

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

**Bateriové úložiště v distribuční
soustavě**

**Battery storage in the distribution
system**

Bc. Radim ILLE

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.
2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ille** Jméno: **Radim** Osobní číslo: **474421**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Bateriové úložiště v distribuční soustavě

Název diplomové práce anglicky:

Battery storage in the distribution system

Pokyny pro vypracování:

- 1) Bateriové úložiště v distribuční soustavě – základní charakteristiky.
- 2) Možnosti zásobování bateriového úložiště elektřinou z obnovitelných zdrojů energie.
- 3) Návrh bateriového úložiště a jeho zásobování z obnovitelných zdrojů energie.
- 4) Technicko – ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

- 1) MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04937-2.
- 2) SIESTORAGE, The modular electrical energy storage system for a reliable power supply [online]. Spolková republika Německo: Siemens [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f144380d-c30d-445d-863c-4c38c4619cd1/emms-b10042-00-7600siestorage2017brochureen144dpi.pdf>
- 3) TLUSTÝ, Josef. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04939-6.
- 4) TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04935-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 17. 5. 2022

Bc. Radim Ille

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu Mgr. Ing. Vítu Klei-
novi, Ph.D., za odborné vedení a cenné rady při psaní této práce. Dále bych rád poděko-
val panu Ing. Martinovi Kurfířtovi, (hlavnímu technikovi kontroly kvality ve společnosti
EG.D, a.s.) za poskytnutí reálných dat a za odborné konzultace ohledně kvality elek-
trické energie v distribuční soustavě. V neposlední řadě patří můj vděk celé mé rodině a
mé přítelkyni, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá využitím bateriového úložiště v distribuční soustavě na hladině NN jako stabilizačního prvku pro zvýšení kvality elektrické energie v dané lokalitě distribuční soustavy. Teoretická část obsahuje popis jednotlivých typů obnovitelných zdrojů energie a akumulčních technologií. V praktické části je proveden návrh bateriového úložiště napájeného fotovoltaickou elektrárnou pro konkrétní oblast v distribuční soustavě. V závěru práce je provedeno technicko-ekonomické porovnání navrženého systému a linkového kondicionéru.

Klíčová slova

Obnovitelné zdroje energie, solární energie, akumulace elektrické energie, bateriové úložiště, kvalita elektrické energie, distribuční soustava.

Abstract

This diploma thesis deals with the use of battery storage in the distribution system at the LV level as a stabilizing element for increasing the quality of electricity in a specific location of the distribution system. The theoretical part contains a description of individual types of renewable energy sources and storage technologies. In the practical part, the design of a battery storage powered by a photovoltaic power plant for a specific area in the distribution system is performed. At the end of the work is a technical and economic comparison of the proposed system and line conditioner.

Keywords

Renewable energy sources, solar energy, electrical energy storage, battery storage, power quality, distribution system.

Obsah

1. ÚVOD.....	1
2. OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE	3
2.1. Fotovoltaické systémy	4
2.1.1. Energie Slunce	4
2.1.2. Princip fotovoltaického článku.....	6
2.1.3. Fotovoltaický modul.....	10
2.2. Vodní systémy	12
2.2.1. Rozdělení vodních elektráren	12
2.2.2. Energie vody.....	13
2.2.3. Uspořádání vodní elektrárny.....	14
2.3. Větrné systémy	15
2.3.1. Energie větru	15
2.3.2. Prvky větrné elektrárny.....	16
2.3.3. Typy větrných motorů.....	17
2.4. Energie biomasy	18
2.4.1. Rozdělení biomasy	18
2.4.2. Zpracování biomasy	19
2.5. Geotermální systémy	20
2.5.1. Geotermální energie	20
2.5.2. Nízkoteplotní zdroje	20
2.5.3. Vysokoteplotní zdroje	21
3. TECHNOLOGIE PRO AKUMULACI ENERGIE.....	22
3.1. Mechanické systémy	23
3.1.1. Přečerpávací vodní elektrárna	23
3.1.2. Setrvačnick.....	25
3.1.3. Akumulace energie stlačeným vzduchem.....	27
3.2. Chemické systémy.....	29
3.2.1. Akumulace do vodíku	29
3.2.2. Syntetický zemní plyn.....	31
3.3. Elektromagnetické systémy.....	33

3.3.1. Superkapacitory.....	33
3.3.2. Supravodivý magnetický akumulační systém.....	35
3.4. Tepelné systémy	37
3.4.1. Akumulace citelného tepla.....	37
3.4.2. Akumulace latentního tepla	38
3.5. Elektrochemické systémy	39
3.5.1. Olověné akumulátory.....	39
3.5.2. Nikl-kadmiové akumulátory	41
3.5.3. Li-ion akumulátory.....	43
3.5.4. Sodíkovo-sírové akumulátory.....	44
3.5.5. Průtokové akumulátory.....	46
4. BATERIOVÉ ÚLOŽIŠTĚ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ.....	48
4.1. Akumulace elektrické energie	48
4.2. Omezení odběrových špiček.....	49
4.3. Dodržení parametrů na předávacím místě PS/DS	50
4.4. Záložní zdroj.....	50
4.5. Využití pro obnovitelné zdroje energie	50
4.6. Regulace frekvence.....	51
5. NÁVRH SYSTÉMU.....	52
5.1. Výběr lokality	53
5.2. Analýza naměřených dat.....	55
5.2.1. Měřicí přístroj.....	55
5.2.2. Vyhodnocení naměřených dat v bodě 4.....	56
5.2.3. Vyhodnocení naměřených dat v bodě 1.....	60
5.2.4. Vyhodnocení naměřených dat v bodě 2.....	62
5.2.5. Vyhodnocení naměřených dat v bodě 3.....	65
5.3. Návrh bateriového úložiště	68
5.3.1. Schéma navrhovaného systému.....	68
5.3.2. Předpoklad	68
5.3.3. Určení kapacity bateriového úložiště	69
5.3.4. Výběr jednotlivých komponent.....	73

5.4.	Výběr vhodného obnovitelného zdroje energie	76
5.5.	Návrh fotovoltaické elektrárny.....	77
5.5.1.	Schéma navrhovaného systému	77
5.5.2.	Návrh.....	78
5.5.3.	Výběr jednotlivých komponent.....	82
5.6.	Simulace chodu navrhovaného systému	86
5.6.1.	Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v červenci	87
5.6.2.	Spotřeba elektrické energie obce Dolní Miletín	88
5.6.3.	Simulace chodu navrhovaného systému ve třicátém roce života.....	89
6.	Technicko-ekonomické zhodnocení	90
6.1.	Linkový kondicionér	91
6.2.	Navrhovaný systém.....	93
6.3.	Technicko-ekonomické porovnání navrhovaného systému a linkového kondicionéru	94
7.	ZÁVĚR.....	95
7.1.	Shrnutí obsahu práce	95
7.2.	Novost	95
7.3.	Přínos práce pro autora.....	95
7.4.	Přínos práce pro společnost.....	96
7.5.	Jak s prací nakládat dál?.....	96
8.	SEZNAM LITERATURY	98

Seznam obrázků

Obrázek 1: Podíl jednotlivých obnovitelných zdrojů energie v České republice za rok 2020	3
Obrázek 2: Mapa trvání slunečního svitu v České republice	5
Obrázek 3: Roční úhrn globálního slunečního záření v České republice	5
Obrázek 4: Výroba fotovoltaického článku metodou BSF	7
Obrázek 5: Náhradní schéma fotovoltaického článku	8
Obrázek 6: V-A charakteristika fotovoltaického článku	9
Obrázek 7: Struktura fotovoltaického modulu z krystalického křemíku	11
Obrázek 8: Rozdělení vodních elektráren	12
Obrázek 9: Schéma vodní elektrárny	14
Obrázek 10: Pohyb větru	15
Obrázek 11: Schéma větrné elektrárny	16
Obrázek 12: Savoniův motor (vlevo) a třílistý motor (vpravo)	17
Obrázek 13: Rozdělení biomasy	18
Obrázek 14: Procesy zpracování biomasy	19
Obrázek 15: Technologické schéma tepelného čerpadla	21
Obrázek 16: Geotermální elektrárna na mokrou páru	21
Obrázek 17: Přehled technologií pro akumulaci elektrické energie.....	22
Obrázek 18: Schéma přečerpávací vodní elektrárny	24
Obrázek 19: Schéma FESS	26
Obrázek 20: Schéma CAES	28
Obrázek 21: Schéma akumulace do vodíku a spolupráce obnovitelného zdroje energie s elektrickou sítí	30
Obrázek 22: Schéma technologie P2G	32
Obrázek 23: Schéma nabíjení a vybíjení superkapacitoru	34
Obrázek 24: Schéma technologie SMES	36
Obrázek 25: Metoda Ruths.....	37
Obrázek 26: Porovnání akumulace citelného a latentního tepla	38
Obrázek 27: Schéma olověného článku	39
Obrázek 28: Válcový NiCd akumulátor	42
Obrázek 29: Schéma Li-ion akumulátoru	43
Obrázek 30: Schéma NaS akumulátoru	45

Obrázek 31: Schéma průtokového akumulátoru	47
Obrázek 32: Spotřební křivka ve dni minima a maxima	48
Obrázek 33: Průběhy napětí a výkonů z nabíjecí stanice	49
Obrázek 34: Postup návrhu systému.....	52
Obrázek 35: Měřicí body	54
Obrázek 36: Trasování elektrického vedení	55
Obrázek 37: Kvalimetr Fluke 1744.....	56
Obrázek 38: Průběh průměrných desetiminutových hodnot napětí v bodě 4	57
Obrázek 39: Průběh minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 4	58
Obrázek 40: Průběh maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 4.....	58
Obrázek 41: Průběh celkového středního odebíraného výkonu v bodě 4.....	59
Obrázek 42: Průběh středních/minimálních/maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 1	61
Obrázek 43: Průběh celkového středního odebíraného výkonu v bodě 1	61
Obrázek 44: Průběh maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 2.....	63
Obrázek 45: Průběh minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 2	63
Obrázek 46: Průběh průměrných desetiminutových hodnot napětí v bodě 2	64
Obrázek 47: Průběh celkového středního odebíraného výkonu v bodě 2.....	64
Obrázek 48: Průběh maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 3.....	65
Obrázek 49: Průběh minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 3	66
Obrázek 50: Průběh průměrných desetiminutových hodnot napětí v bodě 3	66
Obrázek 51: Průběh celkového středního odebíraného výkonu v bodě 3.....	67
Obrázek 52: Schéma distribuční soustavy s paralelně připojeným bateriovým úložištěm	68
Obrázek 53: Průběh odebíraného výkonu v bodě 1 a počtu událostí v bodě 4.....	69
Obrázek 54: Průběhy odběru elektrické energie obce ve všední/víkendový den	70
Obrázek 55: Průběhy odběru elektrické energie z distribuční sítě bez bateriového úložiště, s bateriovým úložištěm a průběh nabíjení a vybíjení bateriového úložiště v zimní sezóně.....	71
Obrázek 56: Bateriový modul WATTSONIC 3,84 kWh	73
Obrázek 57: Řídící jednotka WATTSONIC	74
Obrázek 58: Racková skříň WATTSONIC	75

Obrázek 59: Schéma distribuční soustavy s paralelně připojeným bateriovým úložištěm a fotovoltaickou elektrárnou.....	77
Obrázek 60: Měsíční výroba elektrické energie FV elektrárny	80
Obrázek 61: Denní výroba elektrické energie FV elektrárny v průběhu roku	80
Obrázek 62: Průběh výroby FVE a spotřeby v zimní sezóně (v prosinci)	81
Obrázek 63: Průběh výroby FVE a spotřeby v letní sezóně (v červenci)	81
Obrázek 64: FV modul Trina 450 Wp	82
Obrázek 65: Nosná konstrukce FV modulů	83
Obrázek 66: Konektory MC4	84
Obrázek 67: Solární kabel	84
Obrázek 68: FV střídač WATTSONIC-30KTL-HT	85
Obrázek 69: Simulace chodu navrhovaného systému v červenci	87
Obrázek 70: Toky energií.....	88
Obrázek 71: Simulace chodu navrhovaného systému ve třicátém roce života v prosinci	89
Obrázek 72: Linkový kondicionér EAFS050-S (SM)	92

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání typů FV článků	7
Tabulka 2: Parametry fotovoltaického článků z krystalického křemíku	10
Tabulka 3: Technické parametry přečerpávací vodní elektrárny	24
Tabulka 4: Technické parametry FESS	26
Tabulka 5: Technické parametry CAES	28
Tabulka 6: Technické parametry akumulace do vodíku	30
Tabulka 7: Technické parametry technologie P2G	32
Tabulka 8: Technické parametry superkapacitoru	34
Tabulka 9: Technické parametry technologie SMES	36
Tabulka 10: Technické parametry olověných akumulátorů	40
Tabulka 11: Technické parametr NiCd akumulátoru	42
Tabulka 12: Technické parametry Li-ion akumulátoru	44
Tabulka 13: Technické parametry NaS akumulátoru	45
Tabulka 14: Technické parametry VRB akumulátoru	47
Tabulka 15: Počet přepětí/podpětí v bodě 4	59
Tabulka 16: Počet přepětí/podpětí v bodě 1	60
Tabulka 17: Počet přepětí/podpětí v bodě 2	62
Tabulka 18: Počet přepětí/podpětí v bodě 3	65
Tabulka 19: Technické parametry	73
Tabulka 20: Technické parametry	74
Tabulka 21: Měsíční a denní hodnoty slunečního ozáření.....	78
Tabulka 22: Technické parametry modulu	83
Tabulka 23: Technické parametry střídače	85
Tabulka 24: Technicko-ekonomické parametry linkového kondicionéru	91
Tabulka 25: Ceny jednotlivých položek navrhovaného systému	93
Tabulka 26: Ekonomické porovnání linkového kondicionéru a navrhovaného systému	94

Seznam příloh

- Příloha 1: Průběh jalového výkonu v rozvodně Dasný
- Příloha 2: Doba najetí bateriového úložiště z 0 W na plný výkon
- Příloha 3: Vyhodnocení kvality elektrické energie v odběrném místě
- Příloha 4: Detail průběhu minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 4
- Příloha 5: Detail průběhu maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 4
- Příloha 6: Detail průběhu maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 2
- Příloha 7: Detail průběhu minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 2
- Příloha 8: Detail průběhu maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 3
- Příloha 9: Detail průběhu minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 3
- Příloha 10: Výstup výpočtu plochy a výkonu fotovoltaické elektrárny ze softwaru Mathematica Wolfram
- Příloha 11: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v lednu
- Příloha 12: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v únoru
- Příloha 13: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v březnu
- Příloha 14: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v dubnu
- Příloha 15: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v květnu
- Příloha 16: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v červnu
- Příloha 17: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v srpnu
- Příloha 18: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v září
- Příloha 19: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v říjnu
- Příloha 20: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v listopadu
- Příloha 21: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v prosinci
- Příloha 22: Soubor na CD - Měřicí_body_1,2,3,4.xlsx
- Příloha 23: Soubor na CD - Simulace_chodu_systému.xlsx

Seznam zkratek

AC	Střídavá veličina
AKU	Akumulátor
BÚ	Bateriové úložiště
BSF	Technologie výroby fotovoltaického článku na zadní straně
CAES	Technologie ukládání energie pomocí stlačeného vzduchu
DC	Stejnoseměrná veličina
DS	Distribuční soustava
DTS	Distribuční trafostanice
EG.D, a.s.	Distributor elektřiny a plynu
EVA	Etylenvinylacetát
FESS	Technologie ukládání energie pomocí setrvačnicku
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
IRR	Vnitřní výnosové procento
KDE	Kvalita dodávky energií
NN	Nízké napětí
NPV	Čistá současná hodnota
OM	Odběrné místo
OPTAK	Operační program Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost
OZE	Obnovitelný zdroj energie
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
PQ	Kvalita energie
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
SMES	Technologie ukládání energie pomocí supravodivosti
TČ	Tepelné čerpadlo
TR	Transformátor
TV	Teplá voda
VN	Vysoké napětí

Seznam použitých technických norem

- I. ČSN EN 50160 „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě“

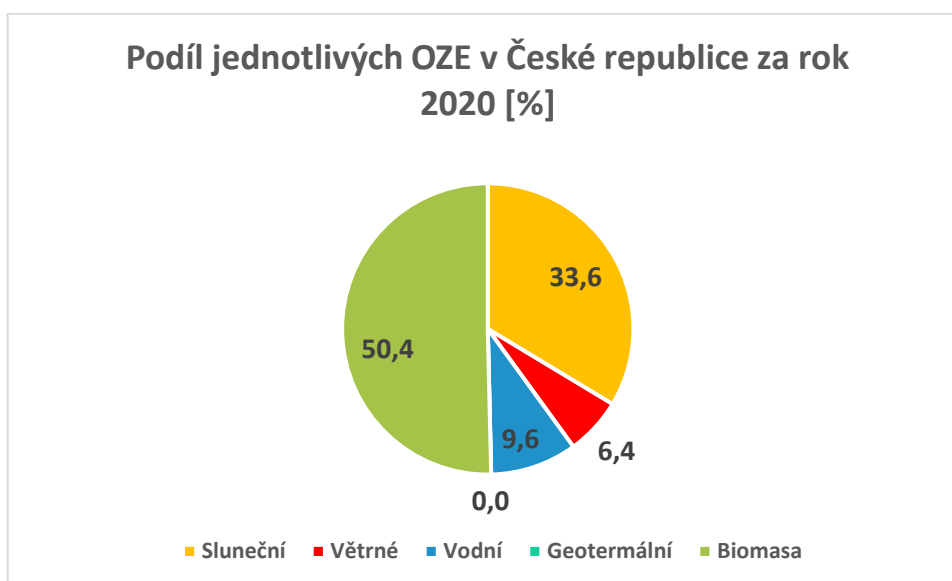
1. ÚVOD

V posledních letech je z pohledu provozovatele distribuční soustavy kladen velký důraz na stálé zvyšování kvality elektrické energie v distribuční soustavě. Hlavním důvodem této snahy jsou reklamace ze strany zákazníků týkající se právě nedostatečné kvality elektrické energie v daném odběrném místě, která může v krajních případech způsobit až poškození některých spotřebičů zapojených do elektrické sítě. Dalším důvodem mohou být každoroční benefity vyplácené Energetickým regulačním úřadem jednotlivým distributorům elektrické energie na základě ukazatelů spolehlivosti dodávky elektrické energie. Jedním ze způsobů, jak zlepšit kvalitu elektrické energie v určitém místě distribuční soustavy, je pro distributora použití bateriového úložiště.

Tato diplomová práce je rozdělena na čtyři části. První část obsahuje nejprve souhrn jednotlivých obnovitelných zdrojů energie, které jsou v současné době známy a které lze využít jako zdroj elektrické energie pro bateriové úložiště. Dále jsou zde popsány jednotlivé technologie pro akumulaci elektrické energie. Druhá část (kapitola 4) popisuje výhody použití bateriového úložiště v distribuční soustavě. V třetí (praktické) části se zabývám návrhem systému obsahující bateriové úložiště napájené vybraným obnovitelným zdrojem energie. Tento systém bude navrhnout pro stabilizaci odběrového výkonu a zlepšení kvality elektrické energie v obci Dolní Miletín v okrese České Budějovice. V poslední čtvrté části je technicko-ekonomické porovnání navrhovaného systému a systému, který je aktuálně distributorem používán ke zvýšení kvality elektrické energie v distribuční soustavě.

2. OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE

Obnovitelné zdroje energie (OZE) dnes již neodmyslitelně patří do energetického mixu většiny zemí. Stále však energetickému mixu vévodí elektrická energie vyrobená z fosilních paliv jako jsou ropa, uhlí, zemní plyn. Fosilní paliva jsou zdrojem vyčerpatelným a lidstvo ho má k dispozici pouze omezené množství. Z důvodu, že fosilní paliva jsou nenahraditelným zdrojem v jiných oblastech průmyslu (např. chemický průmysl), tak v oblasti výroby elektrické energie přebírají jejich pozici zdroje obnovitelné, které jsou zdrojem nevyčerpatelným. Dalším vysvětlením nástupu obnovitelných zdrojů energie v energetice je snaha o snížení emisí oxidu uhličitého, který vzniká při spalování uhlénoho paliva v elektrárnách. Mezi obnovitelné zdroje energie lze zařadit energii Slunce, vody, větru, biomasy a geotermální. Podíl na výrobě elektrické energie jednotlivých obnovitelných zdrojů za rok 2020 v České republice je zobrazen na následujícím obrázku.



Obrázek 1: Podíl jednotlivých obnovitelných zdrojů energie v České republice za rok 2020

2.1. Fotovoltaické systémy¹

2.1.1. Energie Slunce

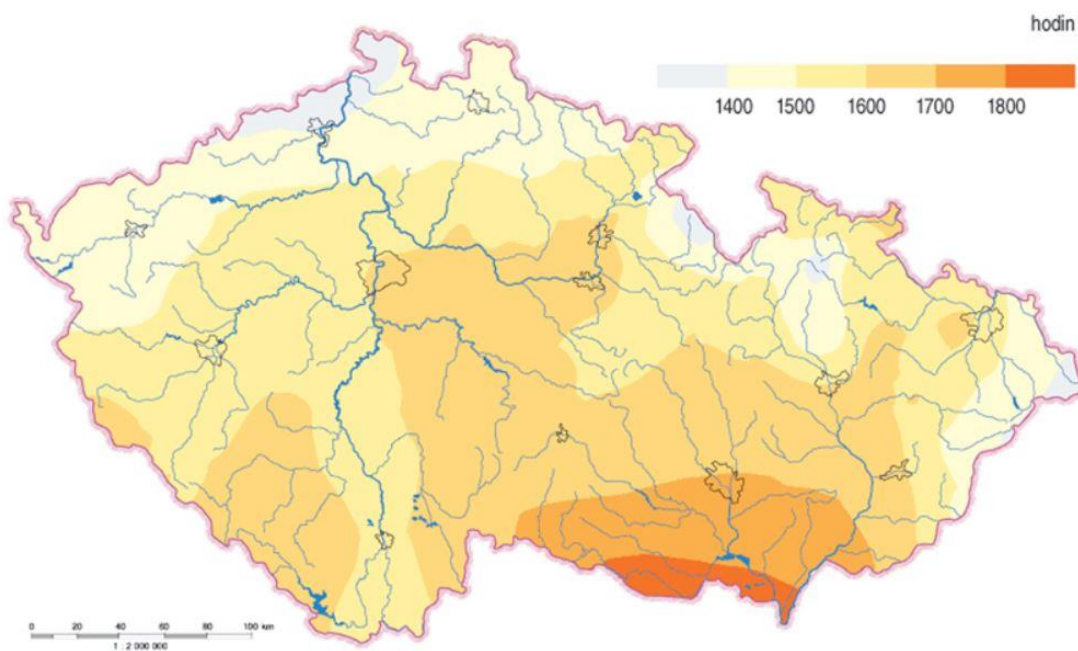
Sluneční energie patří k tzv. obnovitelným zdrojům energie a je jedním z nejstarších a nedostupnějším zdrojem energie na Zemi. Sluneční energii využívá lidstvo již dlouhou dobu. Ovšem dříve ji lidé využívali spíše pasivně, a to například k sušení sena. Aktivně jsme začali sluneční energii využívat až v posledních staletích.

Slunce je hvězda, která je od Země vzdálena zhruba 150 milionů kilometrů. Její stáří se odhaduje na 4,6 miliard let a předpokládá se, že bude svítit dalších 5–7 miliard let. Slunce je koule o průměru 1 400 000 km, což odpovídá zhruba 109 průměrů Země a jeho hmotnost je v porovnání se Zemí 330 tisíckrát větší. Slunce je tvořeno žhavým plazmatem o povrchové teplotě 5 800 K. Výkon slunce je přibližně $4 \cdot 10^{26}$ W. Tato sluneční energie je přenášena na Zemi pomocí elektromagnetického záření. Ovšem ne všechna energie vyzařovaná Sluncem dopadne na Zemi. Na povrch atmosféry Země dopadá záření o výkonu $173 \cdot 10^{15}$ W. Z této hodnoty lze získat měrný výkon slunečního záření dopadajícího na povrch zemské atmosféry, jehož hodnota je $1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Tato hodnota se nazývá solární konstanta. Takový výkon pochopitelně nedopadá na samotný povrch Země. Část záření se odrazí (odražené záření), část rozptýlí (difúzní záření) a část projde atmosférou a dopadne na zemský povrch (absorbované záření).²

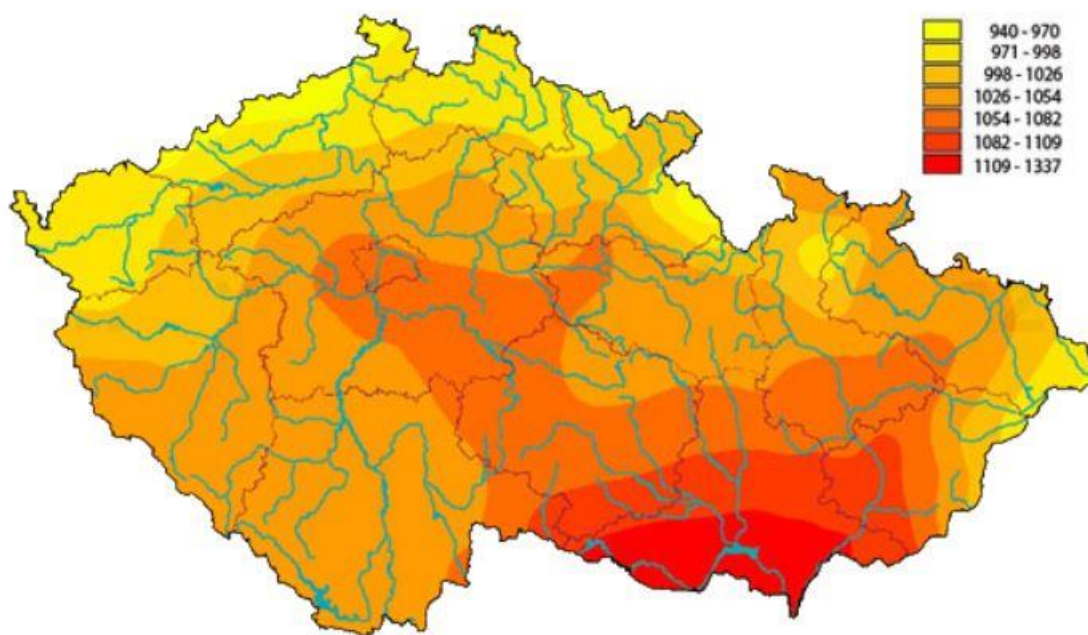
Na obrázcích 2 a 3 jsou znázorněny mapy České republiky, které ukazují nejvhodnější lokality pro stavbu fotovoltaické elektrárny. Z těchto map je vidět, že oblasti s nejdelší dobou slunečního záření o co největší intenzitě, se nacházejí v jižní části České republiky.

¹ V této kapitole bude většina informací a obrázků čerpána ze zdroje: BENDA, Vítězslav. *Přednášky z předmětu Aplikace solárních systémů (B1M13ASS)*. ČVUT FEL v Praze, 2021.

² MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).



Obrázek 2: Mapa trvání slunečního svitu v České republice ³



Obrázek 3: Roční úhrn globálního slunečního záření v České republice ⁴

³ ISOFENERGY. *Fotovoltaika v podmínkách České republiky* [online, cit. 2022-01-22]. Dostupné z: Fotovoltaika - sluneční záření v České republice (isofenenergy.cz).

⁴ Tamtéž.

2.1.2. Princip fotovoltaického článku

Fotovoltaika je obor, který se zabývá přeměnou sluneční energie na energii elektrickou. Základním stavebním kamenem této přeměny je fotovoltaický jev, který je zvláštním typem jevu fotoelektrického. Fotoelektrický jev nastává v případě, kdy dojde k absorpci elektromagnetického záření látkou, kterou bývá zpravidla kov. Pokud jsou uvolněné elektrony v důsledku dopadajícího záření z ozařované látky emitovány (opouští látku), tak se jedná o vnější fotoelektrický jev. V případě vnitřního fotoelektrického jevu zůstávají uvolněné elektrony uvnitř látky a plní funkci tzv. vodivostních elektronů. Fotovoltaický jev je tedy podkategorií vnitřního fotoelektrického jevu a vytváří se na rozhraní dvou ozářených polovodičů, na kterém se vytvoří rozdíl potenciálů. Při uvolnění elektronu z vazby vzniká pár elektron (-) – díra (+). Pro vytvoření rozdílu elektrických potenciálů (fotoelektrického jevu) je třeba takto generovaný pár od sebe oddělit. V homogenních materiálech nedochází k oddělení páru elektron – díra, a tak nastupuje proces rekombinace. Rekombinace znamená znovuobsazení elektronu do svého původního stavu. Aby došlo k potlačení rekombinace, tak je potřeba využít, jako základní materiál FV článku, materiál s vestavěným elektrickým polem, díky kterému dojde k oddělení páru elektron – díra. Ve fotovoltaice se jako základní materiály používají polovodiče s PN přechodem, který vznikne spojením polovodiče typu P (přebytek děr) a polovodiče typu N (přebytek elektronů). Nejčastěji využívaný základní materiál je ve fotovoltaice krystalický křemík, který je čtyřmocný. Polovodič typu P lze získat tak, že do čtyřmocného křemíku je přidán trojmocný prvek (např. indium), který zajistí, že se v místě nenasyčené vazby objeví díra. Jelikož má díra kladný náboj, tak tento polovodič typu P má pozitivní vodivost. Pro získání polovodiče typu N je třeba do čtyřmocného křemíku přidat prvek pětimocný (např. fosfor), jehož pátý elektron bude vázán pouze slabě. Jelikož má elektron náboj záporný, tak je vytvořen polovodič s negativní vodivostí. Díky PN přechodu je v materiálu vytvořeno vnitřní elektrické pole, které zajistí rozdělení párů elektron-díra. Elektrony jsou urychlovány do jedné oblasti, která se nabíjí záporně a díry jsou urychlovány do druhé oblasti, která se nabíjí kladně. ⁵

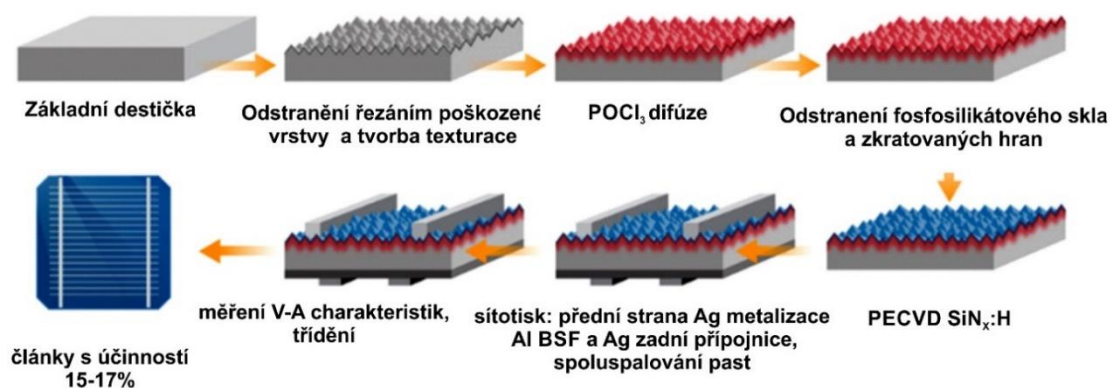
⁵ FINSTERLE, Tomáš. *Diagnostika degradace fotovoltaických článků a modulů* [online, cit. 2022-01-22]. Dostupné z: F3-D-2021-Finsterle-Tomas-Disertace Finsterle-1.pdf (cvut.cz).

