =",  $\Delta U2$  // MatrixForm, "% U0"]  
Print["U1=", U1 // MatrixForm, " V"]  
Print["U2=", U2 // MatrixForm, " V"]  
  
Inverse[Bred] // MatrixForm
```