Dnes až 95 % celkové produkce FV článků je tvořeno z krystalického křemíku, který je ve formě monokrystalu vytvořeného Czochralského metodou nebo polykrystalu vytvořeného například Bridgmanovou metodou. K výrobě monokrystalického či polykrystalického křemíku je využíván křemík o vysoké čistotě minimálně 99,9999 %. Porovnání těchto dvou typů článků je v tabulce 1.

Tabulka 1: Porovnání typů FV článků ⁶

Typ křemíkového článku	Provozní účinnost [%]	Maximální provozní účinnost [%]	Laboratorní účinnost [%]
Monokrystalický	14 - 16	22	25
Polykrystalický	11 - 14	16	20

Technologií výroby FV článku je známo několik. Do nedávna byla nejvíce využívanou technologií výroby metoda BSF (Back Surface Field), jejíž postup je znázorněn na obrázku 4.

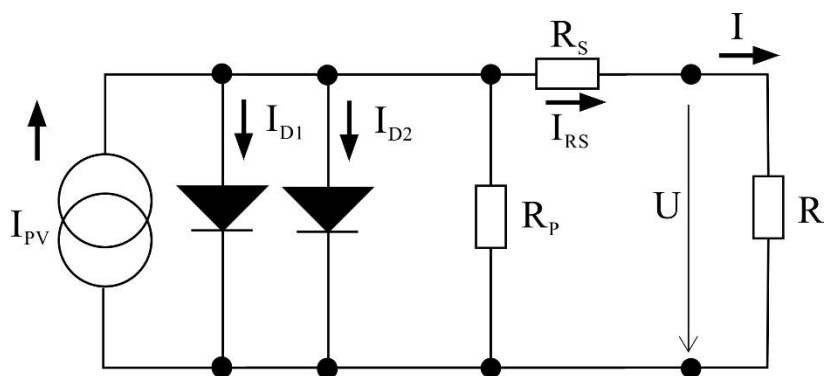


Obrázek 4: Výroba fotovoltaického článku metodou BSF ⁷

Chování fotovoltaického článku lze simulovat pomocí náhradního schématu, které je zobrazeno na následujícím obrázku.

⁶ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

⁷ FINSTERLE, Tomáš. *Diagnostika degradace fotovoltaických článků a modulů* [online, cit. 2022-01-22]. Dostupné z: F3-D-2021-Finsterle-Tomas-Disertace Finsterle-1.pdf (cvut.cz).



Obrázek 5: Náhradní schéma fotovoltaiického článku ⁸

Výstupní stejnosměrný proud FV článku lze z náhradního schématu vyjádřit pomocí rovnice 1: ⁹

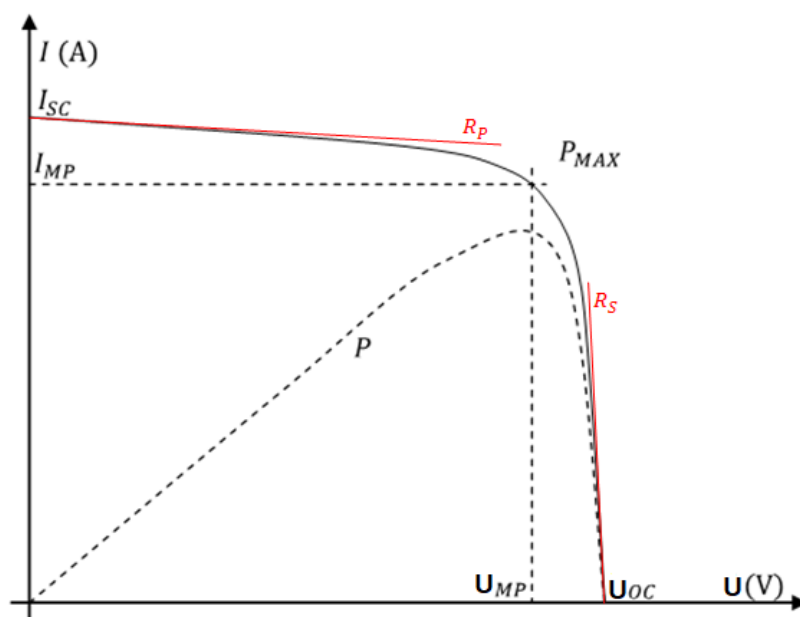
$$I = I_{PV} - I_{01} \left[e^{\left(\frac{q(U+IR_S)}{\xi_1 kT} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\left(\frac{q(U+IR_S)}{\xi_2 kT} \right)} - 1 \right] - \frac{U+IR_S}{R_P} \quad [\text{A}] \quad (1),$$

- kde I_{PV} je proud vybuzený ozářením článku [A],
 T je termodynamická teplota [K],
 k je Stephan-Boltzmannova konstanta [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$],
 q je elementární náboj elektronu [C],
 ξ_1, ξ_2 jsou diodové faktory [-],
 I_{01} je difuzní složka proudu [A],
 I_{02} je generačně-rekombinační složka proudu [A],
 U je napětí článku [V],
 I je proud článku [A],
 R_S je sériový odpor [Ω],
 R_P je paralelní odpor [Ω].

⁸ FINSTERLE, Tomáš. *Diagnostika degradace fotovoltaiických článků a modulů* [online, cit. 2022-01-22]. Dostupné z: F3-D-2021-Finsterle-Tomas-Disertace Finsterle-1.pdf (cvut.cz).

⁹ Tamtéž.

Rovnice 1 popisuje volt-ampérovou charakteristiku FV článku. Volt-ampérová charakteristika FV článku se všemi vyznačenými důležitými body je znázorněna na obrázku 6.



Obrázek 6: V-A charakteristika fotovoltaického článku

Důležitými faktory jsou faktor plnění a účinnost článku, které lze vyjádřit následujícími vztahy.

Faktor plnění (FF):

$$FF = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad [-] \quad (2),$$

kde U_{MP} je napětí v bodě maximálního výkonu [V],

I_{MP} je proud v bodě maximálního výkonu [A],

U_{OC} je napětí naprázdno [V],

I_{SC} je proud nakrátko [A].

Účinnost článku:

$$\eta = \frac{U_{MP} \cdot I_{MP}}{G \cdot A} \quad [-] \quad (3),$$

kde U_{MP} je napětí v bodě maximálního výkonu [V],

I_{MP} je proud v bodě maximálního výkonu [A],

G je ozáření článku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],

A je plocha článku [m^2].

Základní technické parametry fotovoltaických článků jsou znázorněny v tabulce 2.

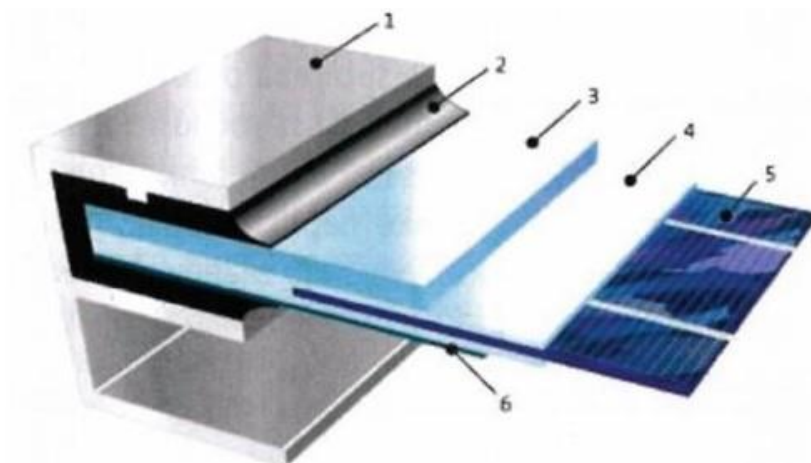
Tabulka 2: Parametry fotovoltaického článku z krystalického křemíku

Parametry	Hodnoty
Výstupní napětí [V]	0,5
Výstupní proudová hustota [mA/cm ²]	35
Plocha [š x v mm ²]	156 x 156
Tloušťka [μm]	≤ 180

2.1.3. Fotovoltaický modul

V tabulce 2 jsou znázorněny výstupní elektrické parametry FV článků (elektrické napětí a hustota elektrického proud). Tyto hodnoty jsou příliš malé. Pro širší využití se FV články spojují (nejčastěji do série) do FV modulů, které disponují vhodnějšími výstupními parametry. Dalším důležitým důvodem, proč se FV články spojují do modulů, je jejich mechanická ochrana. Postup výroby FV modulu je následující. Jako základní podložka, na které bude FV modul vznikat, je využito solární sklo s nízkým obsahem železa. Na sklo se následně položí laminační folie nejčastěji z etylen-vinyl-acetát (EVA). Další vrstva je složena již ze samotných FV článků spojených do řetězce. Spojení článků se provádí nejčastěji pájením olovnatou pájkou. Na řetězec článků se položí další laminační folie z EVA a nakonec, jako poslední vrstva, se položí zadní krycí folie. Tento soubor jednotlivých vrstev je dále uložen do laminátoru a prochází procesem laminace, po kterém se ze souboru vrstev stává jeden nerozebíratelný celek. Ukázka takto složeného modulu je na obrázku 7.¹⁰

¹⁰ FINSTERLE, Tomáš. *Diagnostika degradace fotovoltaických článků a modulů* [online, cit. 2022-01-22]. Dostupné z: F3-D-2021-Finsterle-Tomas-Disertace Finsterle-1.pdf (cvut.cz).



1. hliníkový rám, 2. těsnění, 3. tvrzené sklo, 4. EVA, 5. fotovoltaický článek, 6. krycí fólie (tedlar)

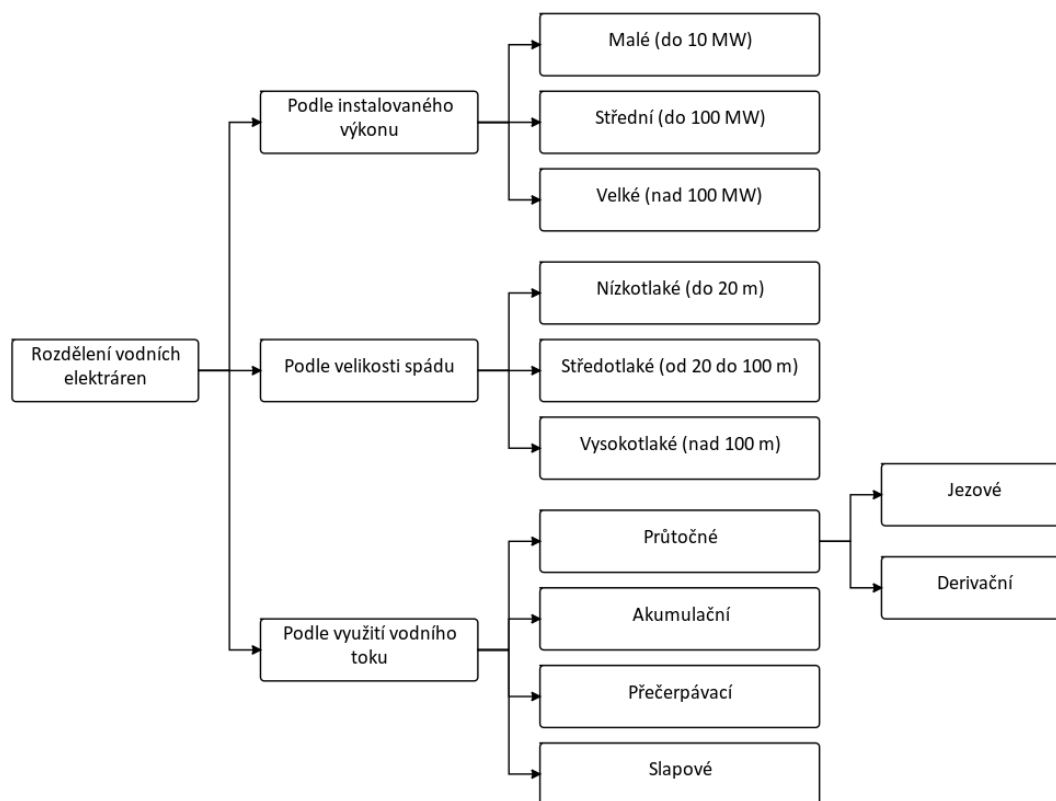
Obrázek 7: Struktura fotovoltaického modulu z krystalického křemíku ¹¹

¹¹ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

2.2. Vodní systémy

2.2.1. Rozdělení vodních elektráren

Vodní elektrárny lze dělit podle různých kritérií. V literatuře se nejčastěji setkáváme s rozdělením vodních elektráren podle velikosti instalovaného výkonu, podle velikosti spádu a podle využití vodního toku. Základní rozdělení vodních elektráren je na následujícím obrázku.



Obrázek 8: Rozdělení vodních elektráren ¹²

¹² VOBOŘIL, David. *Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR* [online, cit. 2022-02-25]. Dostupné z: [Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR \(oenergetice.cz\)](http://www.oenergetice.cz).

2.2.2. Energie vody

Vodní elektrárna využívá k výrobě elektrické energie kinetickou a potenciální energii vody.

Kinetická energie:

$$E = \int m \cdot c \cdot dc = \frac{1}{2} \cdot m \cdot c^2 \quad [\text{J}] \quad (4),$$

kde m je hmotnost [kg],
 c je rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 dc je element rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Potenciální energie:

$$E = \int_0^h F \cdot dh = \int_0^H m \cdot g \cdot dh = m \cdot g \cdot H \quad [\text{J}] \quad (5),$$

kde F je síla [N],
 dh je element délky [m],
 g je tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],
 H je spád [m].

Pro posouzení využitelnosti vodní elektrárny v daném místě je důležitý hydroenergetický potenciál. Hydroenergetický potenciál mezi body 1 a 2 je dán následujícím vztahem:

$$E_{1-2} = g \cdot (H_1 - H_2) + \frac{(p_1 - p_2)}{\rho} + \frac{(c_1^2 - c_2^2)}{2} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (6),$$

kde p je tlak [Pa],
 ρ je hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

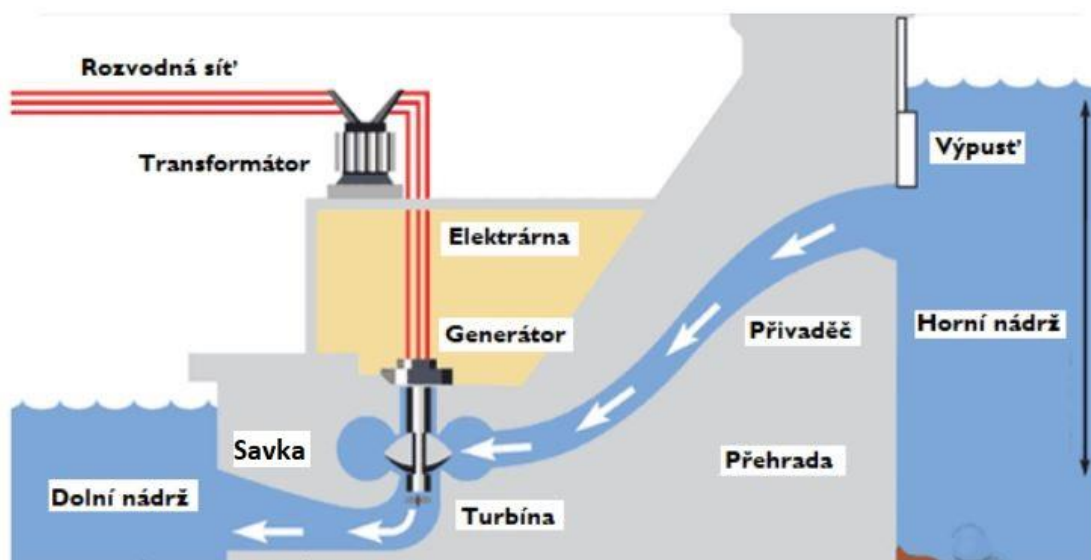
Rovnice 6 se skládá ze tří složek, a to postupně ze složky potenciální, tlakové a rychlostní. Pro výpočet výsledného výkonu vodní turbíny je důležitá hlavně potenciální složka hydroenergetického potenciálu. Výkon turbíny pak lze spočítat pomocí následující rovnice:

$$P_t = \rho \cdot Q \cdot E_{1-2} \cdot \eta_t \quad [\text{J}] \quad (7),$$

kde Q je průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 η_t je účinnost turbíny [%].

2.2.3. Uspořádání vodní elektrárny

Vodní elektrárna se skládá z horní nádrže, kde je umístěna vstupní voda potřebná k výrobě elektrické energie. Dále je zde výpust', kterou lze regulovat průtok vody elektrárnou. Pokud je výpust' otevřená, tak je vodě z horní nádrže umožněn průchod přívodním potrubím (přivaděčem) k vodní turbíně. Ve vodních elektrárnách nejčastěji nalezneme vodní turbíny Francisovy, Kaplanovy či Peltonovy. Voda dopadající na lopatky turbíny tuto turbínu roztáčí a mění svou kinetickou energii na energii mechanickou. Turbína, která je přes hřídel mechanicky spojená s generátorem (turbogenerátor), roztáčí generátor, který mění mechanickou energii na energii elektrickou. Voda, která odevzdala svou energii turbíně, je odpadním potrubím (savkou) odvedena do dolní nádrže.



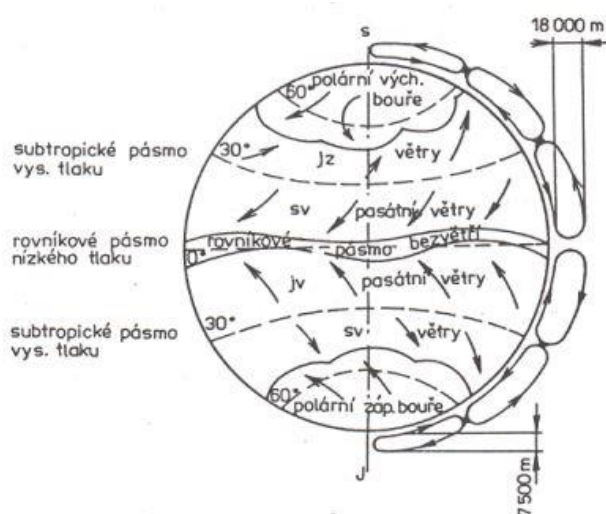
Obrázek 9: Schéma vodní elektrárny ¹³

¹³ PUCHNAR, Jiří. *Ani vodní elektrárny nejsou bezrizikovým energetickým zdrojem* [online, cit. 2022-02-25]. Dostupné z: Ani vodní elektrárny nejsou bezrizikovým energetickým zdrojem (oenergetice.cz).

2.3. Větrné systémy

2.3.1. Energie větru

Lze říct, že za vznikem větru stojí Slunce, které svými paprsky ohřívá zemský povrch. Ohřátý zemský povrch předává své teplo okolní vrstvě vzduchu a tím ji ohřívá. Ohřátý vzduch má nižší hustotu, a tak stoupá vzhůru. Vlivem rotace zeměkoule vzniká proudění vzduchu, které následně způsobuje tlakové rozdíly. Vyrovnáním tlakových rozdílů vzniká vítr. Směr pohybu větru je znázorněn na následujícím obrázku.¹⁴



Obrázek 10: Pohyb větru¹⁵

Větrné elektrárny využívání kinetickou energii větru. Kinetickou energii hmoty o hmotnosti m pohybující se rychlostí c lze vyjádřit pomocí rovnice 8. Výkon turbíny větrné elektrárny P_v lze spočítat pomocí následujícího vztahu:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad [\text{W}] \quad (8),$$

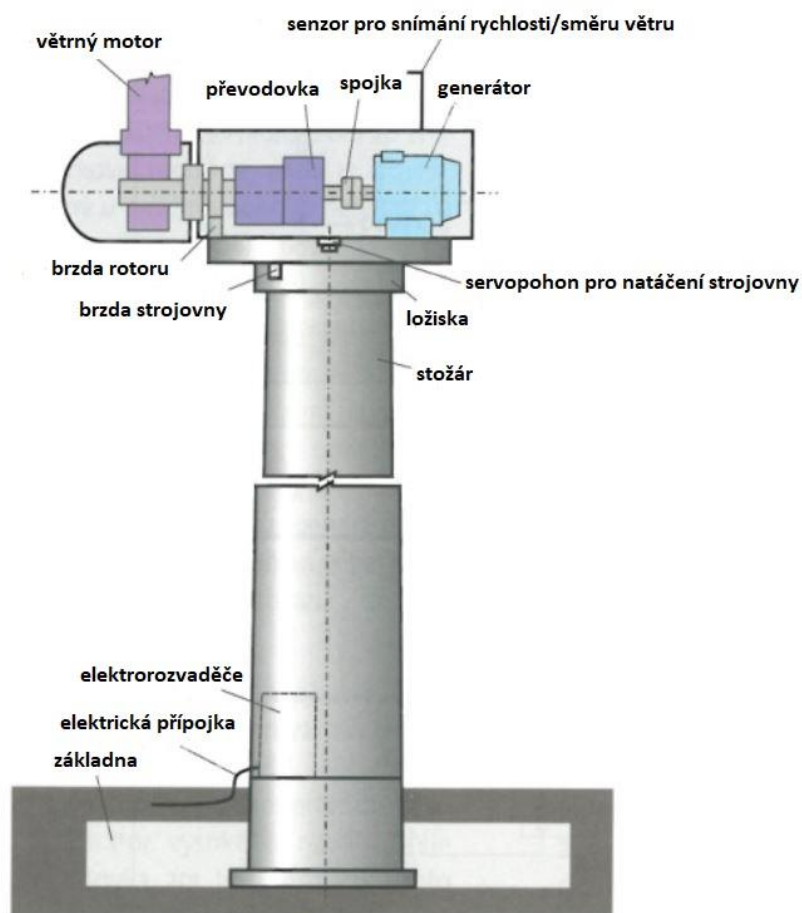
kde c_p je součinitel výkonu [-],
 ρ je hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].
 S je plocha kolmá k proudícímu větru [m^2].

¹⁴ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

¹⁵ Tamtéž.

2.3.2. Prvky větrné elektrárny

Základní schéma větrné elektrárny je zobrazeno na obrázku 11.



Obrázek 11: Schéma větrné elektrárny ¹⁶

Větrnou elektrárnu lze rozdělit na čtyři části. Rotor, strojovna, věž a základna. Rotor slouží k přeměně kinetické energie větru na energii mechanickou, která je dále přeměněna na energii elektrickou. Strojovna obsahuje přístroje, které se starají o natáčení rotoru do polohy kolmé k směru proudění větru. Rychlost větru musí být minimálně 6 km/hod. Tato podmínka je zásadní při rozhodování velikosti věže. Základna je betonová a slouží k stabilnímu ukotvení elektrárny. ¹⁷

¹⁶ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

¹⁷ Tamtéž.

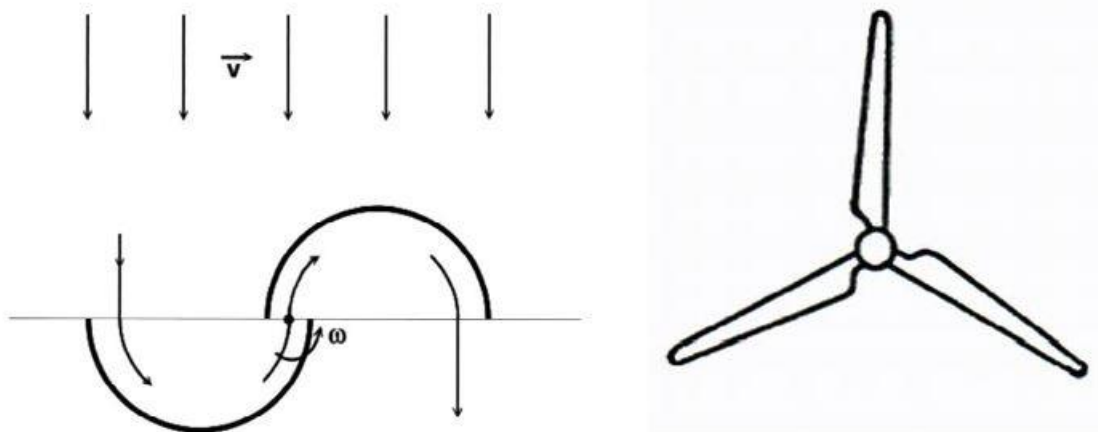
2.3.3. Typy větrných motorů

Větrné motory lze dělit podle různých kritérií. V literatuře nejčastěji narazíme na dělení podle aerodynamického principu funkce na motory odporové a vztlakové.

Odporové motory jsou nejstarším typem motorů používaných ve větrných elektrárnách. Fungují na principu aerodynamického odporu, který se vytváří na ploše vystavené proudícímu větru. Díky tomuto odporu na ploše vystavené větrem vzniká síla, která roztáčí lopatky rotoru. Pro vytvoření hnacího momentu je třeba, aby obvodová rychlost rotoru byla menší než rychlost proudícího větru. Mezi hlavní výhody těchto motorů patří jednoduchá konstrukce nebo nezávislost na směru větru. Nevýhodou těchto motorů je nízká účinnost (15 – 23 %), nízké otáčky a nízký součinitel využití energie větru.¹⁸

Vztlakové motory pracují na principu rovnice kontinuity. Vztlakové motory zpomalují rychlost větru, který proudí skrz jejich pracovní plochu a tím mu odebírají část jeho kinetické energie, která se přeměňuje na energii mechanickou. Aby vztlakové motory fungovaly správně, je třeba, aby byly vždy vystaveny proudícímu větru kolmo.¹⁹

Na obrázku 12 je znázorněn Savoniův odporový motor a třílístý vztlakový motor. Tyto motory jsou nejvyužívanějšími ve své kategorii motorů.



Obrázek 12: Savoniův motor (vlevo) a třílístý motor (vpravo)²⁰

¹⁸ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

¹⁹ Tamtéž.

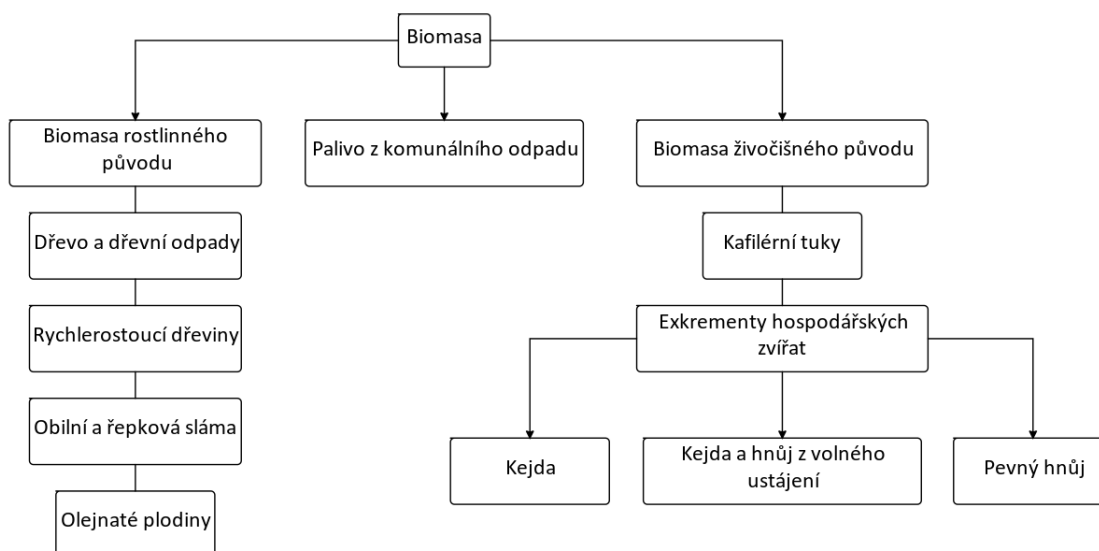
²⁰ Tamtéž.

2.4. Energie biomasy

Biomasa je veškerá organická hmota na naší planetě (těla živočichů, rostlin, hub a sinic). V energetickém průmyslu je nejvíce využíváno rostlin, které jsou schopny za pomoci fotosyntézy vytvářet energeticky bohaté sloučeniny (cukry). Jedná se tedy o způsob akumulace, kdy je energie slunečního záření uchována v rostlinách. Tento způsob akumulace disponuje nízkou účinností, ale na druhou stranu je téměř bezztrátová.²¹

2.4.1. Rozdělení biomasy

Biomasu lze rozdělit podle původu na rostlinnou, živočišnou a na palivo z komunálního. Základní rozdělení biomasy je na následujícím obrázku.



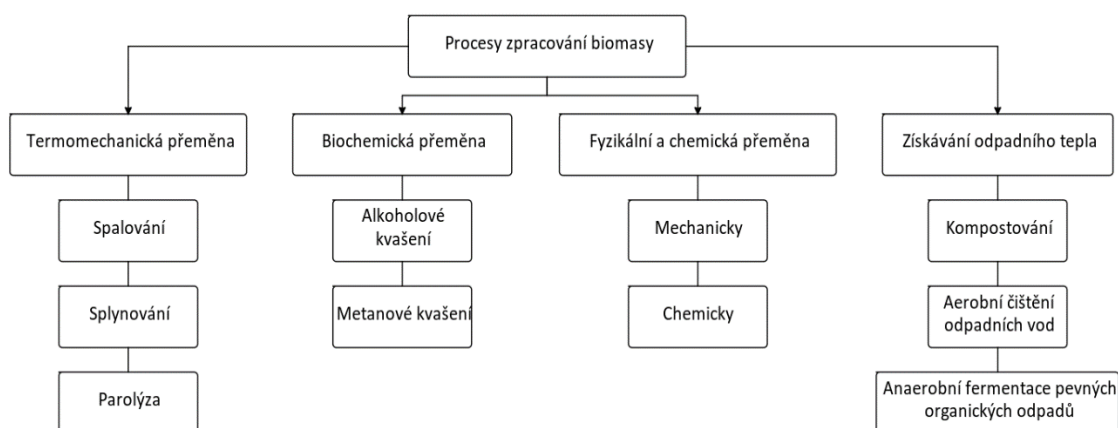
Obrázek 13: Rozdělení biomasy²²

²¹ VOBOŘIL, David. *Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR* [online, cit. 2022-02-28]. Dostupné z: Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR (oenergetice.cz).

²² MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

2.4.2. Zpracování biomasy

Biomasa je zpracována pomocí několika chemických procesů, díky kterým se biomasa přeměňuje na jiný druh paliva nebo přímo na tepelnou energii. Účinnost biomasy se mění v závislosti na účelu jejího využití. Nejvyšší účinnosti (až 90 %) dosahuje biomasa při využívání jako zdroj tepla. Při využívání biomasy v kogenerační výrobě lze dosáhnout účinnosti 50 – 90 %. Nejnižší účinnost je v případě využití biomasy pro přímou výrobu elektrické energie. Jednotlivé procesy zpracování biomasy jsou na následujícím obrázku.²³



Obrázek 14: Procesy zpracování biomasy²⁴

²³ VOBOŘIL, David. *Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR* [online, cit. 2022-02-28]. Dostupné z: Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR (oenergetice.cz).

²⁴ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

2.5. Geotermální systémy

2.5.1. Geotermální energie

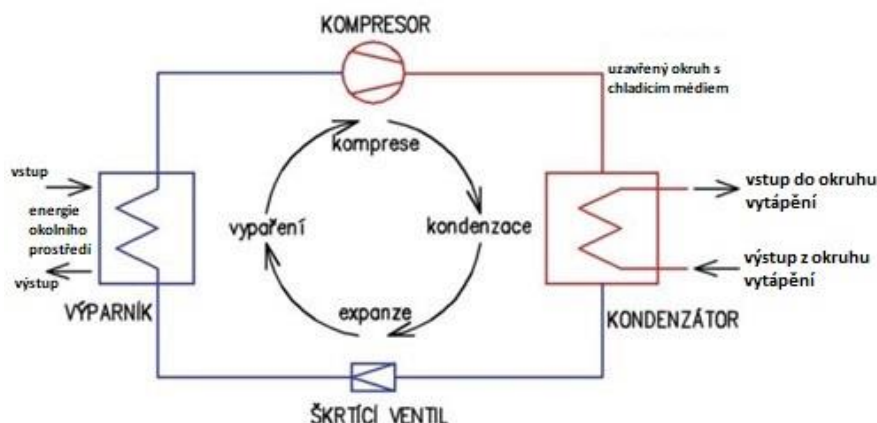
Zdrojů geotermální energie je několik. Největším zdrojem je původní teplo zemského jádra, které vzniklo v době, kdy vznikala naše planeta. Dalšími zdroji je například teplo vzniklé pohybem litosférických desek, rozpadem radioaktivních látek nebo exotermickými reakcemi v zemské kůře.²⁵ Geotermické systémy lze rozdělit podle teploty na nízkoteplotní a vysokoteplotní zdroje. Nízkoteplotní zdroje jsou zdroje do teploty 100 °C. Tyto zdroje jsou využívány jako přímé zdroje tepla k vytápění. Tento způsob využívání tepelné energie ze země je dnes nejrozšířenější. Typickým zástupcem této skupiny je v dnešní době stále populárnější tepelné čerpadlo nebo geotermální teplárna. Vysokoteplotní zdroje jsou zdroje o teplotě nad 150 °C. Díky této vysoké teplotě jsou tyto zdroje využívány v geotermálních elektrárnách pro přeměnu na energii elektrickou.

2.5.2. Nízkoteplotní zdroje

Zástupcem této skupiny je již zmíněné tepelné čerpadlo (TČ). TČ je zařízení, které využívá nízkopotenciální energii k vytápění. Zdrojů nízkopotenciálního tepla je několik a lze TČ podle typu zdroje dělit na země – voda, voda – voda, vzduch – voda, vzduch – vzduch (klimatizační jednotka). Tepelné čerpadlo se skládá ze čtyř základních jednotek (výparník, kompresor, kondenzátor, škrťací ventil). TČ odebírá teplo z nízkoteplotního zdroje a předává ho teponosné látce ve výparníku (pracovní látka změní své skupenství z kapalného na plynné). Plynná pracovní látka je dále stlačena pomocí kompresoru. Díky kompresi se tlak i teplota pracovní látky zvýší. Pracovní látka dále odevzdá své teplo získané z primárního zdroje a z procesu komprese v kondenzátoru. Pracovní látka se v kondenzátoru vrátí zpět do kapalného stavu a její tlak je, při cestě zpět do výparníku, snížen pomocí škrťacího ventilu.²⁶

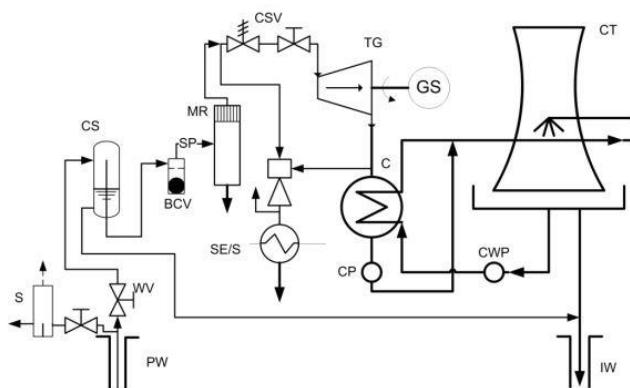
²⁵ VOBOŘIL, David. *Geotermální energie* [online, cit. 2022-02-28]. Dostupné z: Geotermální energie (oenergetice.cz).

²⁶ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

Obrázek 15: Technologické schéma tepelného čerpadla ²⁷

2.5.3. Vysokoteplotní zdroje

Zástupcem této skupiny jsou geotermální elektrárny, které jsou v dnešní době využívány ve třech provedení (na suchou páru, na mokrou páru a binární okruh). Dnes jsou nejvíce využívány geotermální elektrárny na mokrou páru. V této elektrárně se čerpá voda o teplotě aspoň 160 °C. Ta je následně pomocí tlaku přivedena k varu a přeměněna v mokrou páru. V separátoru dále dochází k oddělení páry a mineralizované vody. Pára je následně využita v oběhu parní turbíny. ²⁸

Obrázek 16: Geotermální elektrárna na mokrou páru ²⁹

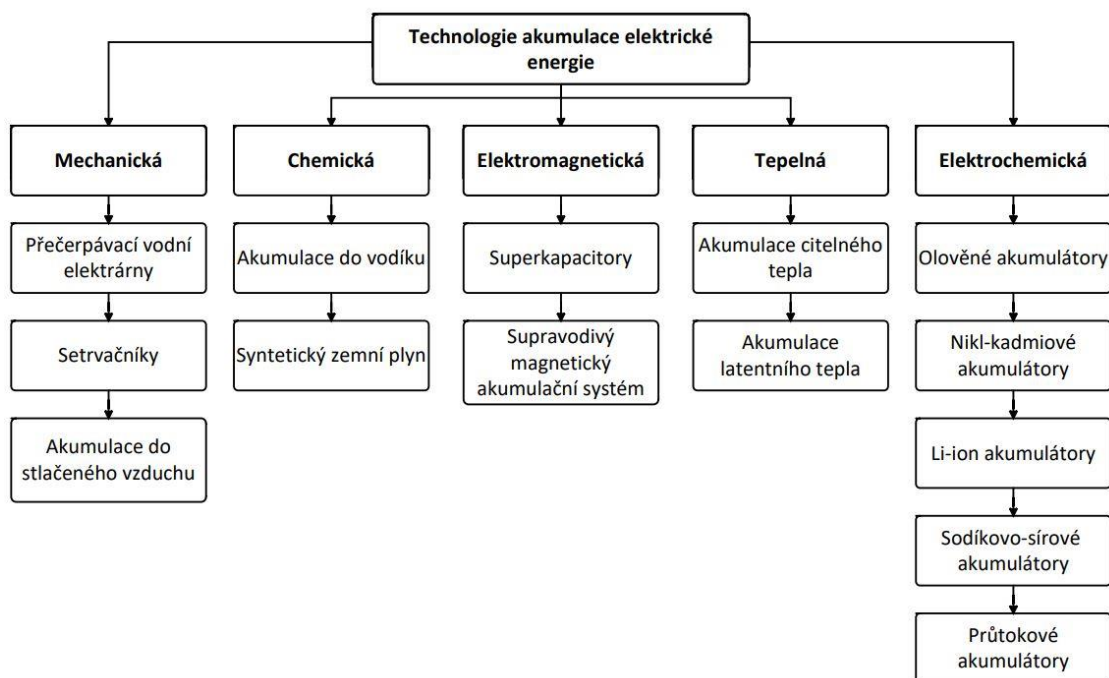
²⁷ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

²⁸ Tamtéž.

²⁹ Tamtéž.

3. TECHNOLOGIE PRO AKUMULACI ENERGIE

Spolu s rozvojem obnovitelných zdrojů elektrické energie (hlavně fotovoltaické a větrné elektrárny) přišla jedna důležitá otázka. Jak naložit s vyrobenou energií? Jednou z možných odpovědí je okamžitá spotřeba vyrobené energie. Tato možnost reprezentuje ideální případ, kdy spotřeba energie probíhá v době výroby. Realita je ovšem odlišná a předešlý případ je skutečně případem ideálním. V případě větrné a fotovoltaické energie nejsme schopni přesně určit dobu výroby energie a ve většině případů bude elektrická energie generovaná v době jiné, než je doba spotřeby. V tomto případě již musíme brát v úvahu předešlou otázku. Odpovědí je akumulace vyrobené elektrické energie. Akumulace je technologie, která umožňuje uložení vyrobené elektrické energie a její opětovné vyzvednutí v době, kdy je potřeba. Technologií pro akumulaci elektrické energie je velké množství. Základní přehled těchto akumulčních technologií je vidět na obrázku 17.



Obrázek 17: Přehled technologií pro akumulaci elektrické energie

3.1. Mechanické systémy

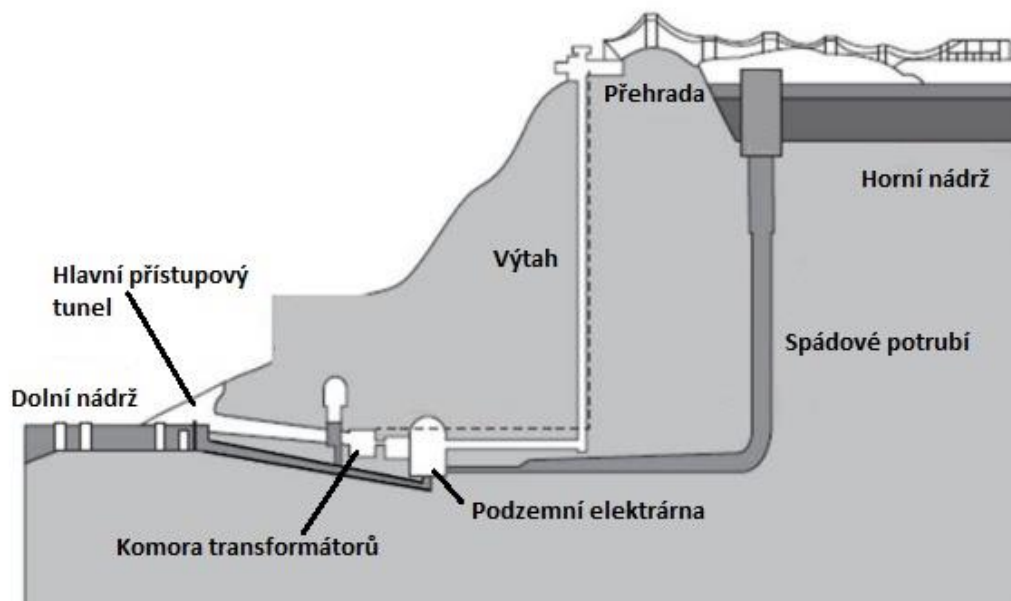
3.1.1. Přečerpávací vodní elektrárna

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) jsou akumulací technologií který k uskladnění elektrické energie využívá potenciální energii vody. Energií E , uloženou tímto systémem, lze vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$E = \int_0^t P(t) \cdot dt = P \cdot t = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot t \quad [\text{J}] \quad (9),$$

kde P je teoretický výkon [W],
 t je čas [s],
 Q je průtok vody turbínou [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 ρ je hustota vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 g je tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],
 H je střední spád [m].

V České republice se nacházejí 3 elektrárny tohoto typu. Přečerpávací vodní elektrárny Štěchovice, Dalešice a Dlouhé Stráně. Největší z těchto elektráren je (co se instalovaného výkonu týče) elektrárna Dlouhé Stráně, která disponuje výkonem 650 MW. PVE je tvořena dvěma vodními nádržemi (horní a dolní), které jsou vůči sobě výškově posunuty. Tyto nádrže spojuje tlakové potrubí. Součástí tohoto potrubí je turbína s čerpadlem a motorgenerátor. Alternativou ke kombinaci turbíny s čerpadlem může být reverzní turbína. Základní schéma PVE je vidět na obrázku 18. Princip činnosti elektrárny je následující. V čase, kdy je v síti dostatek elektrické energie, tak elektrárna čerpá vodu z dolní nádrže do horní a probíhá proces nabíjení. V době, kdy je energie nedostatek, elektrárna spustí vodu z horní nádrže do dolní přes lopatky turbíny a vykřívá výkonové špičky, které se v síti nacházejí. Základní technické parametry přečerpávacích vodních elektráren jsou znázorněny v tabulce 3. Mezi hlavní výhody přečerpávacích elektráren patří vysoká účinnost, nulové samovybíjení a dlouhá životnost.



Obrázek 18: Schéma přečerpávací vodní elektrárny ³⁰

Tabulka 3: Technické parametry přečerpávací vodní elektrárny ³¹

Parametry	Hodnoty
Instalovaný výkon [MW]	100 - 2 500
Měrný výkon [$W \cdot kg^{-1}$]	0,1 - 0,2
Doba najetí na plný výkon [min.]	2
Účinnost [%]	70 - 85
Samovybíjení [% · den ⁻¹]	≈ 0
Doba vybíjení [hod.]	4 - 16
Životnost [roky]	70 - 85

³⁰ HOSSAIN E., FARUQUE H. M. R., SUNNY Md. S. H., MOHAMMAD N., NAWAR N. A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Schematic diagram of a compressed air energy storage (CAES) Plant. Air... | Download Scientific Diagram (researchgate.net).

³¹ WAGNER, Vladimír. *Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie (oenergetice.cz).

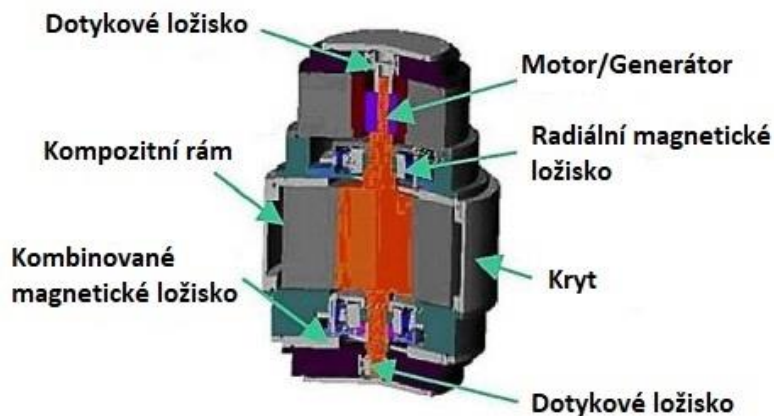
3.1.2. Setrvačnick

Setrvačnick nebo také technologie FESS (Flywheel energy storage system) funguje na principu ukládání elektrické energie ve formě energie kinetické (pohybové). Energii E , uloženou v systému FESS, lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$E = \int m \cdot v \cdot dv = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (r \cdot \omega)^2 = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad [\text{J}] \quad (10),$$

kde m je hmotnost [kg],
 v je rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 dv je element rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 r je poloměr [m],
 ω je úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],
 J moment setrvačnosti [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$].

Setrvačnick (rotor) je součástí elektrického stroje a bývá zpravidla umístěn ve vakuu. Se statorem je setrvačnick spojen skrz magnetické pole. Schéma stroje obsahující setrvačnick je na obrázku 19. Princip činnosti setrvačnicku je následující. V době, kdy je energie dostatek, tak elektrický stroj pracuje jako motor a přebytečnou elektrickou energii ukládá v podobě energie kinetické do rotujícího setrvačnicku. V případě, že je elektrické energie nedostatek, tak elektrický stroj přejde ze stavu motorového do stavu generátorového. Kinetická energie uložená v setrvačnicku je zdrojem energie mechanické pro generátor, který tuto energii přeměňuje na energii elektrickou. Mezi hlavní výhody FESS systémů patří minimální údržba, dobrý reakční čas a velký počet cyklů.



Obrázek 19: Schéma FESS ³²

Tabulka 4: Technické parametry FESS ³³

Parametry	Hodnoty
Výkon [MW]	0,001 - 20
Doba najetí na plný výkon [-]	sec.
Účinnost [%]	70 - 95
Samovybíjení [% · den ⁻¹]	1,3 - 100
Doba vybíjení [-]	sec. - min.
Životnost [cykly]	20 00 - 100 000

³² MAHLIA T.M.I., SAKTISAHDAN T.J., JANNIFAR A., HASAN M.H., MATSEELAR H.S.C. *A review of available methods and development on energy storage; Technology update* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: CAES plant schematic diagram [27]. | Download Scientific Diagram (researchgate.net).

³³ ENERGY STORAGE ASSOCIATION. *Flywheel Energy Storage Systems (FESS)* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Mechanical Electricity Storage Technology | Energy Storage Association.

3.1.3. Akumulace energie stlačeným vzduchem

V anglické literatuře je tento způsob akumulace energie znám pod zkratkou CAES (Compressed Air Energy Storage). Tento typ uskladnění elektrické energie je velice podobný typu uskladnění energie pomocí přečerpávací vodní elektrárny. V obou případech nedochází k samovybíjení, a proto je možné energii skladovat dlouhodobě. Princip činnosti je následující. V době, kdy je elektřiny přebytek, tak je nadbytečná elektřina hnána do kompresoru, pomocí kterého dochází ke stlačení vzduchu z atmosférického tlaku na tlak o velikosti přibližně 7 MPa. Takto stlačený vzduch je nadále skladován v zásobníku, který se nachází pod zemí. Při procesu stlačování vzduchu dochází k vytváření tepla, které je třeba odebrat. Na základě toho, zda odebrané teplo je využito v některých jiných aplikacích či ne, tak se účinnost systému pohybuje v rozmezí od 40 do 70 %. energii E , uloženou pomocí technologie CAES, lze určit pomocí vztahu: ³⁴

$$E = m \cdot (i_1 - i_2) = m \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{J}] \quad (11),$$

kde m je hmotnost vzduchu [kg],

i_1/i_2 je vstupní/výstupní entalpie vzduchu [J],

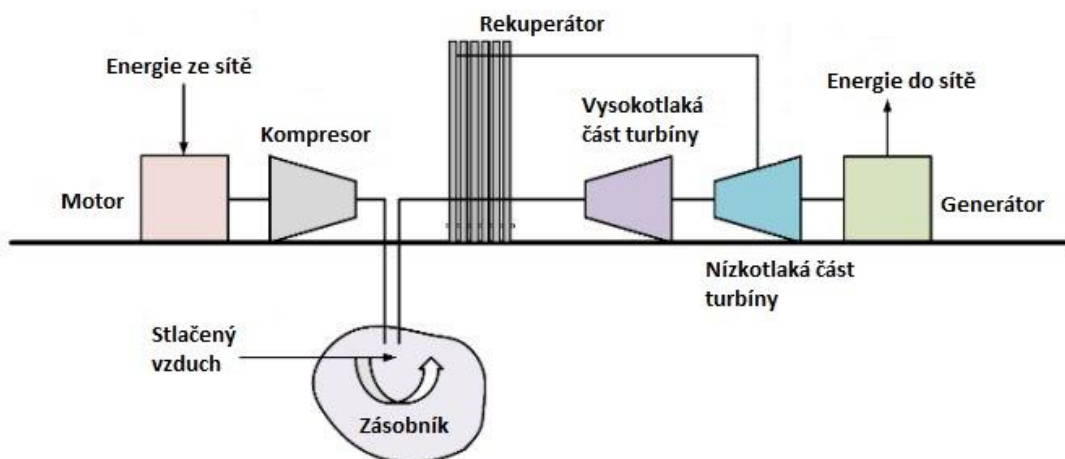
c_p je měrná tepelná kapacita vzduchu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

T_1/T_2 je vstupní/výstupní teplota vzduchu [K].

Pokud je elektřiny v síti nedostatek, tak se stlačený vzduch smíchá se zemním plynem a směs expanduje na lopatkách paroplynové turbíny, která roztáčí generátor a ten dodává potřebnou elektrickou energii do sítě. Schéma CAES je znázorněno na obrázku 20. Základní přehled technických parametrů je v tabulce 5.

³⁴ ENERGY STORAGE ASSOCIATION. *Compressed Air Energy Storage (CAES)*

[online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Mechanical Electricity Storage Technology | Energy Storage Association.



Obrázek 20: Schéma CAES ³⁵

Tabulka 5: Technické parametry CAES ³⁶

Parametry	Hodnoty
Výkon [MW]	10 - 1 000
Doba njetí na plný výkon [min.]	10
Účinnost [%]	40 - 70
Samovybíjení [% · den ⁻¹]	≈ 0
Doba vybíjení [hod.]	2 - 30
Životnost [roky]	20 - 40

³⁵ HOSSAIN E., FARUQUE H. M. R., SUNNY Md. S. H., MOHAMMAD N., NAWAR N. A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Schematic diagram of a compressed air energy storage (CAES) Plant. Air... | Download Scientific Diagram (researchgate.net).

³⁶ ENERGY STORAGE ASSOCIATION. *Compressed Air Energy Storage (CAES)* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Mechanical Electricity Storage Technology | Energy Storage Association.

3.2. Chemické systémy

3.2.1. Akumulace do vodíku

Vodík je bezbarvý plyn bez specifikovaného zápachu, který se stává výbušným, pokud je v kontaktu se vzduchem. Má nízkou teplotu varu, která se pohybuje okolo 20 K. Princip činnosti je následující. V čase, kdy je v síti dostatek elektřiny, je přebytečná elektřina posílána do elektrolyzátoru, kde je využita pro elektrolyzu vody. Elektrolyza je proces, při kterém se na katodě uvolňuje vodík a na anodě kyslík. Rovnice elektrolyzy vody je následující:

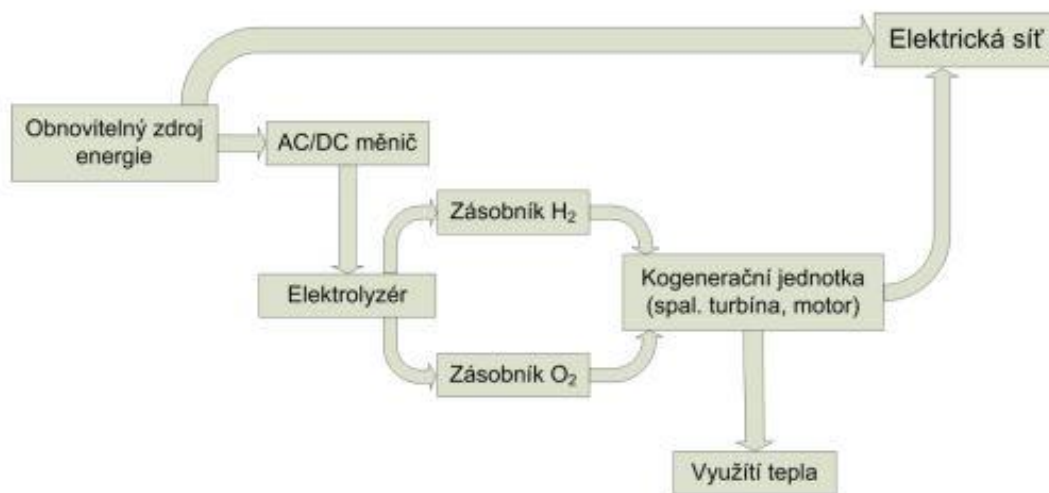


kde H je vodík,

O je kyslík.

Takto vzniklý vodík a kyslík se nadále skladují v zásobnících, které jsou umístěny v podzemních solných kavernách. Vodík lze skladovat v kapalně či plynné formě o tlaku mezi 100 - 300 barů. V případě, že je elektřiny nedostatek, tak se ze zásobníků vezmou vodík a kyslík, které jsou vstupními členy pro palivový článek. Výstupem palivového článku je elektrická energie, kterou po průchodu DC/AC měničem lze pustit do elektrické sítě. Schéma akumulace do vodíku a spolupráce OZE s elektrickou sítí je na obrázku 21. Základní technické parametry akumulace do vodíky jsou k nahlédnutí v tabulce 6.³⁷

³⁷ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).



Obrázek 21: Schéma akumulace do vodíku a spolupráce obnovitelného zdroje energie s elektrickou sítí³⁸

Tabulka 6: Technické parametry akumulace do vodíku³⁹

Parametry	Hodnoty
Výkon [MW]	0,01 - 100
Doba najezení na plný výkon [-]	sec. - min.
Účinnost [%]	25 - 45
Samovybíjení [% · den ⁻¹]	0 - 4
Doba vybíjení [-]	min. - sec.
Životnost [roky]	5 - 30

³⁸ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

³⁹ WAGNER, Vladimír. *Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie (oenergetice.cz).

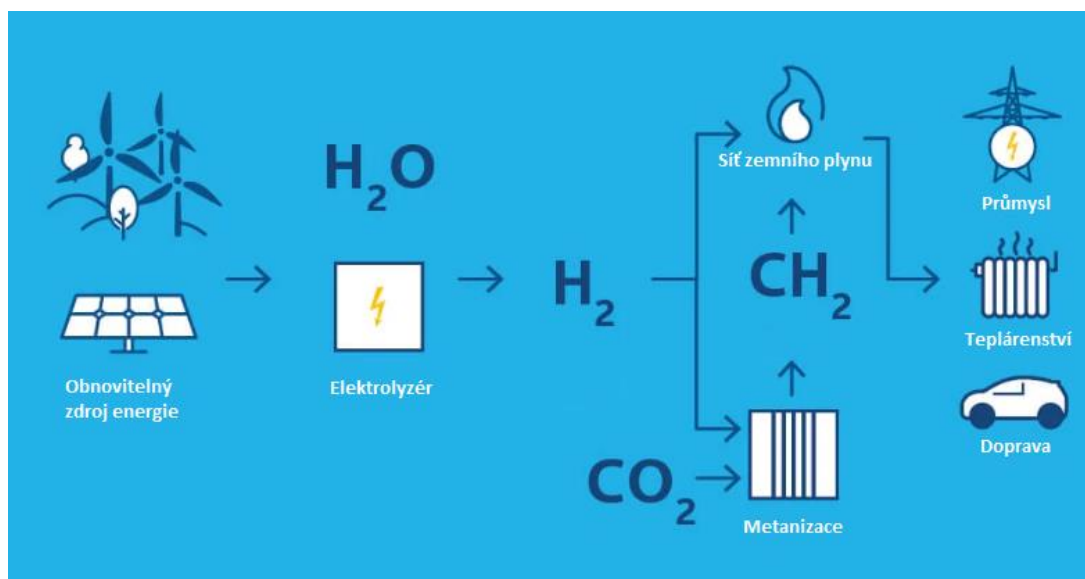
3.2.2. Syntetický zemní plyn

Tato technologie akumulace je známá pod zkratkou P2G (Power to Gas) a je to v podstatě rozšířená verze akumulace do vodíku, která byla popsána v předcházející kapitole. Přebytečná elektřina je opět využita k výrobě vodíku elektrolýzou vody. Vodík se ale poměrně špatně skladuje a náklady na zásobníky jsou vysoké. Proto je třeba vymyslet jiný způsob skladování vodíku. Je zde možnost pustit vodík přímo do plynovodů, ale je zde jeden problém. V rozvodech plynu smí být totiž vodík obsažen pouze ze dvou procent z celkového podílu plynu z důvodu zachování spalovacích vlastností plynu. Vodík je tedy požit k výrobě metanu CH_4 pomocí procesu metanizace, kdy vodík reaguje s oxidy uhlíku (nejčastěji oxid uhelnatý a oxid uhličitý) za vytvoření metanu a vody jako odpadní látky. Chemická reakce tvorby metanu je následující:



kde C je uhlík,
O je kyslík,
H je vodík.

Takto vzniklý metan lze pouštět do distribuční sítě plynu, ze které může být plyn využit v teplárenském či automobilovém průmyslu jako je naznačeno na obrázku 22. Díky nízkým hodnotám samovybíjení lze metan kromě přímé distribuce pomocí plynové sítě skladovat v úložišti plynu. Základní technické parametry technologie P2G jsou zobrazeny v tabulce 7.



Obrázek 22: Schéma technologie P2G ⁴⁰

Tabulka 7: Technické parametry technologie P2G ⁴¹

Parametry	Hodnoty
Výkon [MW]	1 - 100
Doba nabetí na plný výkon [-]	sec. - min.
Účinnost [%]	25 - 50
Samovybíjení [% · den ⁻¹]	≈ 0
Doba vybíjení [-]	hod. - týd.
Životnost [roky]	30

⁴⁰ EN:FORMER. *When wind warms in the winter* [online, cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [When wind warms in the winter | en:former \(en-former.com\)](https://www.en-former.com/en/when-wind-warms-in-the-winter/).

⁴¹ VOBOŘIL, David. *Power to Gas – budoucnost akumulace elektřiny?* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: [Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie \(oenergetice.cz\)](https://www.oenergetice.cz/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie/).

3.3. Elektromagnetické systémy

3.3.1. Superkapacitory

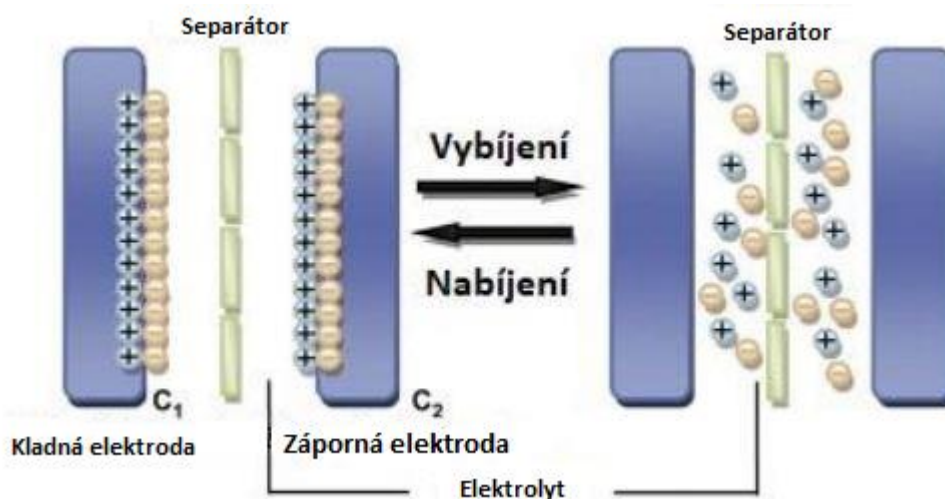
Každý kondenzátor se skládá z jedné kladné a jedné záporné elektrody, které jsou navzájem odděleny separátorem. Hodně lidí si myslí, že kondenzátory a baterie jsou jedna a ta samá věc. Tato domněnka vznikla ze skutečnosti, že baterie a kapacitory mají stejnou stavbu. Nicméně pravda to není. Rozdíl je v tom, že baterie k akumulaci elektrické energie využívají elektrochemickou reakci. Oproti tomu kapacitory k uložení elektrické energie využívají elektrostatický náboj. Energie E , uložená v kondenzátoru, se dá určit pomocí následující rovnice:

$$E = \int_0^Q \frac{Q}{C} \cdot dQ = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(C \cdot U)^2}{2C} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad [\text{J}] \quad (14),$$

kde Q je elektrický náboj [C],
 C je elektrická kapacita [F],
 dQ je element elektrického náboje [C],
 U je elektrické napětí [V].

V současnosti jsou známy tři typy kondenzátorů. Elektrostatický, elektrolytický a superkapacitor. Nejzákladnějším kondenzátorem je kondenzátor elektrostatický, jehož separátor je v suchém stavu. Tento typ kondenzátoru disponuje nejnižší hodnotou elektrické kapacity, která se pohybuje nejčastěji v řádech pikofaradů. Elektrolytický kondenzátor obsahuje vlhký separátor. Díky tomuto rozdílu má vyšší elektrickou kapacitu než kondenzátor elektrostatický (řádově mikrofary). Posledním typem kondenzátorů jsou superkapacitory. Tyto kondenzátory si vysloužily své jméno z toho důvodu, že jejich kapacita je oproti předchozím typům kondenzátorů obrovská a pohybuje se v řádech jednotek faradů. Superkapacitory se skládají ze stejných částí jako klasické kondenzátory. Elektrody jsou vyrobeny z hliníkové folie a dvou vrstev aktivního uhlíku, u kterého se využívá pórovitá struktura pro větší povrch elektrod, a tím pádem zvýšení celkové kapacity superkapacitoru. Mezi elektrodami se nachází separátor. Ovšem na rozdíl od klasických kapacitorů mají superkapacitory prostor mezi elektrodami vyplněn elektrolytem, který může být v tekutém nebo gelovém stavu. V nenabitém stavu jsou ionty rovnoměrně rozmístěny v elektrolytu. Tento stav je vidět v pravé části obrázku 23. V případě, že superkapacitor nabijeme, tak se záporné ionty přitáhnou ke kladné elektrodě a

kladné ionty k elektrodě záporné. Na elektrodách se vytvoří dvouvrstva elektrického náboje. Tento stav je zobrazen v levé části obrázku 23. Superkapacitory nacházejí největší uplatnění v aplikacích, kde je třeba překlenout krátký výpadek elektrické energie trvajících od několika vteřin po několik minut. Základní technické parametry jsou zobrazeny v tabulce 8.⁴²



Obrázek 23: Schéma nabíjení a vybití superkapacitoru ⁴³

Tabulka 8: Technické parametry superkapacitoru ⁴⁴

Parametry	Hodnoty
Výkon [MW]	1 - 100
Doba najeť na plný výkon [-]	sec.
Účinnost [%]	85 - 98
Samovybití [% · den ⁻¹]	1
Doba vybití [-]	sec.
Životnost [cykly]	až 1 000 000

⁴² BATTERY UNIVERSITY. *How does a Supercapacitor Work?* [online, cit. 2022-02-15]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor.

⁴³ LI X., WEI B. *Supercapacitors based on nanostructured carbon* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: *Supercapacitors based on nanostructured carbon - ScienceDirect*.

⁴⁴ BATTERY UNIVERSITY. *BU-209: How does a Supercapacitor Work?* [online, cit. 2022-02-15]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor.

3.3.2. Supravodivý magnetický akumulční systém

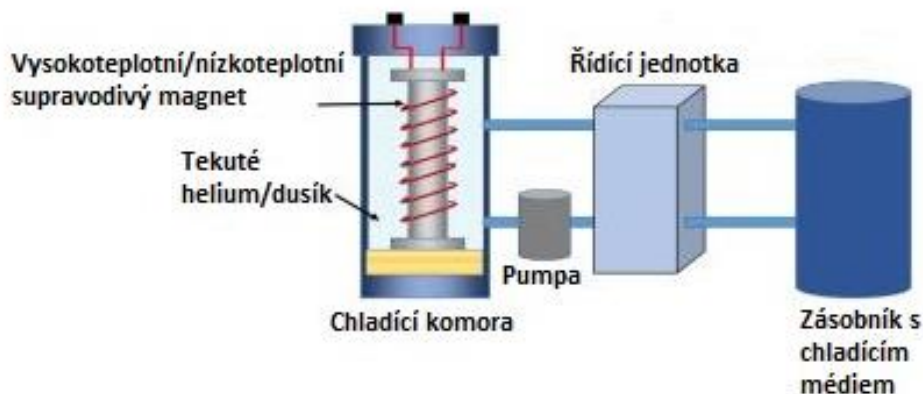
V literatuře lze tuto technologii najít pod zkratkou SMES (Superconducting magnetic energy storage). Tento akumulční systém je tvořen supravodivým magnetem (cívkou), chladicí komorou, řídicí jednotkou, pumpou a zásobníkem s chladicím médiem. Supravodivost je jev, který se objevuje u různých kovů při jejich zchlazení na teplotu blízkou 0 K. Dnes už je supravodivost běžná i při teplotách blízkých 100 K. Na základě teploty, při které se objevuje supravodivost, se supravodiče dělí na vysokoteplotní a nízkoteplotní. Při supravodivosti vodič disponuje téměř nulovým odporem, což má za následek minimální Joulovy ztráty. energii E , uloženou v cívce, lze vyjádřit pomocí vztahu: ⁴⁵

$$E = \int_0^I L \cdot I \cdot dI = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad [J] \quad (15),$$

kde L je indukčnost cívky (H),
 I je elektrický proud (A),
 dI je element elektrického proudu (A).

Princip činnosti je následující. Supravodivý magnet je umístěn v chladicí komoře, ve které je udržovaná taková teplota, aby byla zachována supravodivost. Teplotu hlídá řídicí jednotka, která zajišťuje nepřekročení kritické hodnoty znamenající ztrátu supravodivosti. V případě, že teplota vzroste nad nastavenou hodnotu, tak řídicí jednotka zvýší průtok chladicího média ze zásobníku přes pumpu do chladicí komory. Jako chladicí médium se nejčastěji používá helium pro nízkoteplotní supravodiče nebo dusík pro vysokoteplotní supravodiče. Schéma systému SMES je na obrázku 24. Základní technické parametry technologie SMES jsou v tabulce 9.

⁴⁵ EUROPEAN ENERGY RESEARCH ALLIANCE. *Superconducting Magnetic Energy Storage* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Microsoft Word - EERA_JPES_SP5_Factsheet_final.docx (eera-energy-storage.eu).



Obrázek 24: Schéma technologie SMES ⁴⁶

Tabulka 9: Technické parametry technologie SMES ⁴⁷

Parametry	Hodnoty
Výkon [MW]	až 10
Doba najetí na plný výkon [-]	sec.
Účinnost [%]	75 - 95
Doba vybíjení [-]	min.

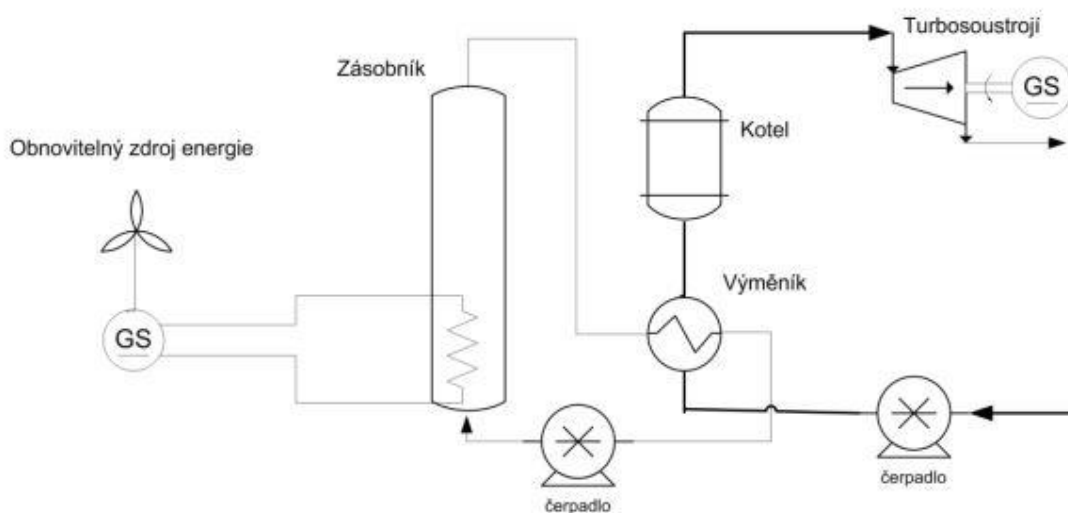
⁴⁶ LIU X., LI K. *Energy storage devices in electrified railway systems: A review* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Schematic diagram of an SMES | Download Scientific Diagram (researchgate.net).

⁴⁷ EUROPEAN ENERGY RESEARCH ALLIANCE. *Superconducting Magnetic Energy Storage* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Microsoft Word - EERA_JPES_SP5_Factsheet_final.docx (eera-energystorage.eu).

3.4. Tepelné systémy

3.4.1. Akumulace citelného tepla

Akumulace citelného tepla nachází v posledních letech velké uplatnění v kombinaci s malou fotovoltaickou elektrárnou instalovanou na střeše rodinného domu. Jedná se o typ akumulace, kdy je vyrobená elektrická energie z fotovoltaické elektrárny používána k ohřátí teplé vody (TV). Elektrinu lze ukládat ve formě tepla i do jiného media, než je voda. Ovšem, aby akumulace měla co nejvyšší účinnost, mělo by mít medium co nejvyšší tepelnou kapacitu. Tento princip akumulace se (kromě ohřevu TV) používá v elektrářenském průmyslu pod názvem Metoda Ruths. Principiální schéma této metody je na obrázku 25. Akumulace elektrické energie probíhá opět do vody, která je následně využita v regeneračním oběhu elektrárny a zvyšuje teplotu zkondenzované vody vstupující do kotle, kterému usnadňuje práci.⁴⁸



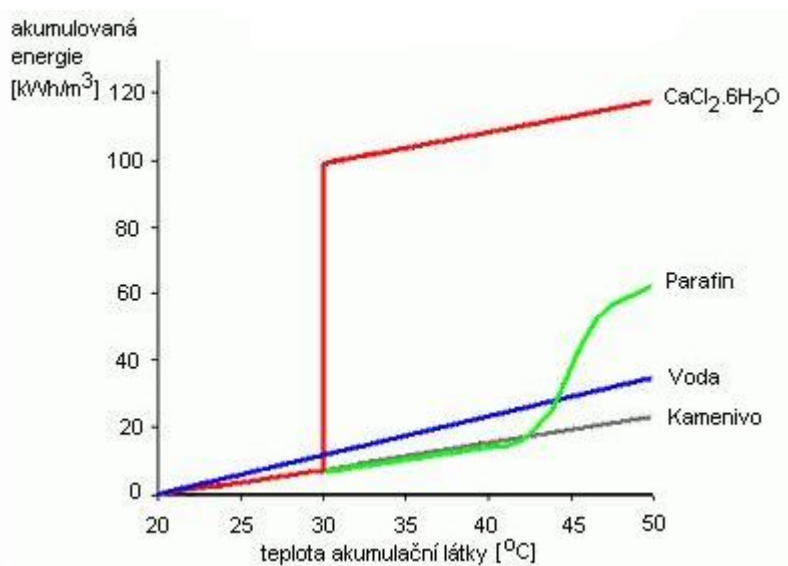
Obrázek 25: Metoda Ruths⁴⁹

⁴⁸ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

⁴⁹ Tamtéž.

3.4.2. Akumulace latentního tepla

Při tomto typu akumulace se využívá entalpie fázové přeměny některých čistých látek. V praxi se využívá přeměna z tuhé látky na látku kapalnou. Používají se látky chemicky čisté ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) nebo směsi (parafin). Rozdílem je, že u látek chemicky čistých probíhá tání při konstantní teplotě. Na rozdíl tomu u směsí dochází k tání v širším spektru teplot. Tato skutečnost je zobrazena na obrázku 26.⁵⁰



Obrázek 26: Porovnání akumulace citelného a latentního tepla⁵¹

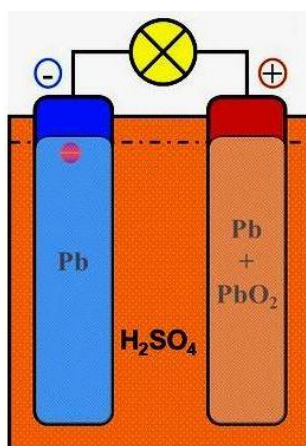
⁵⁰ BECHNÍK, Bronislav. Akumulace tepelné energie - fyzikální principy [online, cit. 2022-02-15]. Dostupné z: Akumulace tepelné energie - fyzikální principy - TZB-info.

⁵¹ Tamtéž.

3.5. Elektrochemické systémy⁵²

3.5.1. Olověné akumulátory

Olověné akumulátory (sekundární články) jsou dnes nejrozšířenějším a nejpoužívanějším typem akumulátorů. Mezi hlavní výhody těchto akumulátorů patří nízká cena, dobře zpracovaná technologie výroby, dostatečný výkon. Díky těmto dobrým vlastnostem si olověné akumulátory našli uplatnění jako staniční, startovací, trakční či solární akumulátory. Jednotlivé typy olověných akumulátorů pro jednotlivé aplikace liší konstrukčním provedením. Olověné akumulátory se skládají ze dvou elektrod, které jsou odlité z velmi čistého olova a mohou být různých typů (velkopovrchové, mřížkové, diskové, tyčové desky nebo spirálové elektrody). Nejčastěji se používají elektrody ve formě mřížkových desek. Mřížková deska kladné i záporné elektrody se vyplní pastou. Následuje proces sušení desek. Sušení u kladné elektrody probíhá v oxidační atmosféře za vzniku PbO_2 na povrchu elektrody (hnědá barva). Sušení u záporné elektrody probíhá v redukční atmosféře za vzniku houbovitého olova na povrchu elektrody (šedá barva). Obě elektrody jsou od sebe odděleny separátorem, který bývá v provedení listů či obálek. Vše je uskladněno v nádobě a zalito v elektrolytu, kterým je v případě olověných akumulátorů vodný roztok kyseliny sýrová H_2SO_4 o hustotě 1,2 – 1,3. Schéma olověného článku je zobrazeno na obrázku 27.

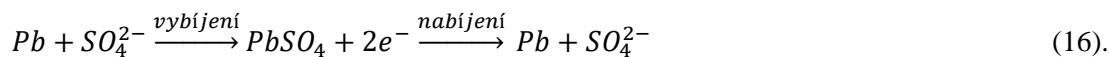


Obrázek 27: Schéma olověného článku

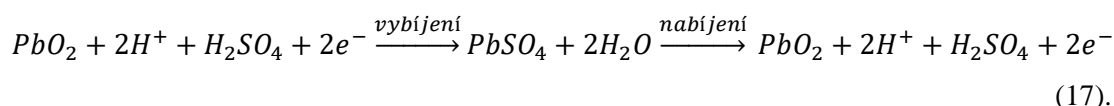
⁵² V této kapitole bude většina informací a obrázků čerpána ze zdroje: HRZINA, Pavel. *Přednášky z předmětu Aplikace elektrochemických zdrojů (B1M13AEZ)*. FEL ČVUT v Praze, 2019.

Princip činnosti olověného akumulátoru lze popsat pomocí chemických rovnic, které probíhají při nabíjení a vybíjení na jednotlivých elektrodách.

Záporná elektroda:



Kladná elektroda:



V případě vybíjení akumulátoru klesá hustota elektrolytu a desky elektrod se pokrývají síranem olovnatým $PbSO_4$. Pokud by akumulátor zůstal delší dobu ve vybitém stavu, tak síran olovnatý pokrývající elektrody začne krystalizovat a snižovat aktivní plochu elektrod a tím i kapacitu akumulátoru. Tento jev se nazývá sulfatace a je dějem nevratným. Při nabíjení akumulátoru roste hustota elektrolytu a současně dochází k vylučování PbO_2 na kladné elektrodě a k vylučování Pb na elektrodě záporné. Pokud bychom akumulátor nechali příliš dlouho nabíjet přešel by z procesu nabíjení do procesu přebíjení, který je charakterizován tím, že $PbSO_4$ již byl plně vyloučen. Poté by nastal proces elektrolýzy vody za vzniku směsi vodíku a vody, která by mohla způsobit výbuch akumulátoru. Základní technické parametry olověných akumulátorů jsou v tabulce 10.

Tabulka 10: Technické parametry olověných akumulátorů⁵³

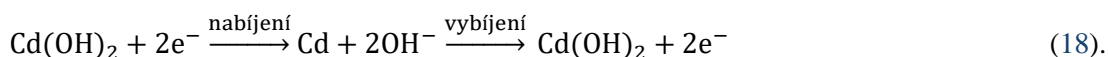
Parametry	Hodnoty
Kapacita článku [kWh]	až 8
Měrná energie [$Wh \cdot kg^{-1}$]	30 - 50
Doba reakce [-]	sec.
Účinnost [%]	90
Životnost [cykly]	250 - 1 800
Jmenovité napětí Pb článku [V]	2
Samovybíjení [$\% \cdot den^{-1}$]	0,1 - 0,2
Doba vybíjení [-]	hod.

⁵³ BATTERY UNIVERSITY. *Comparison Table of Secondary Batteries* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries - Battery University.

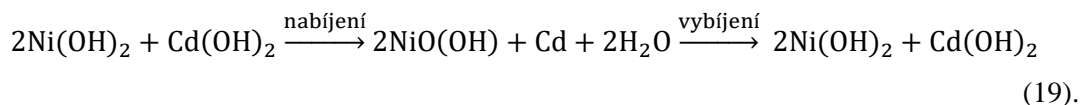
3.5.2. Nikl-kadmiové akumulátory

Stejně jako olověné akumulátory se i tento typ akumulátorů skládá ze dvou elektrod, separátoru, nádoby a elektrolytu. Kladná elektroda je tvořena hydroxidem nikelnatým. Záporná elektroda je tvořena hydroxidem kademnatým. Obě elektrody jsou nejčastěji realizovány ve formě kapsy. Jako separátor se používá plastová mřížka zajišťující oddělení elektrod a místo pro průchod elektrolytu. Elektrolytem je v Nikl-kadmiových (NiCd) akumulátorech nejčastěji roztok hydroxidu draselného zředěný hydroxidem lithným. Vše je uloženo v nádobě, která se používá buď kovová nebo plastová s bezpečnostní zátkou (ventilem). Ukázka NiCd akumulátoru umístěného ve válcové nádobě je zobrazena na obrázku 28. Princip činnosti nikl-kadmiových akumulátorů lze vyjádřit pomocí následujících chemických reakcí.

Záporná elektroda:



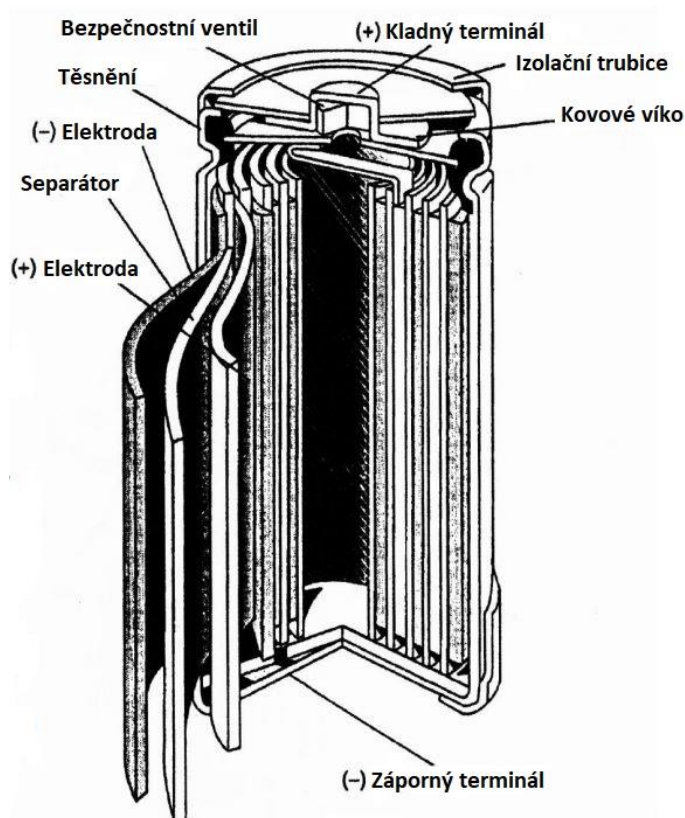
Kladná elektroda:



Největší výhodou těchto akumulátorů je využití ve velkém teplotním rozmezí, neboť tyto akumulátory si drží hodnoty svých parametrů i při teplotách okolo $-40\text{ }^\circ\text{C}$. Největší nevýhodou těchto akumulátorů je přítomnost toxického kadmia. Z toho důvodu se začaly vyrábět akumulátory nikl-metal hydridové. Základní technické parametry NiCd akumulátorů jsou v následující tabulce.

Tabulka 11: Technické parametry NiCd akumulátoru ⁵⁴

Parametry	Hodnoty
Kapacita článku [kWh]	až 1,56
Měrná energie [Wh · kg ⁻¹]	45 - 80
Doba reakce [-]	sec.
Účinnost [%]	70 - 90
Životnost [cykly]	500 - 3 000
Jmenovité napětí NiCd článku [V]	1,2
Samovybíjení [% · den ⁻¹]	0,5
Doba vybíjení [-]	hod.



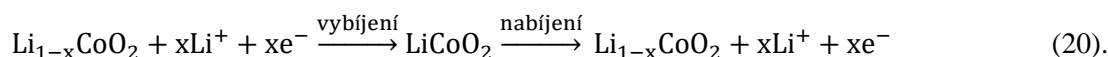
Obrázek 28: Válcový NiCd akumulátor

⁵⁴ BATTERY UNIVERSITY. *Comparison Table of Secondary Batteries* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries - Battery University.

3.5.3. Li-ion akumulátory

U těchto akumulátorů je kladná elektroda tvořena tenkou hliníkovou folií, na které je deponovaná vrstva aktivní látky, která je tvořena vždy lithiem v kombinaci s jinými látkami (např. LiCoO_2 , LiMnO_2 nebo LiFePO_4). V případě záporné elektrody je aktivní hmotou uhlík deponovaný na měděné folii. Jako elektrolyt je u Li-ion akumulátorů využíván bezvodý polyethylenoxid. Princip funkce akumulátoru, u kterého je kladná elektroda tvořena zoxidovaným kobaltitanem lithným a záporná elektroda uhlíkovou maticí, je popsán následujícími rovnicemi.

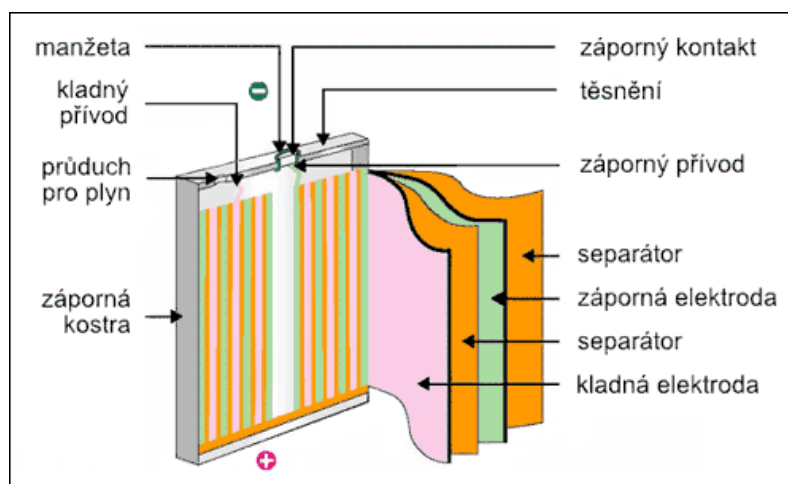
Kladná elektroda:



Záporná elektroda:



Li-ion akumulátory se nejčastěji vyrábějí s elektrodami, které jsou svinuté podél obvodu článku. Typická struktura akumulátoru tohoto typu je zobrazena na obrázku 29. Základní technické parametry Li-ion akumulátorů jsou v tabulce 12.



Obrázek 29: Schéma Li-ion akumulátoru ⁵⁵

⁵⁵ SCHOLTZOVÁ, Jiřina. *Nové baterie bez těžkých kovů* [online, cit. 2022-02-17]. Dostupné z: Jiřina Scholtzová: Nové baterie bez těžkých kovů (aldebaran.cz).

Tabulka 12: Technické parametry Li-ion akumulátoru ⁵⁶

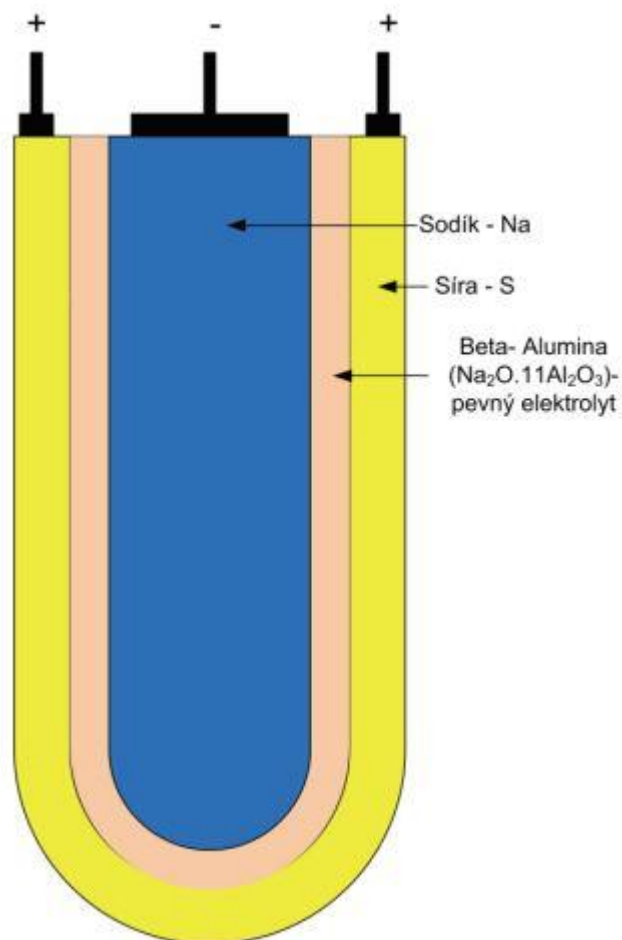
Parametry	Hodnoty
Kapacita článku [MWh]	až 0,4
Měrná energie [Wh · kg ⁻¹]	90 - 250
Doba reakce [-]	sec.
Účinnost [%]	99
Životnost [cykly]	500 - 10 000
Jmenovité napětí článku [V]	3,7
Doba vybíjení [-]	hod.

3.5.4. Sodíkovo-sírové akumulátory

V současnosti je trendem v akumulačních technologiích používání takzvaného sodíkovo-sírového akumulátoru (NaS). Elektrody akumulátoru NaS jsou v roztavené formě (kladná elektroda – roztavená síra, záporná elektroda – roztavený sodík). Pracovní oblast NaS akumulátorů je v teplotním rozmezí 300 – 350 °C. Nevýhodou těchto akumulátorů je tedy udržení vysoké pracovní teploty. Z toho důvodu jsou jednotlivé články umístěny vedle sebe, aby nedocházelo k nežádoucímu odvodu tepla okolním vzduchem. Akumulátory jsou umístěny v zapouzdřených celcích, v kterých je vakuum nebo inertní plyn (argon) pro snížení tepelných ztrát. Elektrolyt je v případě těchto akumulátorů realizován v pevné formě z keramiky s přidavkem oxidu hlinitého a hliníku. Princip činnosti je následující. Při vybíjení akumulátoru se ze záporné sodíkové elektrody uvolňují elektrony. Vlivem toho vzniká v roztavené anodě kladný iont Na⁺, který se skrze pevný elektrolyt dostane ke kladné elektrodě tvořené sírou, kde se vytvoří kladný náboj, který následně přijme elektron. Pokud by proces probíhal opačně, tak by se akumulátor nabíjel. Struktura NaS akumulátoru je na obrázku 30. Základní technické parametry NaS akumulátoru jsou v tabulce 13.⁵⁷

⁵⁶ BATTERY UNIVERSITY. *Comparison Table of Secondary Batteries* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries - Battery University.

⁵⁷ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

Obrázek 30: Schéma NaS akumulátoru ⁵⁸Tabulka 13: Technické parametry NaS akumulátoru ⁵⁹

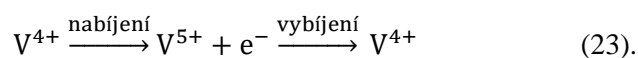
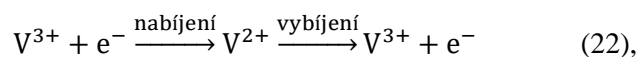
Parametry	Hodnoty
Kapacita článku [MWh]	až 0,4
Měrná energie [Wh · kg ⁻¹]	až 400
Doba reakce [-]	sec.
Účinnost [%]	80 - 90
Životnost [cykly]	2 500 - 4 500
Jmenovité napětí článku [V]	2
Doba vybíjení [-]	hod.

⁵⁸ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

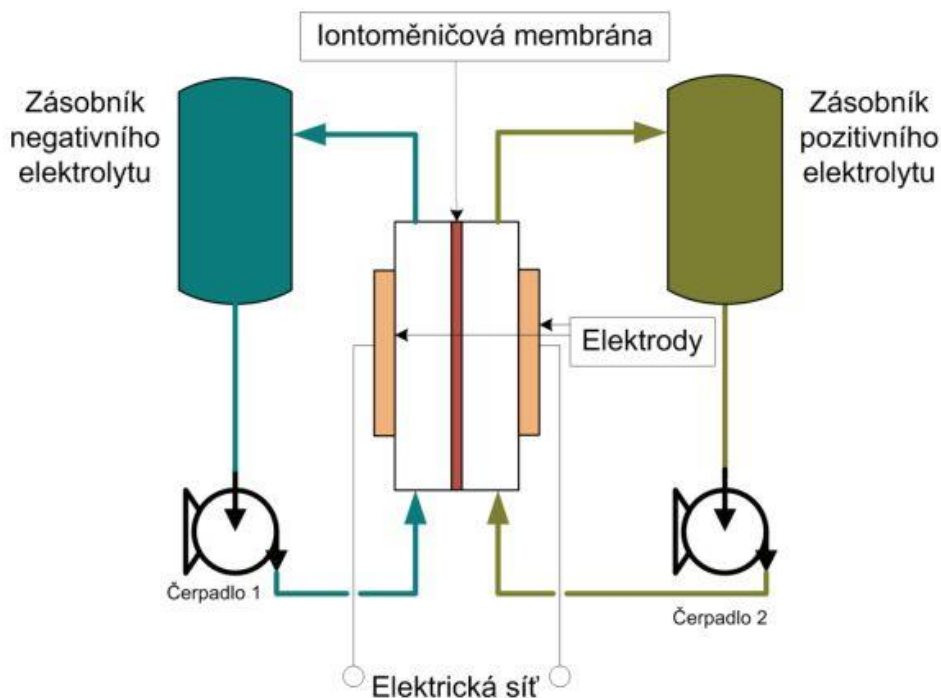
⁵⁹ Tamtéž.

3.5.5. Průtokové akumulátory

Tento typ akumulátoru je poměrně novou technologií. Skladování energie je uskutečněno pomocí tekutého elektrolytu, který se u průtokových akumulátorů vyskytuje ve formě pozitivního a negativního. Každý elektrolyt má svůj vlastní zásobník. Velikost zásobníku, a tedy i množství elektrolytu, určuje celkovou velikost naakumulované energie. Právě z toho důvodu se tyto akumulátory provozují převážně jako stacionární (nepřemístitelné). Každý zásobník elektrolytu má své vlastní čerpadlo, které žene elektrolyt do chemického článku, který se skládá ze dvou elektrod a iontoměničové membrány umožňující výměnu iontů mezi elektrolyty. Základní schéma průtokových akumulátorů je zobrazeno na obrázku 31. Základní technické parametry VRB akumulátorů jsou v tabulce 14. V současnosti existuje více typů průtokových akumulátorů. Nicméně v největším množství se dnes využívají redoxní vanadové průtokové akumulátory (VRB), jejichž princip spočívá na elektrochemické oxidaci a redukci vanadu. Chemické reakce popisující nabíjení a vybíjení VRB akumulátorů jsou dány následujícími vztahy:⁶⁰



⁶⁰ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).


 Obrázek 31: Schéma průtokového akumulátoru ⁶¹

 Tabulka 14: Technické parametry VRB akumulátoru ⁶²

Parametry	Hodnoty
Měrná energie [$\text{Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$]	40
Doba reakce [-]	sec.
Účinnost [%]	60 - 75
Životnost [cykly]	až 10 000
Jmenovité napětí článku [V]	1,55
Doba vybití [-]	hod.

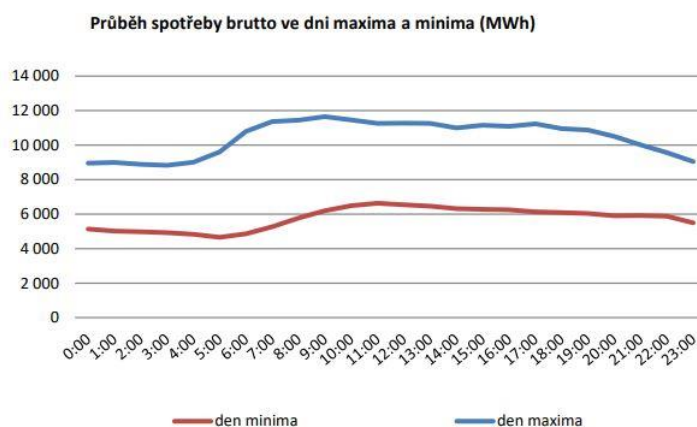
⁶¹ MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).

⁶² BATTERY UNIVERSITY. *Summary Table of Alternate Batteries* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: BU-217: Summary Table of Alternate Batteries - Battery University.

4. BATERIOVÉ ÚLOŽIŠTĚ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ

4.1. Akumulace elektrické energie

Jedním ze základních principů využití bateriového úložiště (BÚ) je akumulace elektrické energie. V praxi se vyskytují dva principy akumulace, a to akumulace denní a sezonní. BÚ je vhodné pouze pro akumulaci denní (pro akumulaci sezonní je vhodný typ akumulací technologie, která vykazuje nulové samovybíjení). Elektrická energie je do bateriového úložiště ukládána v době, kdy je jí v distribuční soustavě (DS) přebytek. Naopak v případech, kdy je elektrické energie v DS nedostatek, tak si soustava může pomoci naakumulovanou energií z BÚ. Na obrázku 32. je znázorněn průběh maximální a minimální denní spotřeby v České republice za rok 2020. Z obrázku je patrné, že křivka spotřeby se během dne mění. Ve dne je spotřeba vyšší než v nočních hodinách. V noci je tedy elektrické energie v DS dostatek a lze ji využít k nabíjení bateriového úložiště. Ve dne, kdy je spotřeba vyšší, lze využít naakumulovanou energii z BÚ. Využíváním akumulace elektrické energie pomocí bateriového úložiště v DS lze v ideálním případě dosáhnout situace, kdy je spotřební křivka konstantní a odběr ze sítě je stejný po celý den.

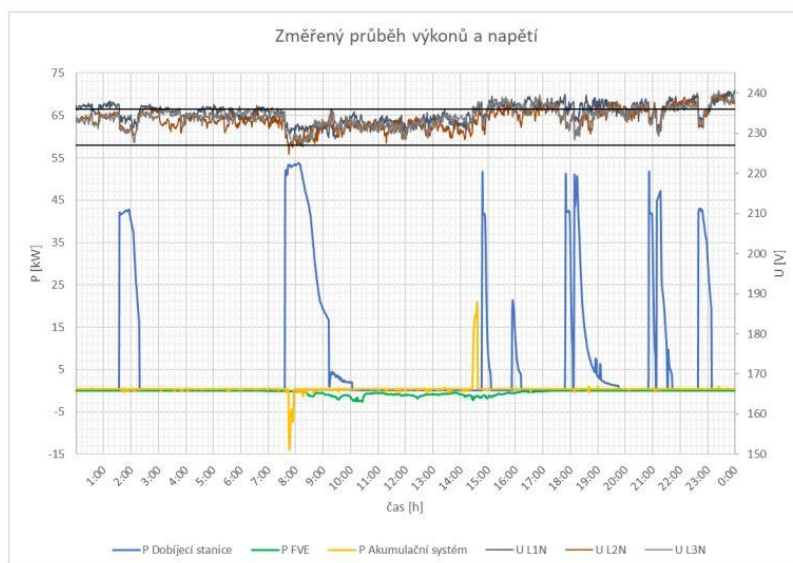


Obrázek 32: Spotřební křivka ve dni minima a maxima ⁶³

⁶³ ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy české republiky za rok 2020* [online, cit. 2022-03-01]. Dostupné z: edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173 (eru.cz).

4.2. Omezení odběrových špiček

Velké odběry výkonu ze sítě mohou zapříčinit nedodržení kvality elektrické energie v daném místě. Typickým příkladem velkých odběrových špiček jsou v dnešní době nabíjecí stanice pro elektromobily. Bateriové úložiště umožňuje omezení těchto nabíjecích odběrových špiček a snižuje pravděpodobnost nedodržení kvality elektrické energie v daném místě. Na obrázku 33 jsou znázorněny průběhy nabíjení elektromobilů v průběhu jednoho dne. Nabíjecí stanice je vybavena bateriovým úložištěm a fotovoltaickou elektrárnou. V horní části obrázku jsou znázorněny průběhy napětí v jednotlivých fázích s vyznačenými mezemi. Zhruba v 8 hodin byla překročena spodní mez napětí při nabíjení elektromobilu. BÚ na tento pokles zareagovalo a za účelem obnovení napětí na požadovanou hodnotu začal do sítě dodávat činný výkon. Naopak kolem 15. hodiny se v síti objevilo přepětí. BÚ za účelem snížení napětí na požadovanou hodnotu začalo ze sítě odebírat činný výkon a tím se i dobíjet. Na ostatní případy přepětí bateriové úložiště nereagovalo z důvodu jeho plného nabití. Z důvodu předpokládaného nárůstu elektromobility (a tedy i infrastruktury nabíjecích stanic) je technologie BÚ v kombinaci s nabíjecími stanicemi aktuálním tématem.



Obrázek 33: Průběhy napětí a výkonů z nabíjecí stanice ⁶⁴

⁶⁴ DRÁPELA, Jan. *Analýza vlivu rychlonabíjecích stanic s akumulací na distribuční soustavu elektrické energie* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. Dostupné z: F3-BP-2019-Drapela-Jan-Analyza vlivu rychlonabíjecí stanice s akumulací na distribuční soustavu elektrické energie.pdf (cvut.cz).

4.3. Dodržení parametrů na předávacím místě PS/DS

Mezi provozovatelem přenosové soustavy (PPS) a provozovatelem distribuční soustavy (PDS) jsou smluvně dohodnuté parametry činného P a jalového Q výkonu v předávacím místě (rozvodně). Největším problémem jsou v dnešní době přetoky jalového výkonu směrem z distribuční soustavy do soustavy přenosové. Tyto přetoky jsou z pohledu PPS nežádoucí, neboť mu tyto přetoky mohou způsobit nárůst napětí nad horní mez. Důvodem přetoků jalového výkonu z DS do PS je kapacita kabelového vedení v distribuční soustavě, která se projevuje ve zvýšené míře v nočních hodinách. Tento problém je velice aktuální z toho důvodu, že lze v budoucnosti očekávat další nárůst kabelového vedení v DS. Řešením může být právě bateriové úložiště, které by se v případě přetoků jalového výkonu nabíjelo, a naopak vybíjelo v případech vyšších odběrů z přenosové soustavy. V příloze 1: Průběh jalového výkonu v rozvodně Dasný je znázorněn týdenní průběh jalového výkonu v rozvodně Dasný 400/110 kV u Českých Budějovic, která je ve vlastnictví distributora EG.D, a.s.

4.4. Záložní zdroj

Další funkce bateriového úložiště je možnost jeho využití jako záložní zdroj. V případě, kdy by došlo k přerušení dodávky elektrické energie běžnými zdroji, je bateriové úložiště vzhledem ke svým parametrům výborným záložním zdrojem, které lze při výpadku využít pro napájení přilehlé oblasti. Hlavní výhodou použití bateriového úložiště jako záložní zdroj je jeho krátký reakční čas, kdy je schopno najet na plný výkon za pár vteřin. V příloze 2: Doba najetí bateriového úložiště z 0 W na plný výkon je znázorněna reakční doba bateriového úložiště v Mydlovarech. BÚ začne v čase 22:30 proces nabíjení a plného výkonu 1 050 kW dosáhne v čase 22:36. Plného výkonu tedy bateriové úložiště dosáhne do 6 sekund.

4.5. Využití pro obnovitelné zdroje energie

V posledních letech roste množství obnovitelných zdrojů energie připojovaných do distribuční soustavy. Z obnovitelných zdrojů energie větrné a fotovoltaické elektrárny vykazují nestálost dodávky vyrobené elektrické energie do DS. Pro potlačení nárazových dodávek elektrické energie z těchto obnovitelných zdrojů lze využít bateriové úložiště.

4.6. Regulace frekvence

V elektrizační síti musí platit okamžitá bilance zdánlivých výkonů. V každém okamžiku musí být výkon dodávaný do sítě roven výkonu ze sítě odebíranému. Bilanční rovnice výkonů má následující tvar:

$$S_v(t) = S_s(t) + S_z(t) + S_a(t) \quad [\text{VA}] \quad (24),$$

kde S_v je zdánlivý vyrobený výkon [VA],

S_s je zdánlivý spotřebovaný výkon [VA],

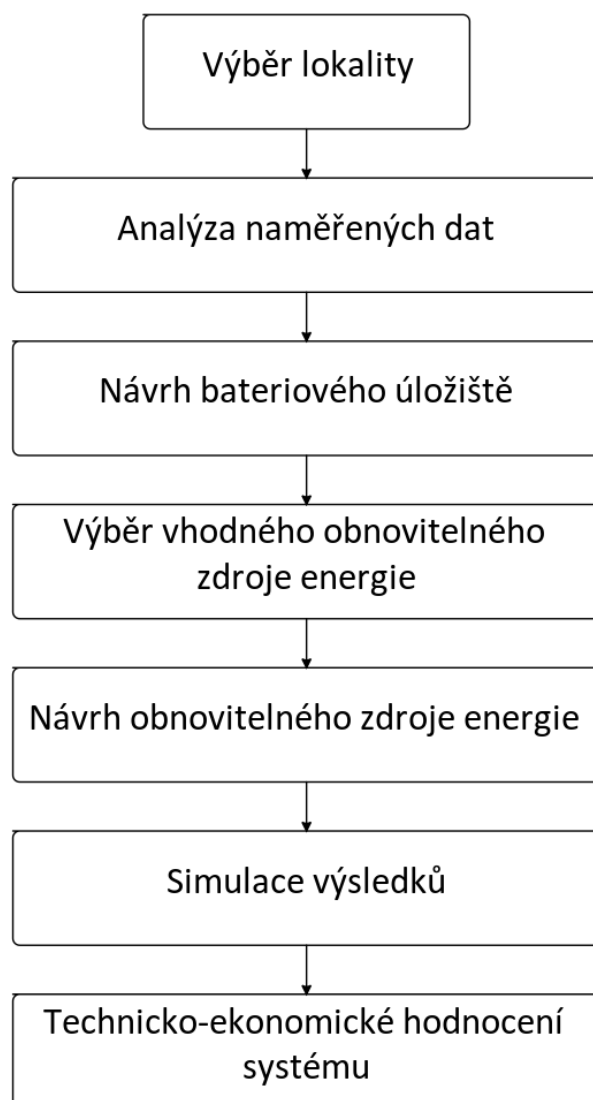
S_z je zdánlivý ztrátový výkon [VA],

S_a je zdánlivý akumulovaný výkon [VA].

V případě, že by se jeden ze zdrojů elektrické energie odpojil od sítě, tak by byla porušena bilanční rovnice. Na porušení bilanční rovnice by síť reagovala snížením frekvence sítě. Tato reakce je z pohledu kvality elektrické energie vycházející z normy ČSN EN 50160 „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě“ nepřijatelná, a proto je třeba frekvenci regulovat. Regulace frekvence se v praxi využívá trojího typu. Primární, sekundární a terciární, které se od sebe liší rychlostí reakce. Vzhledem ke krátké reakční době bateriových úložišť, která je demonstrována na obrázku 35, tak jsou BÚ skvělým zdrojem pro primární regulaci frekvence.

5. NÁVRH SYSTÉMU

V této části diplomové práce se budu zabývat návrhem bateriového úložiště nabíjeného jak z distribuční soustavy, tak z vhodného obnovitelného zdroje energie. Na praktické části se podílela společnost EG.D, a.s., která se stará o distribuci elektrické energie v jižní části České republiky. Konkrétně pak pracovníci z oddělení KDE (Kvalita dodávky energií), kteří mi poskytlí reálná data naměřená z distribuční soustavy. Tato data budou použita při návrhu. Na následujícím obrázku je vývojový diagram znázorňující postup mého návrhu. Tento postup návrhu současně reprezentuje obsah praktické části této práce.



Obrázek 34: Postup návrhu systému

5.1. Výběr lokality

Technici kontroly kvality energie z oddělení KDE ze společnosti EG.D, a.s. měří kvalitu elektrické energie slabých míst sítě na základě reklamací od zákazníků, s kterými se setkávají dnes a denně. Z tohoto důvodu jsem měl k dispozici velké množství naměřených dat. Pro svou práci jsem zvolil obec Dolní Miletín, která je částí města Lišov a nachází se v okrese krajského města České Budějovice.

Tato obec byla vybrána z více důvodů. Hlavním důvodem byla dostupnost naměřených dat vybrané oblasti. Dalším důvodem byla perspektivita oblasti z pohledu distributora. Nejedná se totiž o žádnou chatovou oblast, kam by obyvatelé jezdili pouze na rodinné víkendy. Právě naopak. Obec se v posledních letech hodně rozšiřuje. Jen za poslední dva roky zde byly postaveny dva nové rodinné domy a k dnešnímu dni je v Dolním Miletíně další hrubá stavba. V obci se momentálně nachází více volných stavebních parcel. Na základě této skutečnosti lze tedy z pohledu distributora předpokládat nárůst odběrných míst v dané lokalitě.

Na obrázku 35 je vyobrazena obec z leteckého pohledu se čtyřmi vyznačenými body. Bod 1 označuje distribuční transformátor (DTS) s převodem 22/0,4 kV o výkonu 250 kVA, který se stará o napájení celé obce. Body 2 a 3 označují místa, kde jsou umístěny pojistkové skříně řady SV101 a SS200. Bod 4 označuje odběrné místo (OM), které je umístěno na samém konci obce. Z důvodu největší vzdálenosti odběrného místa (označeného bodem 4) od napájecího transformátoru lze předpokládat, že kvalita elektrické energie bude právě v tomto odběrném místě nejhorší.



Obrázek 35: Měřicí body

Pomocí softwaru NetViewer Produkce⁶⁵ jsem provedl trasování elektrického vedení od napájecího transformátoru (bod 1) k odběrnému místu (bod 4). Na obrázku 36 je znázorněné dané trasování.

⁶⁵ Licence poskytnuta společností EG.G, a.s.

Název objektu	Druh_vedení	Materiál	Průřez_vodiče	Délka_z_grafiky_m	G3E_FID	G3E_FNO
* Ele-Úsek přípoj	* Podzemní vedení	* AYKY	* 4x16	* 34,53	* 1000821766	* 360
Ele-Úsek přípoj	Pomocný propoj	Nezadáno	Nezadáno	3,88	1001403517	360
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	4x35	39,49	1006175489	306
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	4x35	32,75	1006150288	306
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	4x35	73,22	1006242540	306
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	4x35	49,88	1029002773	306
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	4x35	58,84	1006175488	306
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	4x35	63,82	1006173583	306
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	4x35	105,93	1022150289	306
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	4x35	129,12	1006175487	306
Ele-Úsek vede	Nadzemní vedení	AlFe	3x50+35	291,28	1006157221	306
Ele-Úsek vede	Podzemní vedení	AYKY	3x95+70	29,94	1000549596	306

Obrázek 36: Trasování elektrického vedení

Z tohoto trasování je vidět skutečnost, že většina úseku vedení je tvořena starším venkovním vedením pomocí AlFe lan. Přesně je to pak 844,33 m. Celý uvažovaný úsek elektrického vedení je tedy tvořen z 92,5 % venkovním vedením. Zbylých 7,5 % úseku elektrického vedení je tvořeno modernějším kabelovým vedení typu AYKY.

5.2. Analýza naměřených dat

5.2.1. Měřicí přístroj

Kvalita elektrické energie se měří pomocí přístroje nazývaný PQ (Power Quality) analyzátor nebo také v praxi se můžeme setkat s označením kvalimetr. Kvalimetr byl umístěn do každého bodu zobrazeného na obrázku 35, kde byl umístěn a sbíral data po dobu dvanácti dnů, aby byla splněna doba pro sběr dat, jejíž minimální hodnota je určena normou na 1008 deseti minutovek (7 dnů). K měření kvality elektrické energie v oblasti Dolní Miletín byl použit kvalimetr typu Fluke 1744. Tento typ kvalimetru je zobrazen na obrázku 37. Data z kvalimetru byla vyhodnocena pomocí softwaru PQ Log⁶⁶.

⁶⁶ Licence poskytnuta společností EG.G, a.s.



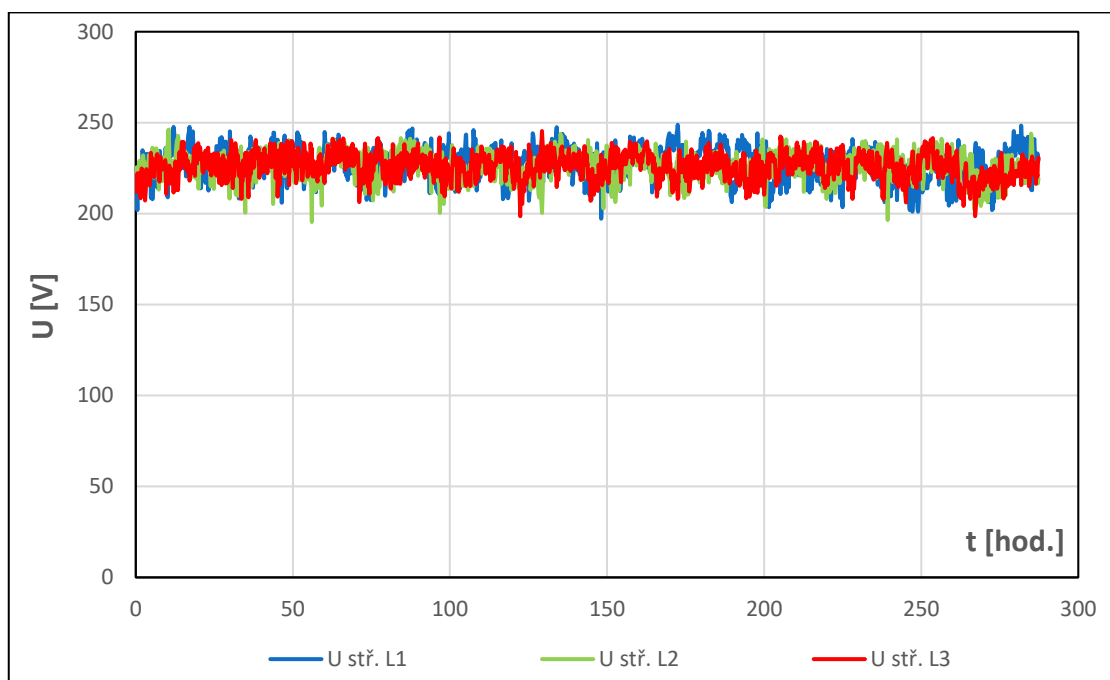
Obrázek 37: Kvalimetr Fluke 1744

5.2.2. Vyhodnocení naměřených dat v bodě 4

Měření v lokalitě Dolní Miletín proběhlo na základě reklamace odběratele v odběrném místě označeném bodem 4 na obrázku 35. Data z kvalimetru byla vyhodnocena podle normy ČSN EN 50160 „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě“. Příloha 3: Vyhodnocení kvality elektrické energie v odběrném místě potvrzuje, že kvalita elektrická energie nesplňuje požadavky technické normy ČSN EN 50160 „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě“.

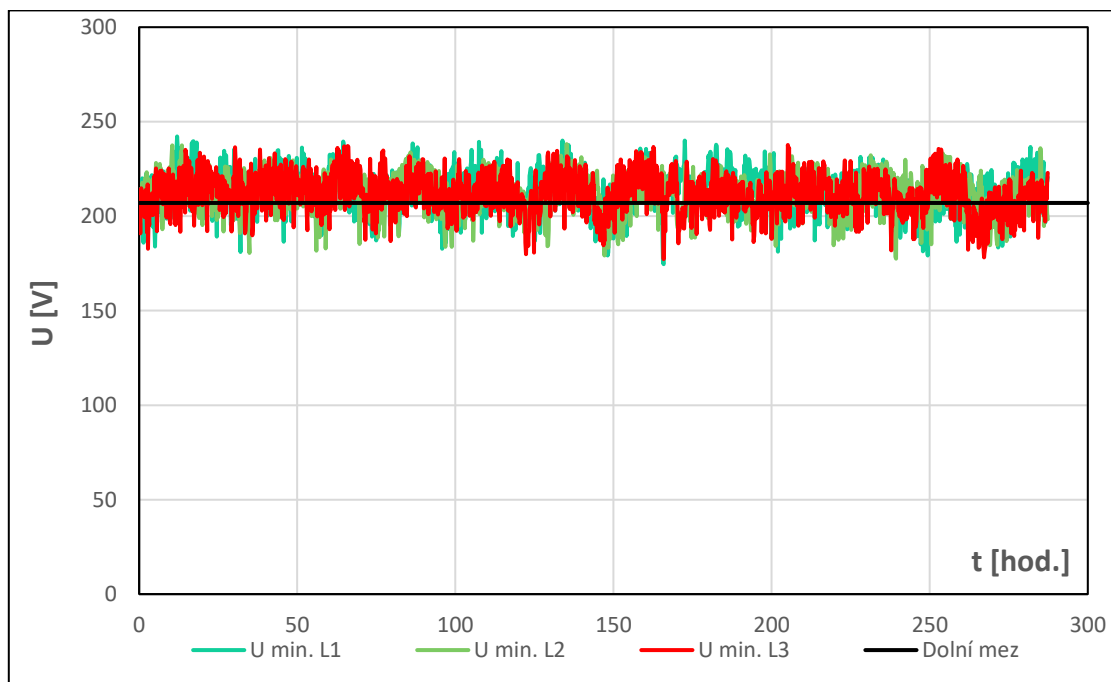
Z přílohy 3 je vidět skutečnost, že byl překročen limit pro dlouhodobý i krátkodobý flickr, napěťovou nesymetrii a limit pro napěťové harmonické 3. a 15. řádu. Dále v odběrném místě nejsou dodrženy povolené odchylky napájecího napětí.

Na obrázku 38 je vyobrazen průběh průměrných desetiminutových hodnot napětí v odběrném místě. Střední hodnota napětí se v odběrném místě pohybuje od 195 do 249 V (rozptyl 23,5 %). Tento rozptyl se nepodařilo změnou odbočky u napájecího transformátoru srovnat a naopak horní hodnota napětí se posunula nad hranici 250 V.

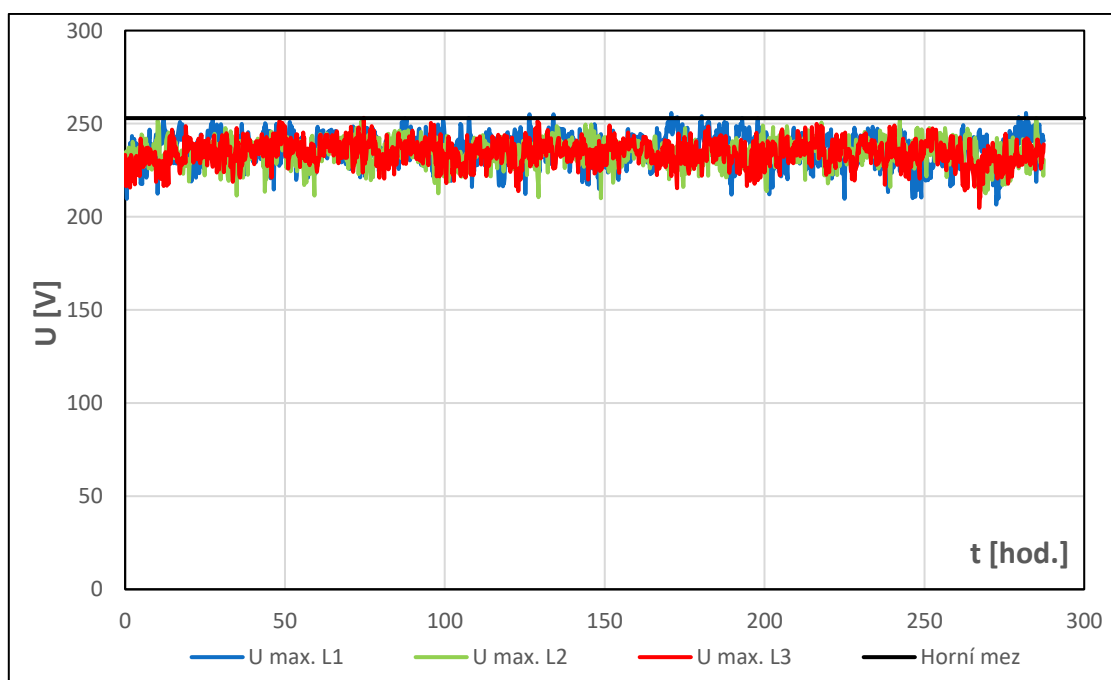


Obrázek 38: Průběh průměrných desetiminutových hodnot napětí v bodě 4

Dále v této kapitole budou zobrazeny kromě průměrných desetiminutových hodnot napětí i minimální a maximální desetiminutové hodnoty napětí s vyznačenou dolní či horní mezí napětí, které jsou stanoveny normou ČSN EN 50160 „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě“ a podle kapitoly 4.2.2 Odchylny napájecího napětí, nemá odchylka napájecího napětí přesáhnout $\pm 10\%$ jmenovitého napětí. Detaily průběhů minimálních a maximálních desetiminutových hodnot napětí s vyznačenou dolní či horní mezí napětí jsou zobrazeny v přílohách. Na obrázku 39 je graficky znázorněn průběh minimálních desetiminutových hodnot napětí v odběrném místě s vyznačenou dolní mezí napětí, která v síti NN činí 207 V ($230\text{ V} - 10\%$). Obrázek 40 znázorňuje naopak grafický průběh maximálních desetiminutových hodnot napětí v odběrném místě s vyznačenou horní mezí napětí, která v síti NN činí 253 V ($230\text{ V} + 10\%$).



Obrázek 39: Průběh minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 4



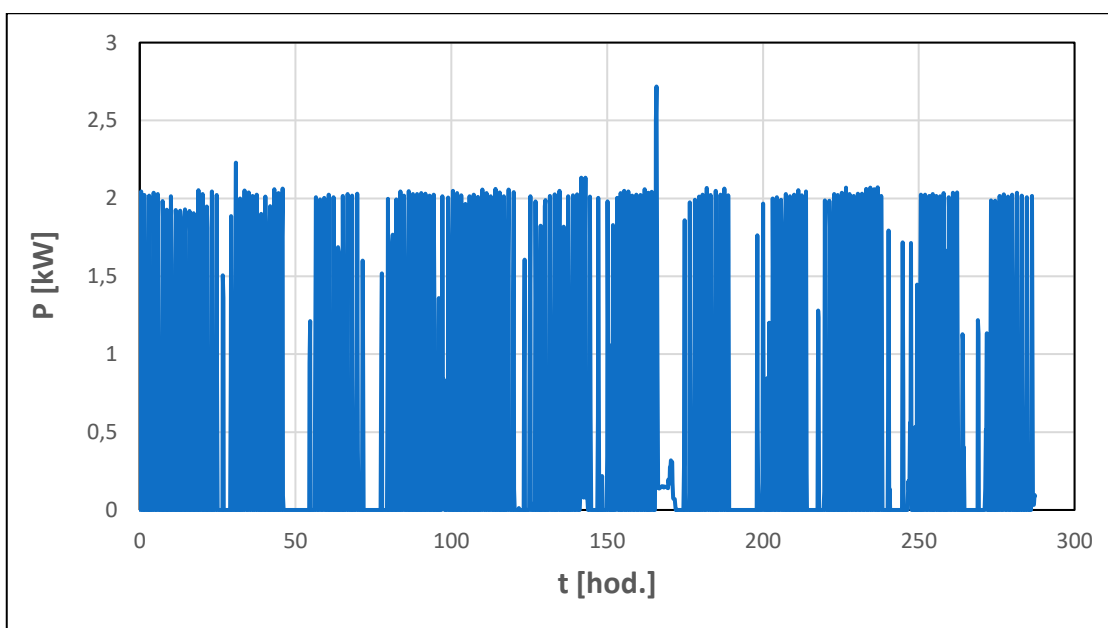
Obrázek 40: Průběh maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 4

Z obrázků 39 a 40 je vidět skutečnost, že napětí v odběrném místě mnohonásobně překračuje dolní i horní mez. Počet těchto přepětí či podpětí (a intervaly dob jejich trvání) v době měření v odběrném místě znázorňuje tabulka 15. Z tabulky lze vyčíst, že přepětí se v době měření u odběratele vyskytlo 28 krát. Co se týče počtu případů podpětí, tak těch se u odběratele v době měření vyskytlo 5633.

Tabulka 15: Počet přepětí/podpětí v bodě 4

Čas t	ms			s				min
Fáze L1, L2, L3	< 20	20 - 100	100 - 500	0,5 - 1	1 - 3	3 - 20	20 - 60	>= 1
Přepětí > 10 %	1		3	1	3	10	8	2
Pokles U > 10 %								
10 - 15 %	103	1286	1074	241	406	1157	606	307
15 - 30 %	2	139	24	7	7	41	66	167
30 - 60 %								
60 - 99 %								

Obrázek 41 obsahuje průběh odebíraného výkonu z distribuční sítě odběratelem. Kvalimetr je vždy zapojen ve spotřebičovém režimu. To znamená, že pokud se výkon pohybuje v kladných číslech, tak se jedná o výkon ze sítě odebraný. Plocha pod křivkou časového průběhu odebíraného výkonu je rovna celkové odebrané energii ze sítě odběratelem. Dále jsem tedy provedl integraci časového průběhu výkonu přes celý časový interval, který je roven době měření. Z této operace mi vyšla hodnota celkové energie spotřebované v bodě 4, která je rovna 105,301 kWh.



Obrázek 41: Průběh celkového středního odebíraného výkonu v bodě 4

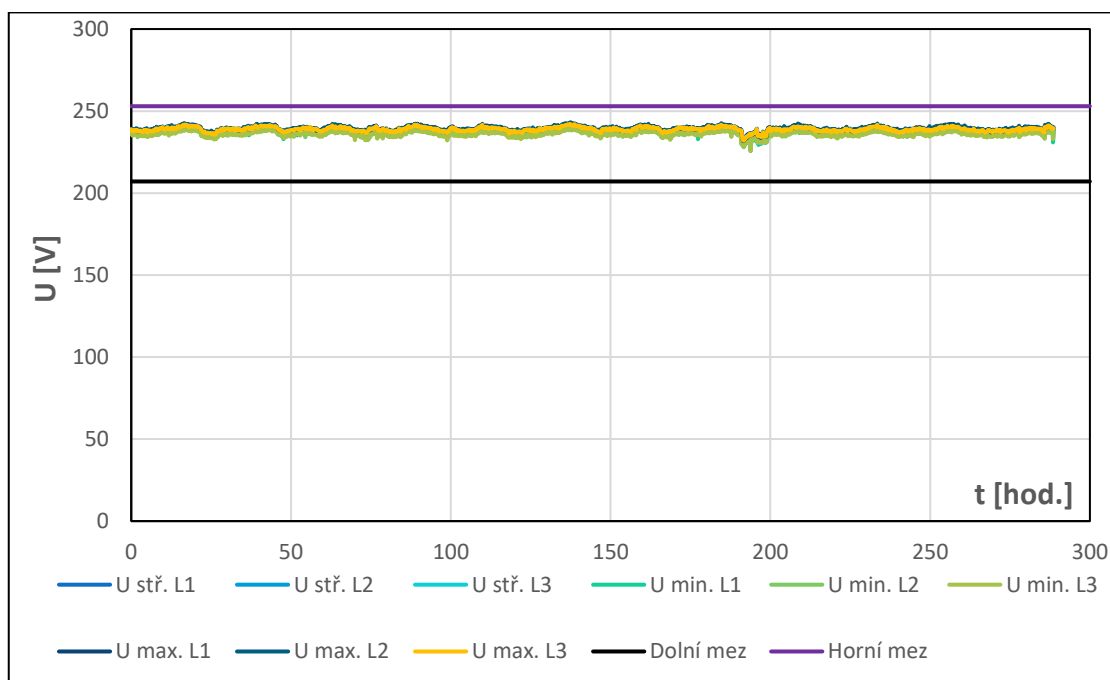
5.2.3. Vyhodnocení naměřených dat v bodě 1

Poté, co byla z analýzy naměřených dat v kapitole 5.2.2 zjištěna nedostatečná kvalita elektrické energie v odběrném místě, tak byl kvalimetr umístěn na příslušný vývod napájecího transformátoru, za účelem zjištění stability elektrického napětí na samém počátku tohoto elektrického úseku, který zajišťuje distribuci elektrické energie pro celou obec. Počet přepětí či podpětí (a intervaly dob jejich trvání) v době měření v bodě 1 znázorňuje následující tabulka.

Tabulka 16: Počet přepětí/podpětí v bodě 1

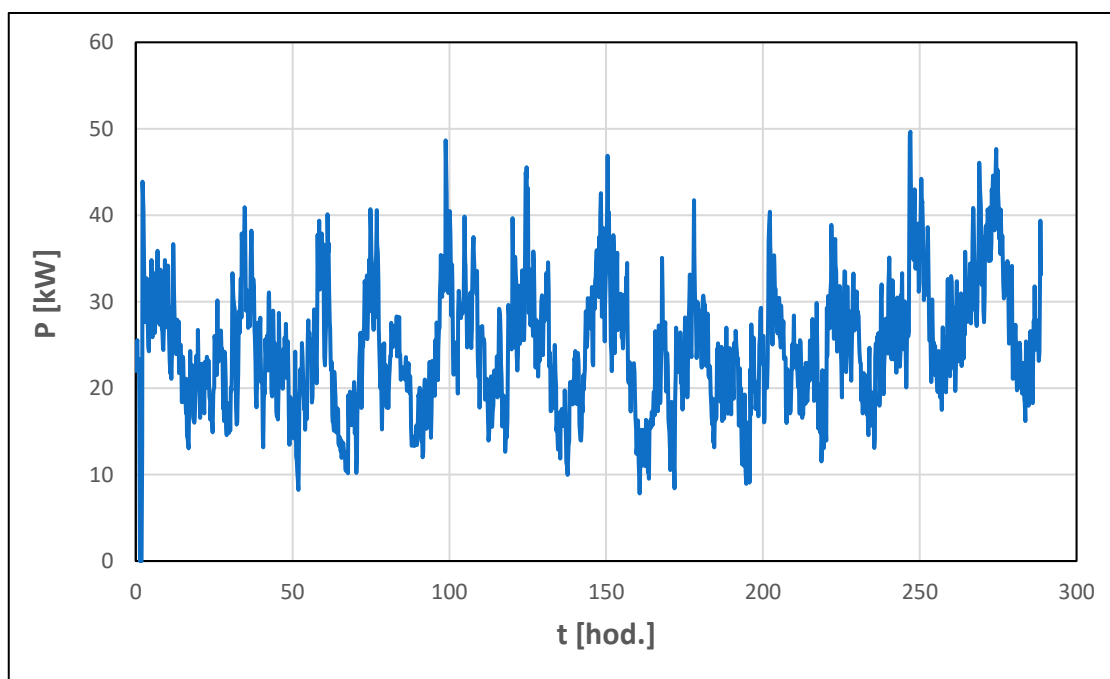
Čas t	ms			s				min
Fáze L1, L2, L3	< 20	20 - 100	100 - 500	0,5 - 1	1 - 3	3 - 20	20 - 60	>= 1
Přepětí > 10 %								
Pokles U > 10 %								
10 - 15 %								
15 - 30 %								
30 - 60 %								
60 - 99 %								

Za celou dobu měření nenastaly žádné případy překročení dolní či horní meze elektrického napětí. Z důvodu stability elektrického napětí v bodě 1 jsem, se rozhodl dát průměrné, minimální i maximální hodnoty elektrického napětí do jednoho grafu. Tento graf s vyznačenými mezemi ($230 \text{ V} \pm 10 \%$) je zobrazen na obrázku 42. Z tohoto grafu vyplývá, že se žádná hodnota elektrického napětí nepohybuje mimo vyznačené meze a jsou tímto potvrzena data uvedená v tabulce 16.



Obrázek 42: Průběh středních/minimálních/maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 1

Na obrázku 43 je znázorněn průběh výkonu odebíraného celou obcí v průběhu měření z distribuční sítě. Integrací časového průběhu výkonu přes celý měřicí (časový) interval jsem zjistil, že celá obec za dobu měření spotřebovala energii o hodnotě 6 320,57 kWh.



Obrázek 43: Průběh celkového středního odebíraného výkonu v bodě 1

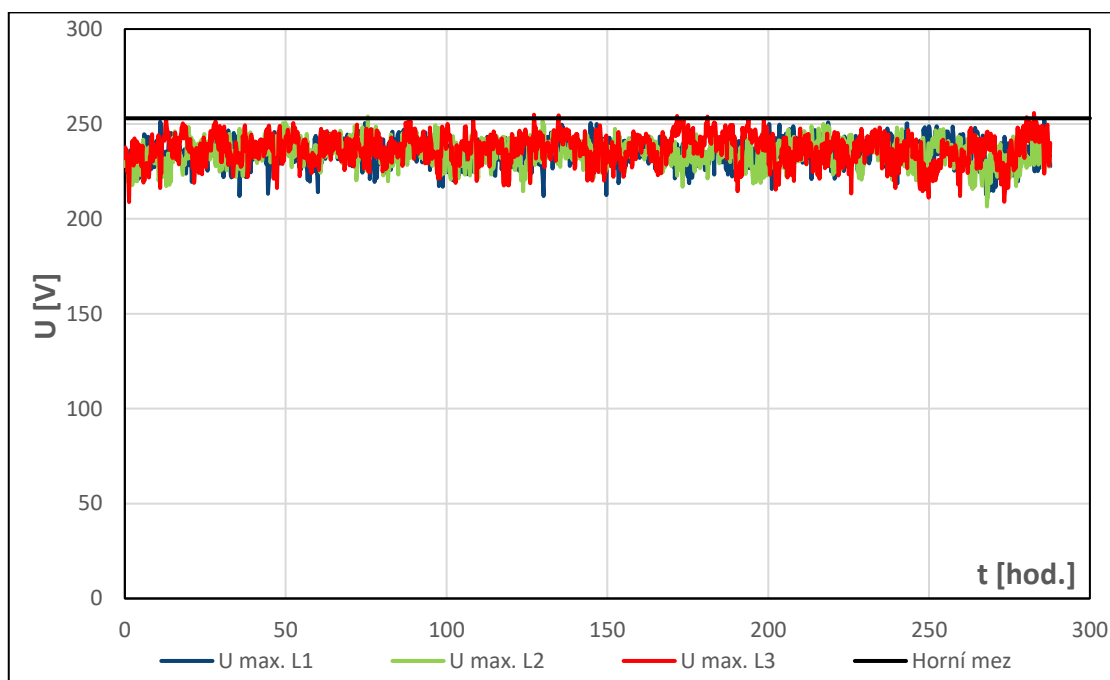
5.2.4. Vyhodnocení naměřených dat v bodě 2

V kapitole 5.2.3 bylo zjištěno, že stabilita elektrického napětí distribučního transformátoru je vcelku přijatelná. Nestabilita elektrického napětí byla tedy zjištěna v bodě 4 (v odběrném místě) ale v bodě 1 byla stabilita vyhovující. Jelikož jsou body 1 a 4 na samém začátku, respektive na konci uvažovaného úseku elektrického vedení, tak byly odměřeny ještě dva body (2 a 3) za účelem zjištění kvality elektrické energie mezi počátečním a koncovým bodem zkoumaného úseku vedení. Bod 2 označuje pojistkovou skříň typu SV101. Počet přepětí či podpětí (a intervaly dob jejich trvání) v době měření v bodě 2 znázorňuje následující tabulka.

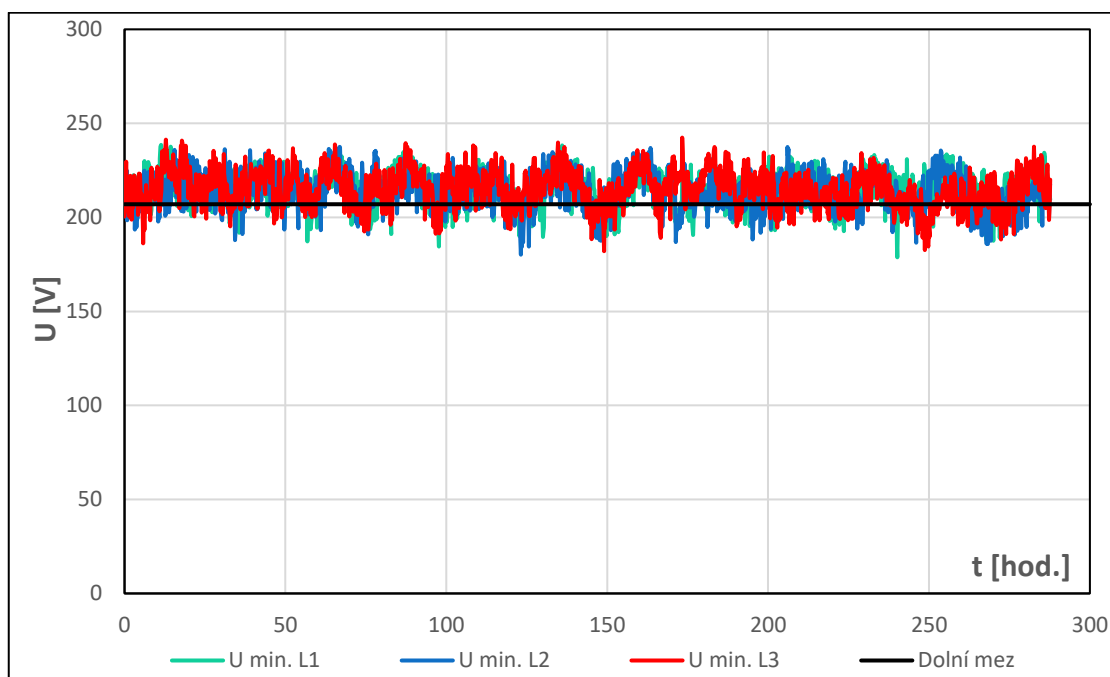
Tabulka 17: Počet přepětí/podpětí v bodě 2

Čas t	ms			s				min
	< 20	20 - 100	100 - 500	0,5 - 1	1 - 3	3 - 20	20 - 60	
Fáze L1, L2, L3								
Přepětí > 10 %			4	9	5	3	3	2
Pokles U > 10 %								
10 - 15 %	24	1001	510	223	247	838	457	232
15 - 30 %	2	40	12	3	2	24	39	84
30 - 60 %								
60 - 99 %								

V bodě 2 se během měření objevilo 26 případů nárůstu napětí nad horní mez a 3738 případů poklesu napětí pod dolní mez. Tyto nárůsty, respektive poklesy jsou zobrazeny na obrázku 44 respektive 45.

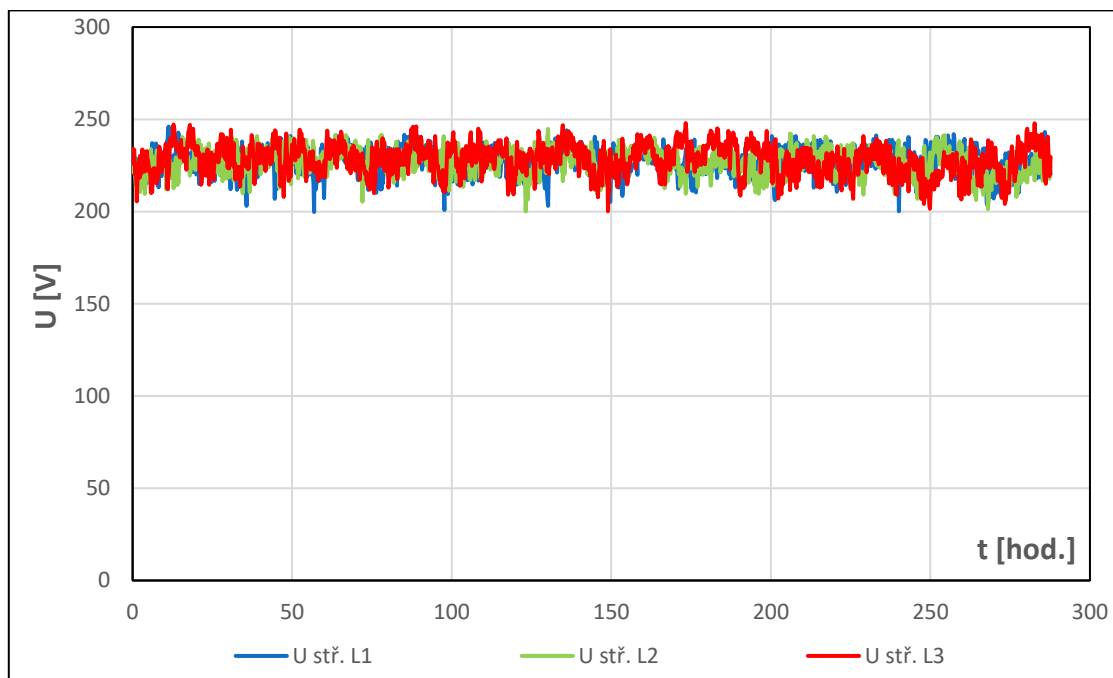


Obrázek 44: Průběh maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 2



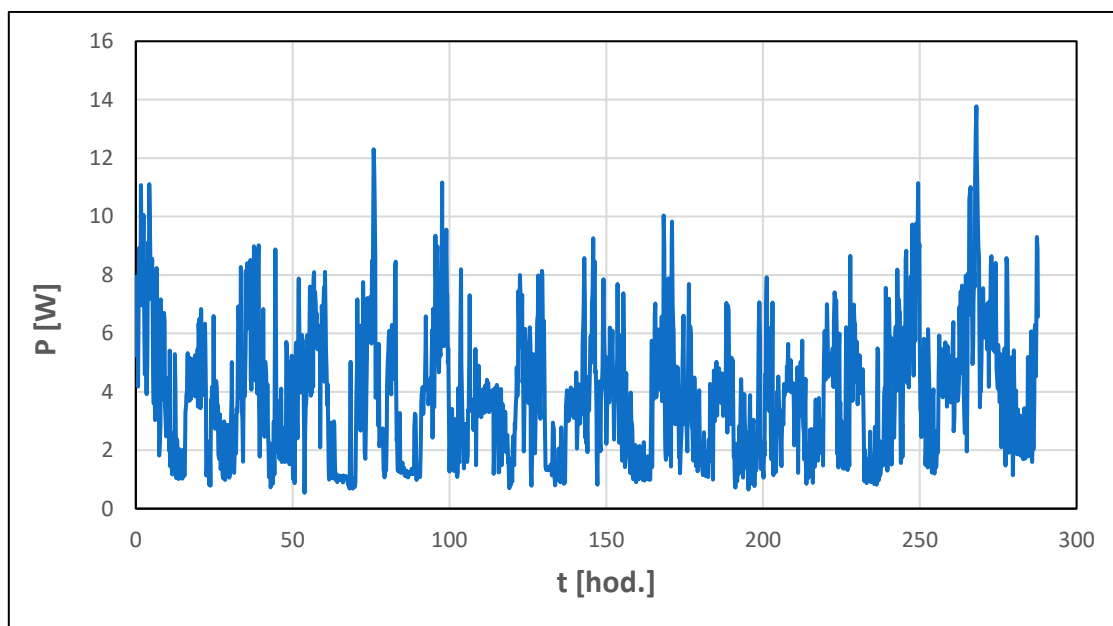
Obrázek 45: Průběh minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 2

Průměrná hodnota elektrického napětí v bodě 2 se pohybuje od 200 V do 248 V (rozptyl 20,9 %). Průběh průměrné hodnoty elektrického napětí v bodě 2 je zobrazen na následujícím obrázku.



Obrázek 46: Průběh průměrných desetiminutových hodnot napětí v bodě 2

Na obrázku 47 je znázorněn průběh výkonu odebíraného v bodě 2.



Obrázek 47: Průběh celkového středního odebíraného výkonu v bodě 2

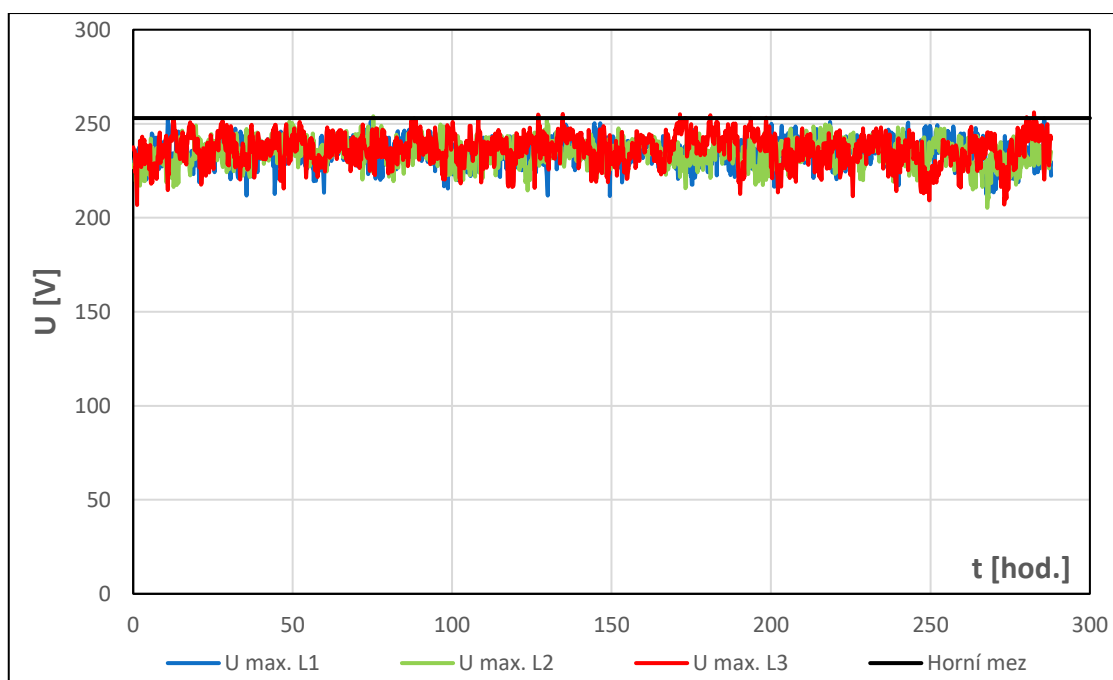
5.2.5. Vyhodnocení naměřených dat v bodě 3

Bod 3 označuje pojistkovou skříň typu SS200. Počet přepětí či podpětí (a intervaly dob jejich trvání) v době měření v bodě 3 znázorňuje tabulka 18.

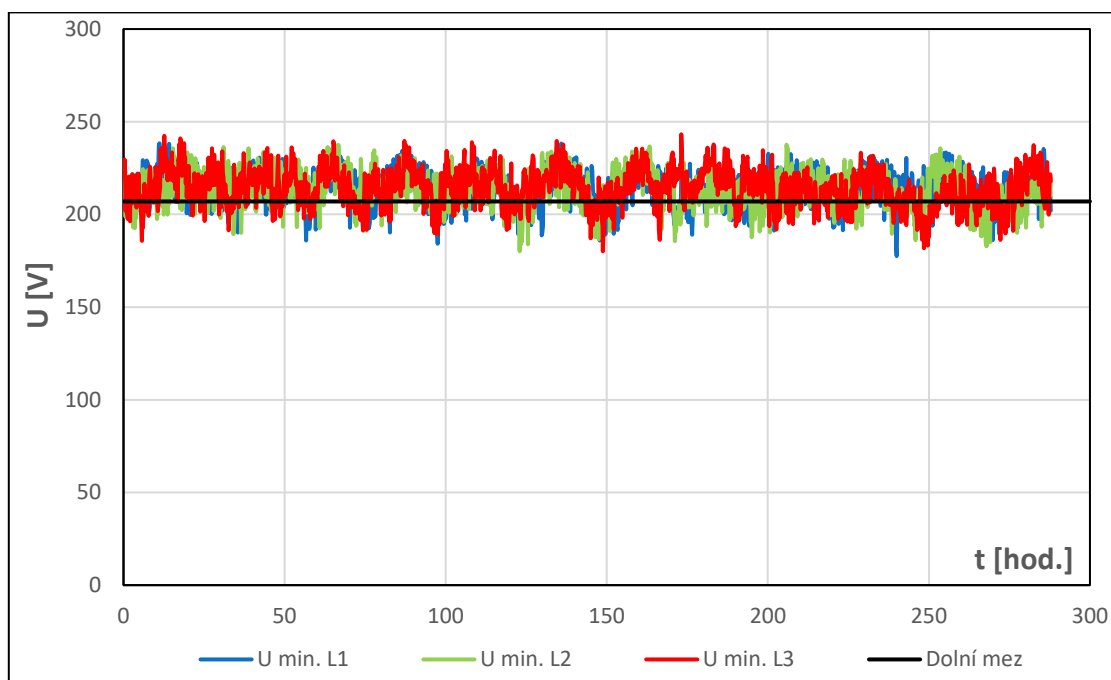
Tabulka 18: Počet přepětí/podpětí v bodě 3

Čas t	ms			s				min
Fáze L1, L2, L3	< 20	20 - 100	100 - 500	0,5 - 1	1 - 3	3 - 20	20 - 60	>= 1
Přepětí > 10 %			1	8	4	6	5	2
Pokles U > 10 %								
10 - 15 %	67	1155	648	236	315	978	516	299
15 - 30 %	2	47	15	2	2	39	49	123
30 - 60 %								
60 - 99 %								

V bodě 3 se během měření objevilo 26 případů nárůstu napětí nad horní mez a 4493 případů poklesu napětí pod dolní mez. Tyto nárůsty, respektive poklesy jsou zobrazeny na obrázku 48 respektive 49.

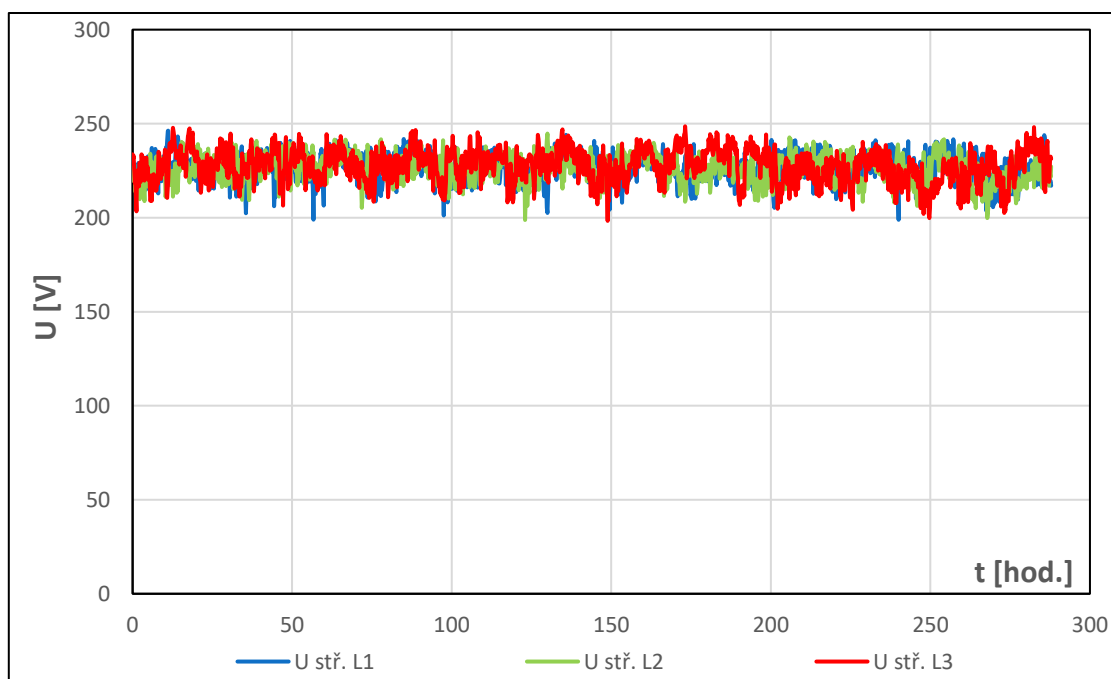


Obrázek 48: Průběh maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 3



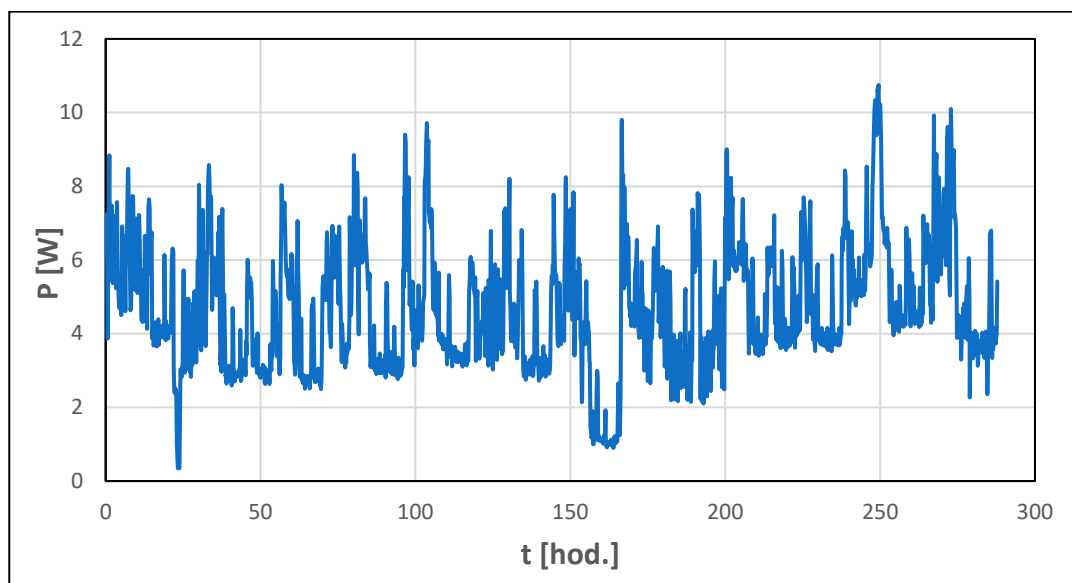
Obrázek 49: Průběh minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 3

Průměrná hodnota elektrického napětí v bodě 3 se pohybuje od 198 V do 249 V (rozptyl 22,2 %). Průběh průměrné hodnoty elektrického napětí v bodě 2 je zobrazen na obrázku 50. Tímto postupným vyhodnocováním dat je krásně vidět skutečnost, že s rostoucí vzdáleností od napájecího transformátoru (bod 1) se kvalita elektrické energie stále více zhoršuje. Tím je potvrzen předpoklad, že odběrné místo na konci obce (bod 4) je místem nejproblémovějším co se týče kvality elektrické energie.



Obrázek 50: Průběh průměrných desetiminutových hodnot napětí v bodě 3

Na následujícím obrázku je znázorněn průběh výkonu odebíraného v bodě 3.

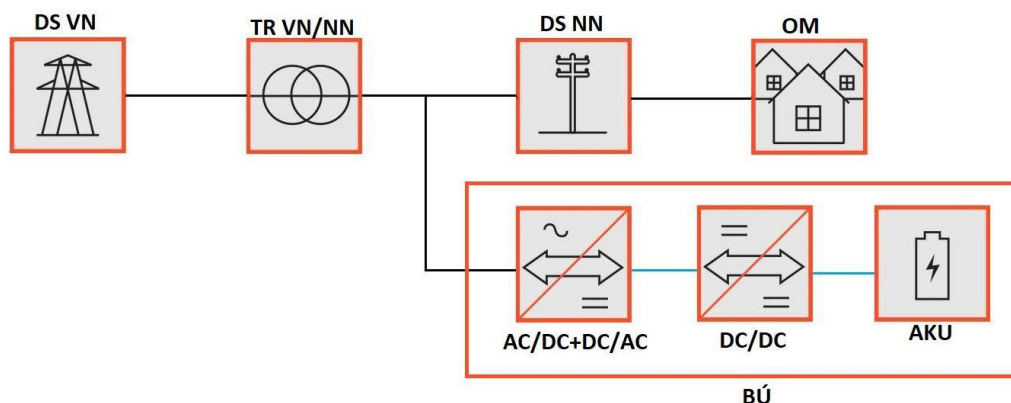


Obrázek 51: Průběh celkového středního odebíraného výkonu v bodě 3

5.3. Návrh bateriového úložiště

5.3.1. Schéma navrhovaného systému

Na obrázku 52 je zobrazeno schéma distribuční soustavy s paralelně připojeným bateriovým úložištěm.

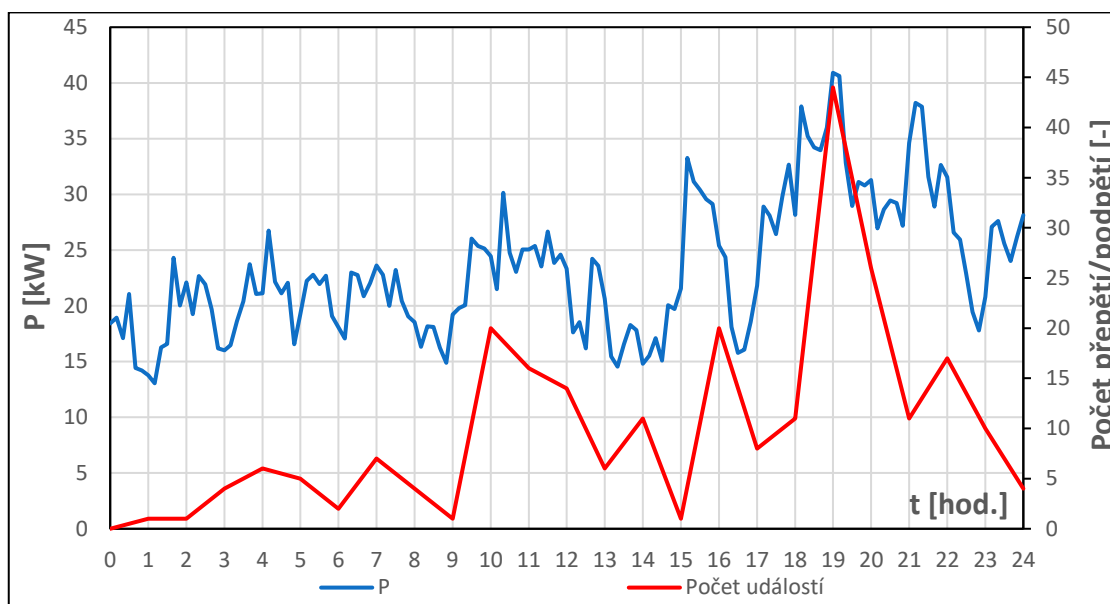


Obrázek 52: Schéma distribuční soustavy s paralelně připojeným bateriovým úložištěm

Napěťová hladina VN je za pomoci TR VN/NN transformována na napěťovou hladinu NN. Z distribuční sítě hladiny NN jsou napájeny odběrná místa OM. Za TR je paralelně k distribuční síti připojeno BÚ. To se skládá z obousměrného měniče AC/DC + DC/AC (střídač + usměrňovač), regulátoru nabíjení DC/DC a elektrochemických akumulátorů AKU. Černá propojení signalizují střídavou cestu. Modrá propojení signalizují cestu stejnosměrnou.

5.3.2. Předpoklad

Nejprve je třeba si určit za jakým účelem je bateriové úložiště navrhováno a co od něj očekávat. V mém návrhu se budu snažit navrhnout bateriové úložiště za účelem omezení odběrových špiček. V ideálním případě by obec za pomoci bateriového úložiště měla docílit konstantního odběrového výkonu z distribuční sítě. Na následujícím obrázku je v jednom grafu zobrazen průběh odebíraného výkonu z distribuční soustavy celé obce (P) během jednoho celého dne a počet případů, ve kterých napětí v měřicím bodě 4 u odběratele překročilo mezní hodnoty dané rozsahem $230 \text{ V} \pm 10 \%$.

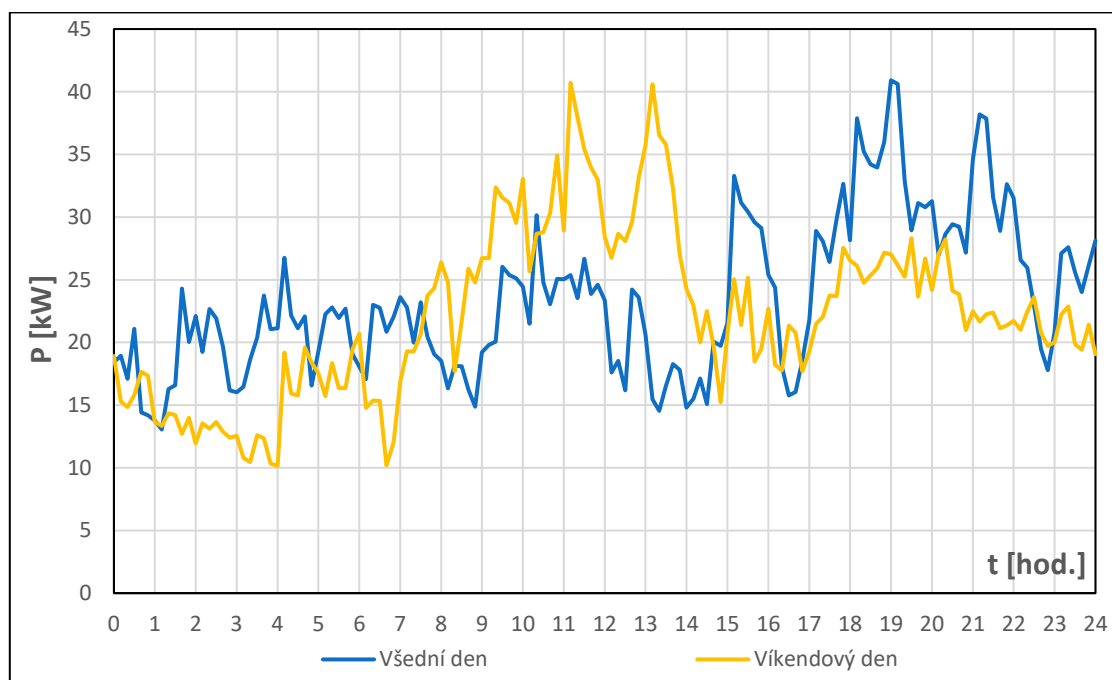


Obrázek 53: Průběh odebíraného výkonu v bodě 1 a počtu událostí v bodě 4

Z obrázku 53 je vidět závislost křivky znázorňující počet přepětí/podpětí na výkonové křivce. Tato závislost je projevna zvýšeným počtem událostí v době odběrových špiček. Lze tedy předpokládat, že pokud bude dosaženo pomocí BÚ konstantního odběru a omezení odběrových špiček, tak se sníží počet událostí v těchto momentech a dojde ke zvýšení stability elektrického napětí.

5.3.3. Určení kapacity bateriového úložiště

Bateriové úložiště bude navrženo na základě dostupných dat o spotřebě celé obce. Pro další postup je třeba určit denní spotřebu energie celé obce. V tomto návrhu budu uvažovat den v roce, kdy má obec největší odběr. Takový den bude s největší pravděpodobností dnem zimním z důvodu zvýšené spotřeby elektrické energie na vytápění či pro svou vlastní zábavu, jelikož lze předpokládat zvýšené trávení času v domácnosti oproti letním dnům. K dispozici mám naměřená data z konce listopadu, která jsou pro předcházející úvahu vyhovující. Dále je třeba určit, zda má obec vyšší spotřebu ve všední nebo víkendový den. Průběhy odběru elektrické energie celé obce ve všední či víkendový den jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Obrázek 54: Průběhy odběru elektrické energie obce ve všední/víkendový den

Z obrázku 54 nelze jednoznačně určit, ve kterém dni dochází v obci k většímu odběru elektrické energie. Za účelem zjištění celkové odebrané energie jsem tedy provedl integraci obou průběhů. Z provedených integrací jsem zjistil, že obec ve všední den odebrala z distribuční sítě energii o velikosti 562 kWh. O dni víkendovém byla odebrána energie o velikosti 532 kWh. Dále tedy bude uvažován všední den. Na obrázku je vidět několik odběrových špiček obce. První „menší“ odběrová špička nastává kolem čtvrté hodiny ráno, kdy obyvatelé pravděpodobně vstávají do práce. Další špička nastává před polednem mezi desátou a jedenáctou hodinou. Tuto špičku přisuzuji vaření oběda či pečení členů domácnosti, kteří daný den nešli do práce. Další už větší odběrová špička se na obrázku objevuje kolem třetí hodiny odpoledne, kdy se členové domácnosti vracejí z práce domů. A nakonec největší odběrové špičky se na obrázku nacházejí ve večerních hodinách v čase od 18:00 do 22:00.

Z důvodu odlišnosti spotřeby v zimních a letních měsících, jsem si celý rok rozdělil na dvě sezóny. Sezóna zimní (říjen–duben), ve které bude spotřeba vyšší z důvodu větší energetické náročnosti domácností a sezóna letní (květen - září). Pro jednoduchost budu uvažovat, že denní celková spotřeba obce bude v průběhu každé sezóny stejná. Spotřebu v zimní sezóně není problém určit, jelikož mám z tohoto období naměřená reálná data. Naměřená data z letní sezóny k dispozici bohužel nemám, a tak jsem musel spotřebu

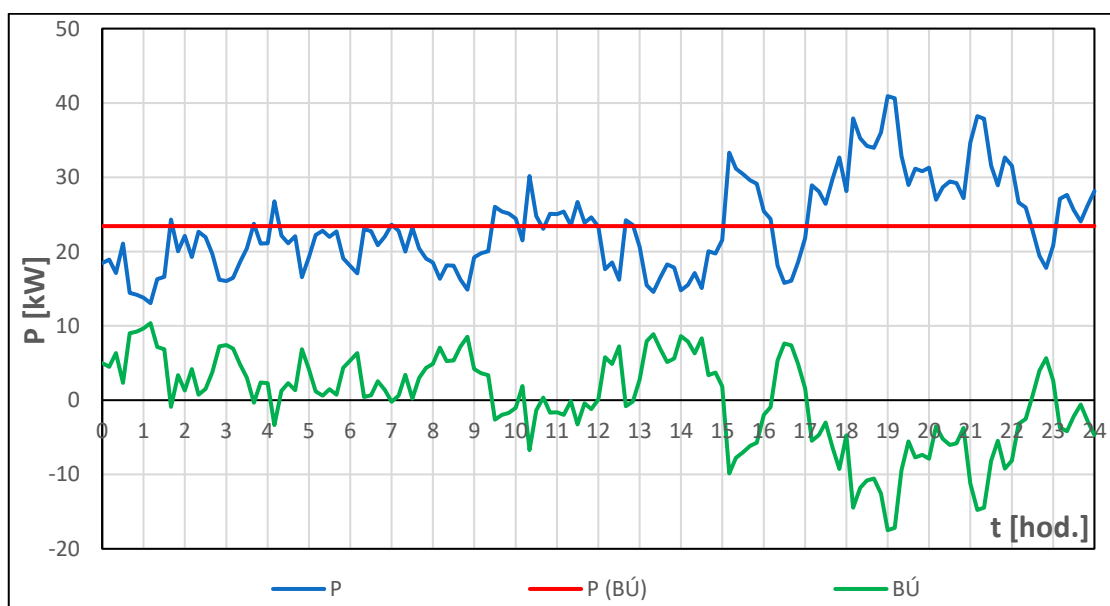
obce v letní sezóně odhadnout a došel jsem k závěru, že spotřeba obce v letních měsících činí 75 % spotřeby v měsících zimních.⁶⁷

Celkovou odebranou energií celé obce za jeden den jsem již určil a její hodnota činí 562 kWh. Tato hodnota energie se samozřejmě i v případě aplikace bateriového úložiště nezmění. Nicméně lze pomocí něho docílit konstantního odběru elektrické energie z distribuční sítě. Tuto konstantní hodnotu odebíraného výkonu P_{konst} lze získat pomocí následujícího vzorce.

$$P_{konst.} = \frac{E_{den}}{t} = \frac{562}{24} = 23,42 \quad [\text{kW}] \quad (25),$$

kde E_{den} je denní spotřeba elektrické energie [kWh],
 t je čas [hod.].

Na následujícím obrázku jsou znázorněny průběhy odběrového výkonu bez BÚ (P), s BÚ (P (BÚ)) a průběh nabíjecího a vybíjecího výkonu BÚ (BÚ).



Obrázek 55: Průběhy odběru elektrické energie z distribuční sítě bez bateriového úložiště, s bateriovým úložištěm a průběh nabíjení a vybíjení bateriového úložiště v zimní sezóně

Z obrázku 55 je patrné, že pokud by všechna energie nacházející se v grafu pod červenou a nad modrou křivkou byla naakumulována v BÚ (plocha pod zelenou křivkou

⁶⁷ Tento odhad byl proveden na základě dostupných informací o spotřebě od vlastníků rodinných domů, se kterými se osobně znám.

v kladné části výkonové osy) a následně využita v době kdy se v obci nacházejí odběrové špičky dané plochou nad červenou a pod modrou křivkou, tak bychom docílili konstantního odběru po celý den. Zelená křivka nacházející se v kladné části výkonové osy symbolizuje nabíjení BÚ. Naopak zelená křivka nacházející se v záporné části výkonové osy symbolizuje vybíjení BÚ. Z průběhu zelené křivky lze usoudit, že akumulace elektrické energie probíhá zhruba od půlnoci do 15. hodiny odpolední. Od této doby do půlnoci probíhá vybíjení BÚ a spotřeba naakumulované elektrické energie.

Základní otázkou je jakou zvolit kapacitu BÚ. Na tuto otázku lze získat odpověď tak, že za pomoci integrace spočítáme plochu pod zelenou křivkou v záporné části výkonové osy. Tato plocha značí energii, která je potřeba v BÚ naakumulovat, aby bylo dosaženo konstantního odběru. Energie spotřebovaná prostřednictvím BÚ je rovna hodnotě 57 kWh za den. Nicméně tato hodnota ještě neoznačuje finální kapacitu BÚ. Pokud bych bateriové úložiště dimenzoval na hodnotu 57 kWh, tak by nejprve v první části dne naakumulovalo energii o hodnotě 57 kWh a následně v druhé části dne by se o tuto energii vybilo. To znamená, že by vždy na konci dne bylo BÚ plně vybité, a to není rozhodně dobré pro životnost systému. Pro získání celkové kapacity BÚ je třeba ještě zohlednit hloubku vybití (DOD) a stárnutí (A) akumulátorů. Hloubka vybití je závislá na typu použitých akumulátorů. Jako hodnotu stárnutí akumulátorů lze podle zdroje⁶⁸ uvažovat 10 %. Hloubka vybití je u LiFePO4 akumulátorů 90 %. Celková kapacita bateriového úložiště je dána následujícím vztahem:

$$W_{ak} = \frac{A \cdot W_{bat}}{DOD} = \frac{1,1 \cdot 57}{0,9} = 69,667 \quad [\text{kWh}] \quad (26),$$

kde A je stárnutí akumulátoru [%],

W_{bat} je množství potřebné naakumulované energie [kWh],

DOD je hloubka vybití akumulátoru [%].

Podle rovnice 26 by pro BÚ byla postačující kapacita 69,667 kWh. Nicméně při návrhu BÚ je lepší kapacitu spíše naddimenzovat než poddimenzovat.

⁶⁸ FATHIMA, Hina. *Optimized Sizing, Selection, and Economic Analysis of Battery Energy Storage for Grid-Connected Wind-PV Hybrid System* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: [Optimized Sizing, Selection, and Economic Analysis of Battery Energy Storage for Grid-Connected Wind-PV Hybrid System \(hindawi.com\)](https://www.hindawi.com)

5.3.4. Výběr jednotlivých komponent

Bateriové úložiště bude složeno z 19 bateriových modulů (akumulátorů) typu LiFePO4 o kapacitě jednoho modulu 3,84 kWh od výrobce WATTSONIC. Bateriový modul je znázorněn na následujícím obrázku. Technické parametry jednoho bateriového modulu jsou v tabulce 19.



Obrázek 56: Bateriový modul WATTSONIC 3,84 kWh ⁶⁹

Tabulka 19: Technické parametry ⁷⁰

Bateriový modul WATTSONIC 3,84 kWh	
Provozní napětí [V]	38,4
Maximální nabíjecí/vybíjecí proud [A]	100
Jmenovitý nabíjecí/vybíjecí proud [A]	50
Provozní teplota [°C]	-20 ~ 55
Hmotnost [kg]	34
Kapacita [kWh]	3,84

Podle obrázku 52 je třeba k akumulátorům připojit regulátor nabíjení, který se stará o procesy nabíjení/vybíjení jednotlivých akumulátorů. Řídící jednotka od stejného výrobce WATTSONIC je na následujícím obrázku. Technické parametry řídicí jednotky jsou v tabulce 20.

⁶⁹IFTECH. *Bateriový modul WATTSONIC 3,84 kWh* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Bateriový modul WATTSONIC 3,84kWh - ifTECH s.r.o.

⁷⁰ IFTECH. *Bateriový modul WATTSONIC 3,84 kWh* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Bateriový modul WATTSONIC 3,84kWh - ifTECH s.r.o.



Obrázek 57: Řídící jednotka WATTSONIC ⁷¹

Tabulka 20: Technické parametry ⁷²

Řídící jednotka WATTSONIC	
Jmenovité napětí [V]	250 - 1000
Maximální nabíjecí/vybíjecí proud [A]	100
Jmenovitý nabíjecí/vybíjecí proud [A]	50
Provozní teplota [°C]	-20 ~ 55
Hmotnost [kg]	13

Dále je třeba vybrat skříň pro uložení bateriových modulů. Pro tyto bateriové moduly prodává WATTSONIC speciální rackové skříň. Tato racková skříň je na následujícím obrázku. Do jedné skříňe je možné uložit 20 modulů. V tomto návrhu je třeba uložit 19 bateriových modulů plus jednu řídicí jednotku, tudíž pro tento návrh bude tato skříň dostačující.

⁷¹ IFTECH. *Komerční BMS WATTSONIC* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Komerční BMS WATTSONIC, 900V - ifTECH s.r.o.

⁷² IFTECH. *Komerční BMS WATTSONIC* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Komerční BMS WATTSONIC, 900V - ifTECH s.r.o.



Obrázek 58: Racková skříň WATTSONIC ⁷³

⁷³ IFTECH. *Racková skříň WATTSONIC* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Racková skříň WATTSONIC - ifTECH s.r.o.

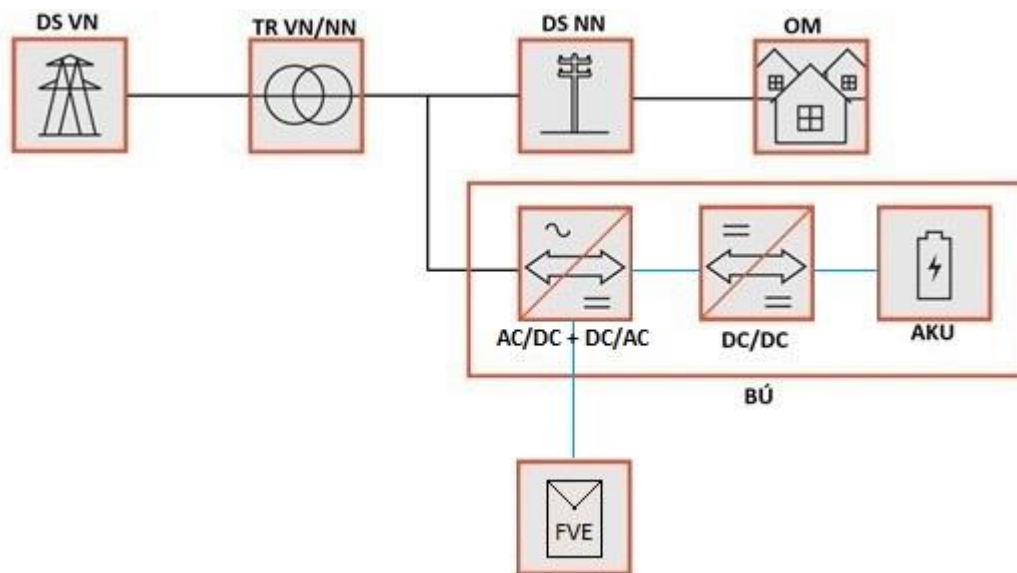
5.4. Výběr vhodného obnovitelného zdroje energie

V předcházející kapitole bylo pro uvažovanou lokalitu navrženo bateriové úložiště, díky kterému bylo dosaženo konstantního odběru elektrické energie z distribuční soustavy. V tomto případě, kdy již máme k dispozici BÚ by byla škoda ho použít pouze ke stabilizaci odběru. Pokud by zde byl postaven nějaký obnovitelný zdroj energie, tak lze BÚ použít i pro akumulaci elektrické energie generovaným tímto zdrojem. Na obrázku 35 je znázorněn letecký pohled na Dolní Miletín. Tento letecký pohled lze použít pro výběr vhodného obnovitelného zdroje energie, který lze v dané lokalitě použít. Kolem obce teče Miletínský potok. Tento potok ovšem nemá dostatečný průtok vody, aby na něm mohla být vystavěna malá vodní elektrárna. Tuto možnost jsem tedy zavrhl. Z obrázku je vidět, že se v obci kolem rodinných domků rozléhají polní oblasti. Tyto oblasti jsou vhodné pro postavení fotovoltaické nebo větrné elektrárny. Z důvodu, že se obce Dolní Miletín nachází v jižních Čechách, kde je podle obrázku 3 poměrně velký roční úhrn globálního slunečního záření, tak se volba fotovoltaické elektrárny jeví jako vhodná. Za zmínku stojí, že v současné době není na základě aktuálně platné právní úpravy dovoleno distributorovi elektrické energie si elektřinu vyrábět. Nicméně nikde není řečeno, že toto omezení nebude v budoucnu zrušeno.

5.5. Návrh fotovoltaické elektrárny

5.5.1. Schéma navrhovaného systému

Na obrázku 59 je zobrazeno schéma distribuční soustavy s paralelně připojeným bateriovým úložištěm a fotovoltaickou elektrárnou.



Obrázek 59: Schéma distribuční soustavy s paralelně připojeným bateriovým úložištěm a fotovoltaickou elektrárnou

Napěťová hladina VN je za pomoci TR VN/NN transformována na napěťovou hladinu NN. Z distribuční sítě hladiny NN jsou napájeny odběrná místa OM. Za TR je paralelně k distribuční síti připojeno BÚ. To se skládá z obousměrného měniče AC/DC + DC/AC (střídač + usměrňovač), regulátoru nabíjení DC/DC a elektrochemických akumulátorů AKU. Dále je zde paralelně připojená fotovoltaická elektrárna FVE. Vyrobená energie z FVE pomocí regulátoru nabíjení nabíjí akumulátory. V případě plného nabití akumulátorů je stejnosměrná energie vyrobená FVE přeměněna na střídavou pomocí DC/AC měniče a posílána do distribuční sítě. Černá propojení signalizují střídavou cestu. Modrá propojení signalizují cestu stejnosměrnou.

5.5.2. Návrh

Co je důležité při návrhu FV systému je, si v první řadě říct, jaké požadavky budou na daný systém kladeny. V případě BÚ bylo navrženo úložiště, které zajistilo konstantní odběr z DS po celý den. To znamená, že pokud je aktuální odběr menší než průměrný, tak se BÚ nabíjí z DS. Pokud je aktuální odběr větší než průměrný, tak se BÚ vybíjí. Aby bylo distribuční síti ještě více “uleveno“, pokusím se navrhnout takový FV systém, který vyrobí tolik energie (která bude následně uložena v BÚ), že BÚ nebude nutné nabíjet z DS.

Pro návrh fotovoltaické elektrárny je zapotřebí znát hodnoty slunečního ozáření v uvažovaném místě. Pro zjištění těchto hodnot jsem použil online software PVGIS⁷⁴ (Photovoltaic geographical information system). Průměrné měsíční a denní hodnoty slunečního ozáření v Dolním Miletíně za roky 2005 - 2020 jsou zaznamenány v následující tabulce.

Tabulka 21: Měsíční a denní hodnoty slunečního ozáření

Měsíc	Měsíční sluneční ozáření [kWh/m ²]	Denní sluneční ozáření [kWh/m ²]
Leden	34,70	1,12
Únor	52,54	1,81
Březen	107,38	3,46
Duben	170,94	5,70
Květen	158,75	5,12
Červen	148,78	4,96
Červenec	182,35	5,88
Srpen	156,45	5,05
Září	116,34	3,88
Říjen	58,77	1,90
Listopad	30,77	1,03
Prosinec	23,05	0,74
Celkem za rok	1240,82	

⁷⁴ JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission [online, cit. 2022-04-01]. Dostupné z: JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission (europa.eu).

Při známé denní potřebě akumulované elektrické energie v BÚ a hodnotě denního ozáření je možné spočítat celkovou plochu FV pole potřebného k pokrytí této potřeby. Pro výpočet budu uvažovat průměrné denní ozáření v zimní sezóně. Velikost této plochy lze spočítat pomocí následující rovnice:

$$A_{FV} = \frac{E_{p,den}}{\eta_{FV} \cdot H_{T,den} \cdot \eta_{sys}} \quad [m^2] \quad (27),$$

kde $E_{p,den}$ je denní spotřeba elektrické energie (kWh),

η_{FV} je účinnost FV modulu (-),

$H_{T,den}$ je denní ozáření (kWh · m⁻²),

η_{sys} je celková účinnost systému (-).

Pro dosažení je třeba ještě znát účinnost fotovoltaického modulu a celkovou účinnost systému. Účinnost FV modulu lze nalézt v technickém listu vybraného modulu (viz. kapitola Výběr komponent). Celkovou účinnost systému lze spočítat pomocí následující rovnice:

$$\eta_{sys} = \eta_{MPP} \cdot \eta_{DC} \cdot \eta_{CC} \cdot \eta_{BAT} \cdot \eta_{INV} \cdot \eta_D \quad [-] \quad (28),$$

kde η_{MPP} je účinnost sledovače maximálního výkonu (-),

η_{DC} je účinnost DC kabeláže (-),

η_{CC} je účinnost regulátoru nabíjení (-),

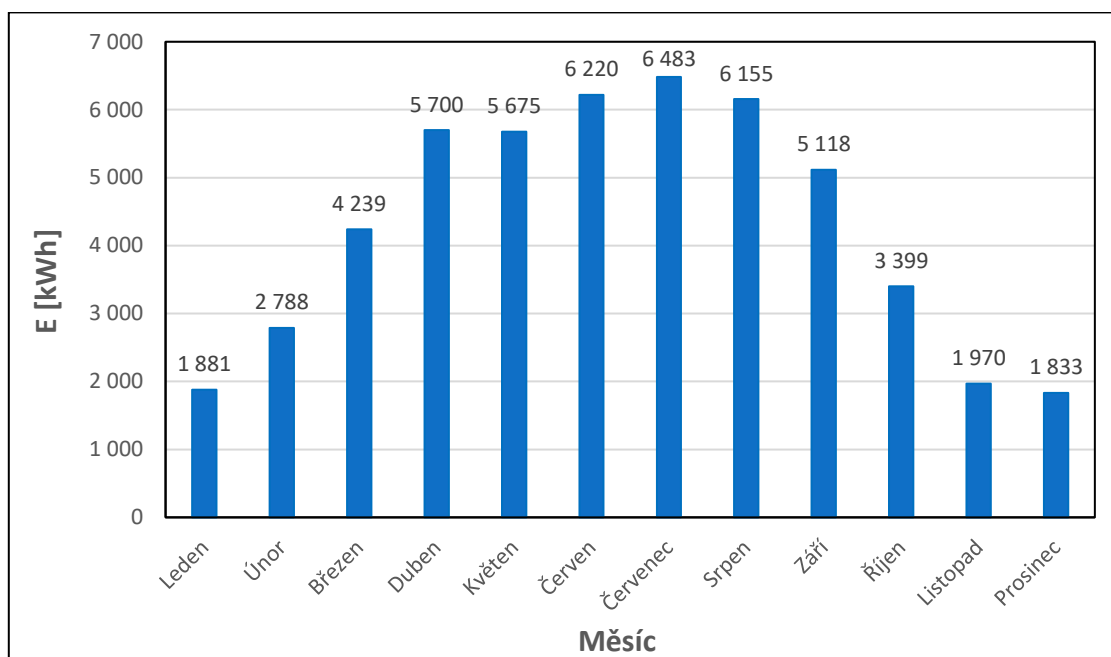
η_{BAT} je účinnost baterií (-),

η_{INV} je účinnost měniče (-),

η_D je účinnost distribuce elektrické energie (-).

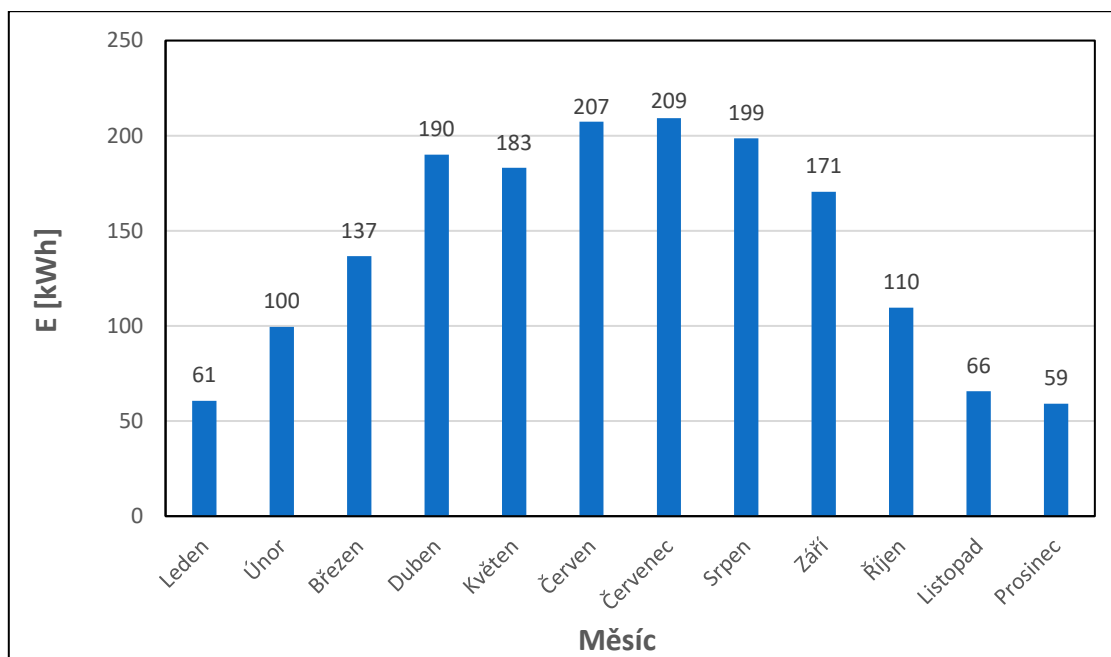
Rovnice 27 a 28 jsou vypočítány v příloze 9. Účinnost sledovače maximálního výkonu, účinnost regulátoru nabíjení, účinnost baterií a účinnost měniče byly vybrány z technických listů daných produktů. Ostatní účinnosti byly zvoleny jako standartní hodnoty příslušných produktů.

V této situaci, kdy je známá plocha FV pole je možné spočítat počet FV modulů a celkový špičkový instalovaný výkon elektrárny. Oba výpočty jsou uvedeny v příloze 10. Na následujícím obrázku je zobrazen graf měsíční výroby elektrické energie FV elektrárnou.



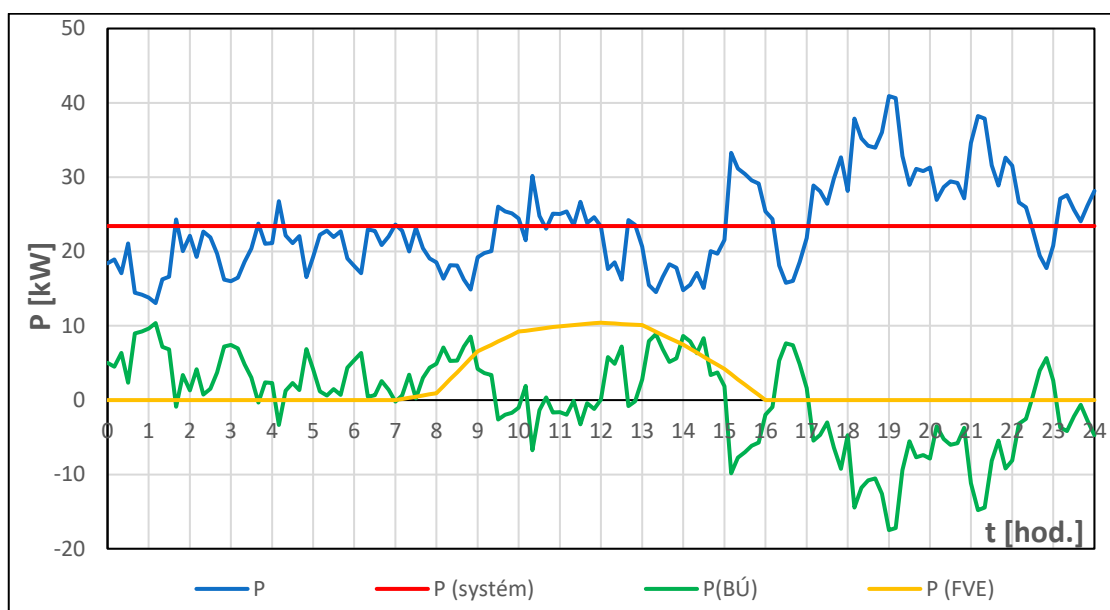
Obrázek 60: Měsíční výroba elektrické energie FV elektrárny

Z obrázku 60 je vidět skutečnost, že FV elektrárna generuje daleko více elektrické energie v letní sezóně než v sezóně zimní. Nejméně elektrické energie vyrobí FVE v prosinci. Naopak nejvíce elektrické energie je vyrobeno v červenci. V tomto návrhu mě ale nejvíce zajímá, kolik kWh elektrické energie vygeneruje FV elektrárna denně a zda je toto množství dostatečné k nabití BÚ (hlavně v zimní sezóně). Průměrné denní množství elektrické energie generované FV elektrárnou v jednotlivých měsících je na následujícím obrázku.

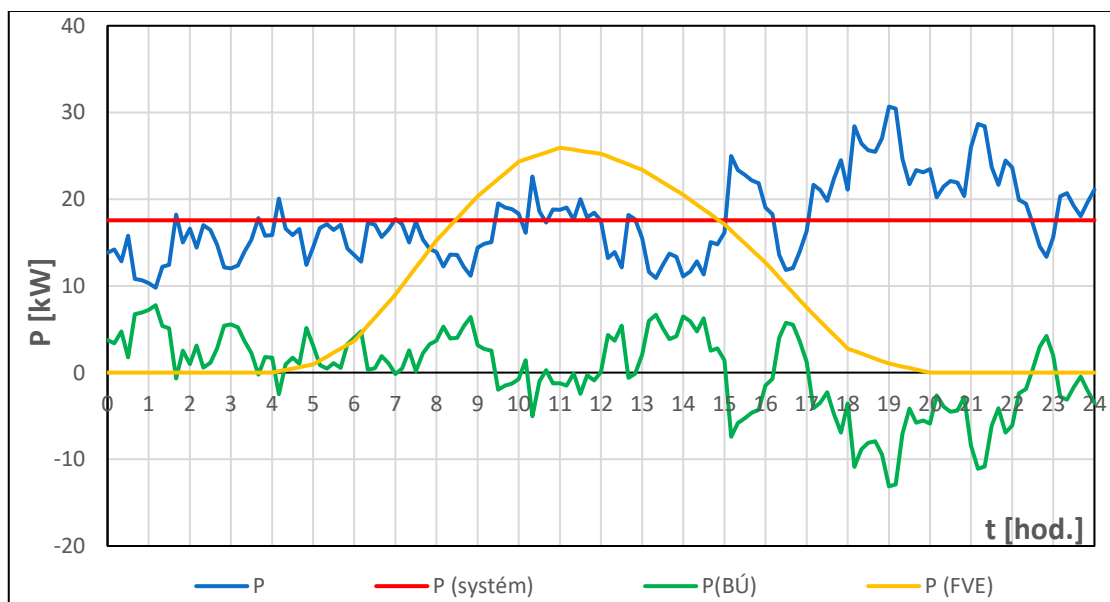


Obrázek 61: Denní výroba elektrické energie FV elektrárny v průběhu roku

Pro představu si lze graf denní výroby elektrické energie FV elektrárnou zobrazit v grafu spotřeby. Na následujících dvou obrázcích jsou znázorněny vždy v jednom grafu současně průběh odebíraného výkonu z distribuční sítě bez BÚ (P), s BÚ (P (systém)), průběh nabíjení/vybíjení BÚ (P (BÚ)) a průběh výkonu generovaného FVE (P (FVE)) v jeden den patřící do zimní a letní sezóny.



Obrázek 62: Průběh výroby FVE a spotřeby v zimní sezóně (v prosinci)



Obrázek 63: Průběh výroby FVE a spotřeby v letní sezóně (v červenci)

Z obrázků 62 a 63 plyne, že FVE generuje elektrickou energii vždy minimálně od 8:00 do 15:00 (v letní sezóně i déle). Odběr energie z BÚ probíhá především od 15:00 dále. To znamená že vyrobená energie FV elektrárnou nebude v BÚ příliš dlouho skladovaná.

To je dobrá zpráva z pohledu samovybíjení. Poslední dva obrázky demonstrují skutečnost, že v zimních měsících nelze od FV elektrárny očekávat nějaké převratné množství vyrobené energie. Nicméně z obrázku 61 je vidět, že FV systém dokáže i v zimní sezóně v období od října do dubna vyrobit potřebnou energii pro BÚ pro omezení odběrových špiček. Tato potřebná hodnota energie je 57 kWh v zimní sezóně. Z obrázku 63 je vidět, že FVE dokáže tuto energii vyrobit po celý rok. V letních měsících je situace jiná. Potřebná hodnota energie naakumulované energie v BÚ je rovna 42,75 kWh. Průběh výroby FVE v letní sezóně je znázorněn na obrázku 65.

5.5.3. Výběr jednotlivých komponent

FV panely jsem zvolil monokrystalické typu Trina o špičkovém výkonu 450 Wp. Z přílohy 3 vychází celkový počet FV modulů na hodnotu 90. Nicméně jak jsem již zmínil dříve je lepší systém spíše naddimenzovat. Systém byl naddimenzován na špičkový výkon 45 kWp. Tento špičkový výkon odpovídá stům kusů FV panelů vybraného typu. Vybraný FV modul je zobrazen na následujícím obrázku. Základní technické parametry FV modulu jsou zobrazeny v tabulce 22.



Obrázek 64: FV modul Trina 450 Wp ⁷⁵

⁷⁵ IFTECH. *Solární panel Trina 450Wp MONO stříbrný rám* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Solární panel Trina 450Wp MONO stříbrný rám - ifTECH s.r.o.

Tabulka 22: Technické parametry modulu ⁷⁶

Solární panel Trina 450 Wp	
Účinnost [%]	20,6
Maximální výkon [W]	450
Napětí naprázdno [V]	49,6
Proud nakrátko [A]	11,53
Provozní teplota [°C]	-40 ~ 85
Napětí v bodě maxima [V]	41
Proud v bodě maxima [A]	10,98

Aby bylo možné FV moduly umístit, jsou potřeba nosné konstrukce. Jelikož se předpokládá, že FVE bude postavena ve volném prostoru nikoli na střešní krytině, jak bývá v dnešní době zvykem, tak je potřeba, aby nosná konstrukce byla vybavena kotevním systémem pro upevnění nosné konstrukce v zemi. Zvolená nosná konstrukce pojme kapacitu šestnácti FV modulů, tudíž bude potřeba 7 takovýchto konstrukcí. Na následujícím obrázku je zobrazena vybraná nosná konstrukce.

Obrázek 65: Nosná konstrukce FV modulů ⁷⁷

Pro propojení jednotlivých modulů je zapotřebí kabel o vhodném průřezu a propojovací konektory. Pro zvolený typ FV modulů je zapotřebí kabel o průřezu 4 mm² a propojovací konektory MC4. Tyto komponenty jsou na následujících obrázcích.

⁷⁶ Tamtéž.

⁷⁷ FVE-MP. *Pozemní nakloněná konstrukce pro 14 panelů, přírodní elox, 25°* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: *Pozemní nakloněná konstrukce pro 14 panelů, přírodní elox, 25°* | FVE-MP.



Obrázek 66: Konektory MC4 ⁷⁸



Obrázek 67: Solární kabel ⁷⁹

Poslední komponent, který je třeba vybrat, je FV střídač. Jelikož navrhovaný systém obsahuje bateriové úložiště, tak je třeba zvolit střídač hybridního typu. Z výsledků simulace je vidět skutečnost, že maximální výkon generovaný FV elektrárnou je 26 kW. Proto je třeba zvolit střídač o takovém výkonu, který dokáže zmíněný výkon 26 kW dodat do obce. Zvolil jsem hybridní střídač WATTSONIC-30KTL-HT, který je zobrazen na následujícím obrázku. V tabulce 23 jsou zobrazeny základní technické parametry střídače. Tento střídač byl zvolen jednak z důvodu kompatibility s bateriovým úložištěm, a jednak z důvodu, že disponuje asymetrickou dodávkou výkonu. To znamená, že nedodává do všech fází stejné množství výkonu, ale zásobuje výkonem každou fázi jednotlivě podle zatížení.

⁷⁸ FVE-MP. *Solární konektor MC4 – 30 – pár, 30 A* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Solární konektor MC4 - 30 - pár, 30 A | FVE-MP.

⁷⁹ FVE-MP. *Solární kabel MGWIRES – 4 mm², černý* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Solární kabel MGWIRES - 4 mm², černý | FVE-MP.

Obrázek 68: FV střídač WATTSONIC-30KTL-HT⁸⁰Tabulka 23: Technické parametry střídače⁸¹

Solární měnič WATTSONIC-30KTL-HT	
Účinnost [%]	98,7
Maximální vstupní napětí [V]	1 100
Maximální vstupní proud na MPPT [A]	26
Počet vstupů [-]	4
Počet MPPT trackerů [-]	2
Jmenovité výstupní napětí [V]	230
Jmenovitý výstupní proud [A]	43,3
Provozní teplota [°C]	-25 ~ 60
Rozsah účiníku [kapacitní - induktivní]	0,8 - 0,8

Nakonec je třeba bateriové úložiště s FV střídačem uzavřít do vhodného kiosku (kontejneru), aby bylo chráněno před vnějšími vlivy prostředí. Kiosek musí být vybaven elektroinstalací a ventilační jednotkou pro aktivní chlazení bateriového úložiště. Dále by v kiosku byla umístěna meteostanice propojená s FV střídačem. Pokud by mělo být následující den zataženo, tak by meteostanice dala povel FV střídači, který by počítal s tím, že nebude zásobován energií z FVE a od půlnoci by začal nabíjet BÚ z DS, tak aby průběh celkového odebíraného výkonu obce vypadal podle obrázku 55.

⁸⁰ IFTECH. *Třířázový hybridní měnič WATTSONIC 30kW,wifi,smart* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Třířázový hybridní měnič WATTSONIC 30kW,wifi,smart - ifTECH s.r.o.

⁸¹ IFTECH. *Třířázový hybridní měnič WATTSONIC 30kW,wifi,smart* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Třířázový hybridní měnič WATTSONIC 30kW,wifi,smart - ifTECH s.r.o.

5.6. Simulace chodu navrhovaného systému

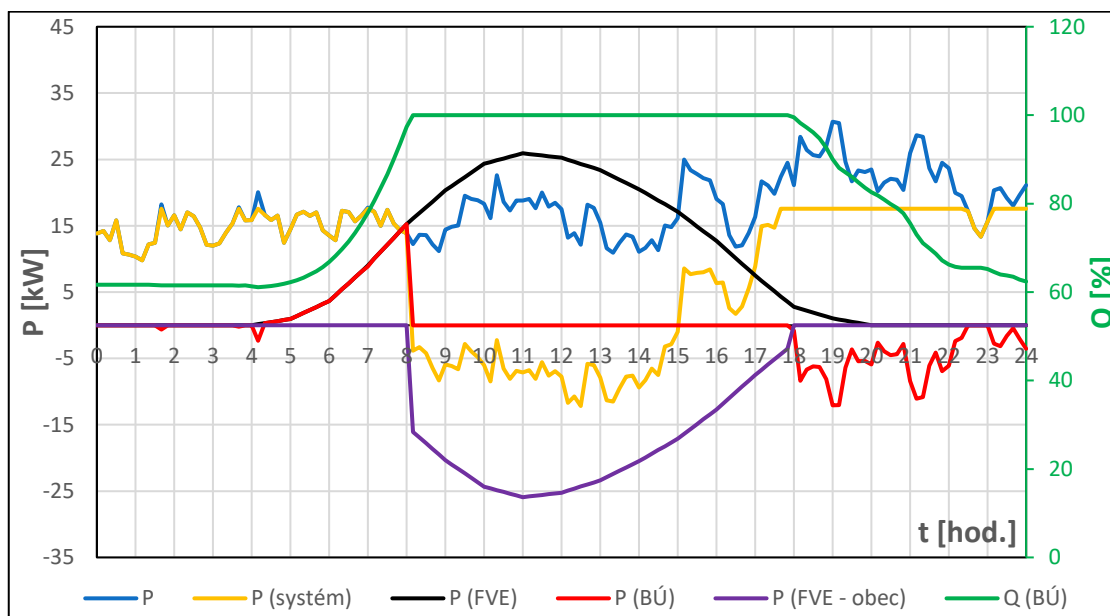
V této kapitole budou analyzovány výsledky simulace navrženého systému. Výsledky budou zobrazeny v podobě jednoho průměrného dne v každém měsíci v průběhu celého roku v grafické podobě. V grafu bude vždy zobrazen průběh původního odebíraného výkonu obce z DS (P), průběh odebíraného výkonu obce z DS s navrženým systémem (P (systém)), průběh výkonu generovaného FVE (P (FVE)), průběh nabíjení/vybíjení BÚ (P (BÚ)), stav kapacity bateriového úložiště (Q (BÚ)) a průběh výkonu generovaného FVE, který je v případě plného nabití BÚ využit k pokrytí (snížení) aktuální spotřeby elektrické energie obce (P (FVE - obec)).

V kapitole 5.3 byl určen celodenní konstantní odebíraný výkon obce na hodnotu 23,42 kW (v zimní sezóně). Pokud byla aktuální spotřeba nižší než tato hodnota, tak se BÚ nabíjelo a obráceně. Jelikož zde je BÚ nabíjeno z fotovoltaické elektrárny, tak není třeba, aby se BÚ nabíjelo v případě, kdy je aktuální spotřeba obce nižší než hodnota 23,42 kW (v zimní sezóně). BÚ bude reagovat pouze na situace, kdy je aktuální spotřeba vyšší než hodnota 23,42 kW (v zimní sezóně) a omezovat tak výkonové odběrové špičky bez potřeby samonabíjení z distribuční soustavy.

V zimních měsících vyrábí FVE maximálně do čtvrté hodiny odpolední. Největší spotřeba obce je od 15:00 do 24:00. Po tuto dobu již FVE nevyrábí, tudíž musí být většina výkonu nad hodnotou 23,42 (v zimní sezóně) odebrána z BÚ. Hodnota této energie je 52 kWh (v zimní sezóně). Pokud teda bude BÚ plně nabito z FVE a v těchto hodinách dodá obci energii o velikosti zmíněných 52 kWh tak na konci dne a začátku nového dne bude disponovat naakumulovanou energií o velikosti 20,96 kWh. V měsících, kdy FVE vyrábí i po 16. či dokonce po 17. hodině atd., tak je BÚ po tuto stále dobíjeno a velikost naakumulované energie na začátku nového dne je stanovena na základě znalostí o velikosti naakumulované energie na konci dne předcházejícího.

V následujících podkapitole bude zobrazen a detailně popsán výsledek simulace měsíce července. Tento měsíc jsem zvolil z toho důvodu, že během něj nastanou všechny situace, které mohou v systému nastat. Zbylé simulace jsou k nahlédnutí v přílohách 11 – 21: Simulace chodu navrhovaného systému v lednu - prosinci.

5.6.1. Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v červenci

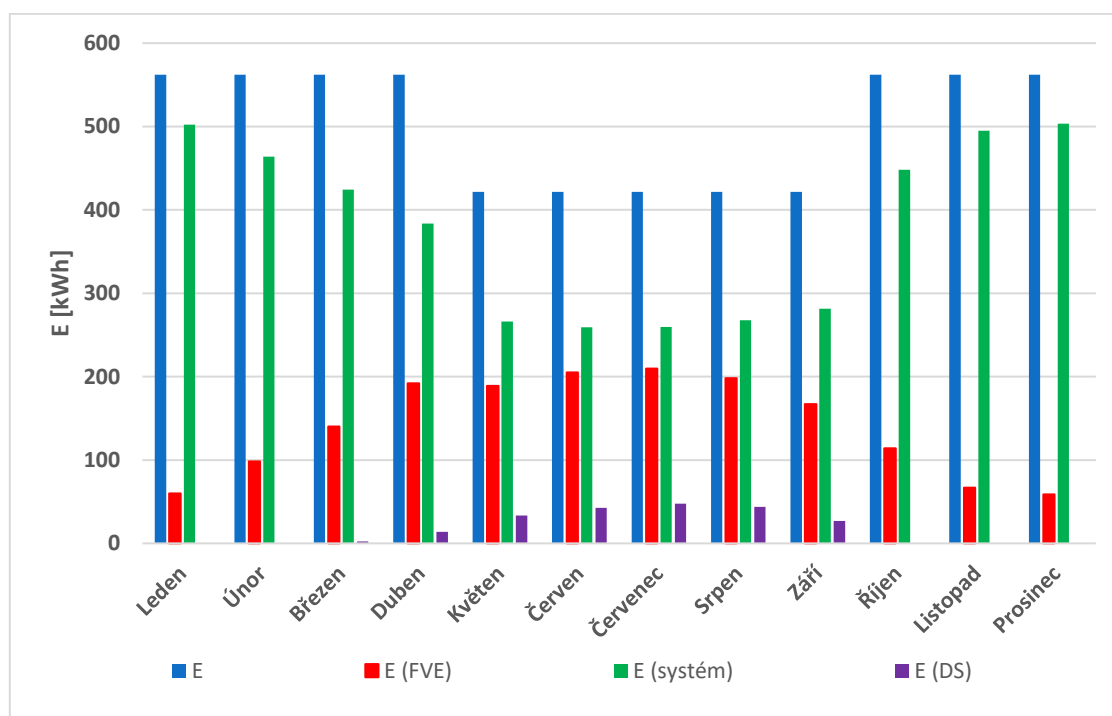


Obrázek 69: Simulace chodu navrhovaného systému v červenci

Modrá křivka znázorňuje původní odběr obce. Odběr elektrické energie z DS po instalaci systému znázorňuje žlutá křivka. Černá křivka symbolizuje výkon generovaný FV elektrárnou. Od 0:00 do 4:00 FVE negeneruje elektrickou energii a odběrové špičky, které jsou v letní sezóně dány hodnotou vyšší než 17,565 kW jsou omezeny energií z BÚ, která je zde naakumulována z minulého dne. Od 4:00 do 20:00 dopadá na FV elektrárnu nějaké sluneční ozáření a elektrárna generuje výkon. Tento výkon je v první řadě použit k nabití BÚ na plnou kapacitu, aby mohl být využit v pozdějších hodinách. V okamžiku, kdy je kapacita BÚ nabitá na 100 % (zelená křivka s vlastní zelenou osou), tak FVE začne generovaný výkon posílat do DS přes střídač (od 8:00 do 18:00 - fialová křivka). Tato energie je v první řadě určena ke spotřebě obce. V červenci je ovšem energie generovaná FV systémem tak velká, že v čase cca od 8:00 do 15:00 dokáže pokrýt celou spotřebu obce, a jelikož je BÚ plně nabit, tak je přebytečná energie poslána do DS. Výkon, který obec nezvládne spotřebovat je v grafu znázorněn částí žluté křivky, která se nachází v záporné části výkonové osy. Zhruba od 18:00 již elektrárna nemá dostatečný výkon pro omezení odběrových výkonových špiček, a tak odpovědnost za tuto práci přebírá bateriové úložiště (červená křivka). BÚ doplňuje omezený odebíraný výkon z DS a tím se vybíjí.

5.6.2. Spotřeba elektrické energie obce Dolní Miletín

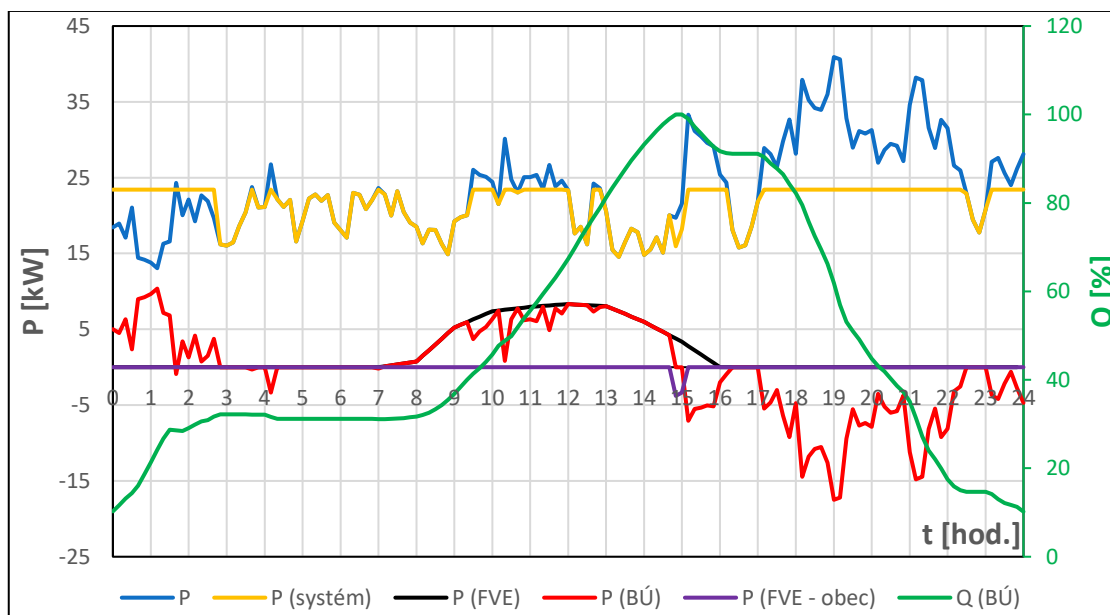
Na obrázku 70 je zobrazena spotřeba elektrické energie obce bez navrhovaného systému (E), spotřeba elektrické energie obce s navrženým systémem (E (systém)), energie generovaná FVE (E (FVE)) a přetok elektrické energie generované FVE, kterou nelze využít pro pokrytí aktuální spotřeby elektrické energie obce při plném nabití bateriového úložiště E (DS). Tyto hodnoty energie představují vždy jeden průměrný den v daném měsíci. Z tohoto obrázku je vidět, že obec dosáhla díky systému daleko nižšího odběru elektrické energie z distribuční soustavy. Přetoky elektrické energie ze systému do DS jsou sice nežádoucí z důvodu zatěžování vedení DS, ale z obrázku je patrné, že tyto přetoky nejsou příliš vysoké. Navíc vybraný střídač disponuje funkcí omezení přetoků elektrické energií do DS.



Obrázek 70: Toky energií

5.6.3. Simulace chodu navrhovaného systému ve třicátém roce života

Systém během doby svého používání stárne. Životnost systému byla určena na dobu 30 let (viz. kapitola 6.3). Stárnutí prvků systému se týká hlavně FV modulů a akumulátorů. U FV modulů budu uvažovat 80% výkon z výkonu původního. U akumulátorů budu uvažovat 80% kapacitu z původní kapacity BÚ. Na následujícím obrázku je zobrazena simulace chodu systému ve třicátém roce života v prosinci. Tento měsíc jsem zvolil účelně, kvůli nejnižší produkci elektrické energie FV elektrárnou v roce.



Obrázek 71: Simulace chodu navrhovaného systému ve třicátém roce života v prosinci

Součástí systému bude elektroměr, který bude měřit výrobu elektrické energie FV elektrárnou. Pokud FVE nedokáže vyrobit potřebnou elektrickou energii 57 kWh, tak si energii danou rozdílem 57 kWh a energií generovanou FVE bude muset bateriové úložiště odebrat z distribuční sítě. Na obrázku 71 je vidět, že FVE již nedokáže vyrobit potřebnou elektrickou energii a BÚ si tak musí na samém počátku dne (00:00 – 02:50) vzít potřebnou energii z DS. Stále ovšem musí být splněna podmínka, že nejvyšší odběrový výkon z DS může být maximálně 23,42 kW.

6. Technicko-ekonomické zhodnocení

Jako poslední krok před realizací projektu je třeba provést jeho technicko-ekonomické zhodnocení. Toto zhodnocení se provádí za účelem zjištění, zda se investice do daného projektu vyplatí či ne. Ovšem při konzultaci s technikem ze společnosti EG.D, a.s. jsem zjistil, že od bateriového úložiště této velikosti nelze očekávat ekonomické přínosy. Nicméně i když systém nebude investorovi (distributorovi) přinášet po dobu své životnosti ekonomické zisky, tak se z pohledu distributora v tomto případě jedná o investici nutnou, protože vede ke zvýšení kvality elektrické energie, která není v daném místě distribuční soustavy optimální. Ovšem možných systémů pro zvýšení kvality elektrické energie v uvažované lokalitě je několik a distributor jednotlivé varianty posuzuje podle kritéria minima investičních výdajů. V současné době distributor EG.D, a.s. používá ke zvýšení kvality elektrické energie linkové kondicionéry (viz. kapitola 6.1).

V této kapitole se teda pokusím provést technicko-ekonomické porovnání současně nasazovaného linkového kondicionéru a mého navrženého systému. Obě tyto varianty jsou z pohledu distributora financovány z důvodu odkladu celkové rekonstrukce distribuční soustavy v dané oblasti. Distribuční síť je v dané lokalitě tvořena venkovními vodiči AlFe, které lze nahradit modernějším kabelovým vedením. Touto rekonstrukcí lze vyřešit problémy s kvalitou elektrické energie v dané lokalitě, a navíc lze díky kabelovému vedení snížit rizika poruchovosti (například pád stromu na venkovní vedení). Investice do celkové rekonstrukce bývá pro distributora nejnákladnější a nejvíce časově náročnou variantou pro zvýšení kvality elektrické energie a distributor ji volí pouze v případech, kdy nejsou přijatelná jiná řešení.

6.1. Linkový kondicionér

Linkový kondicionér, nebo také NN regulátor, se skládá ze sériově zapojených transformátorů, které jsou napájené měničem řízeného pulsně šířkovou modulací. Linkový kondicionér používá výkon z DS pro doplnění efektivní hodnoty fázového napětí na jmenovitou hodnotu (230 V). Tímto efektem je stabilizováno napětí v DS a redukován flikr efekt.⁸² V současné době distributor EG.D, a.s. používá Smart linkové kondicionéry, které se od klasických linkových kondicionérů liší tím, že obsahují analyzátory kvality elektrické energie a umožňují vzdálené vyčítání měřených veličin. Velkou výhodou těchto regulátorů je fakt, že je distributor může pohodlně nainstalovat na vhodný podpěrný bod a nemusí kupovat/pronajímat soukromý pozemek. V následující tabulce jsou zobrazeny základní technické a ekonomické parametry typu nasazovaného distributorem EG.D, a.s.

Tabulka 24: Technicko-ekonomické parametry linkového kondicionéru⁸³

Linkový kondicionér EAFS050-S (SM)	
Průchozí výkon [kVA]	50
Jmenovité napětí [V]	3x230/400
Výkon měniče [kVA]	10
Výstupní proud [A]	72
Kolísání vstupního napětí [%]	-20 % až +15 %
Kolísání výstupního napětí [%]	-2 % až +2 %
Účinnost [%]	95
Životnost [roky]	15
Cena bez DPH [Kč]	650 000

⁸² ELCOM. *Využití technologie kondicionérů pro energetiku* [online, cit. 2022-05-11]. Dostupné z: Linkový kondicionér | ELCOM.

⁸³ ELCOM. *Využití technologie kondicionérů pro energetiku* [online, cit. 2022-05-11]. Dostupné z: Linkový kondicionér | ELCOM.

TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Na následujícím obrázku je zobrazen výše zmíněný typ linkového kondicionéru od firmy ELCOM.



Obrázek 72: Linkový kondicionér EAFS050-S (SM) ⁸⁴

⁸⁴ ELCOM. *Využití technologie kondicionérů pro energetiku* [online, cit. 2022-05-11]. Dostupné z: Linkový kondicionér | ELCOM.

6.2. Navrhovaný systém

Systém tvořený bateriovým úložištěm a fotovoltaickou elektrárnou byl navržen za účelem stabilního odběru obce Dolní Miletín elektrického výkonu z distribuční soustavy. Tento krok by měl podle předpokladu uvedeného v kapitole 5.3.2 vést ke zvýšení kvality elektrické energie v dané lokalitě. Dále je součástí systému střídač, který umí manipulovat s výstupním účinníkem od 0,8 kapacitní do 0,8 induktivní. Díky této funkci by měl střídač umět zvyšovat/snižovat napětí a pomáhat tak ke zvyšování kvality elektrické energie. Dále střídač umí díky čtyřkvadrantní funkci omezovat přetoky jalové energie z dané lokality DS do nadřazené soustavy. K provedení technicko-ekonomického porovnání je zapotřebí co nejpřesněji odhadnout cenu celého systému. Ceny jednotlivých položek jsou znázorněny v následující tabulce.

Tabulka 25: Ceny jednotlivých položek navrhovaného systému

Položka	Kusová cena [Kč bez DPH/kus]	Počet [kus]	Celková cena [Kč bez DPH]
Modul Trina 450 Wp	4 415	100	441 498
Nosná konstrukce	33 147	7	232 029
Konektor MC4	59	101	5 959
Solární kabel 4 mm ²	22	200	4 400
Střídač WATTSONIC-30KTL-HT	159 369	1	159 369
Racková skříň	26 153	1	26 153
Bateriový modul	41 420	19	786 971
Řídící jednotka	49 037	1	49 037
Rozvaděč XS6	4 468	1	4 468
Kontejner (elektroinstalace + ventilátor)	70 000	1	70 000
Meteostanice	4 000	1	4 000
Cena za odkup půdy			30 000
Další výdaje			50 000
Celková investice			1 863 884

6.3. Technicko-ekonomické porovnání navrhovaného systému a linkového kondicionéru

Jelikož ani od jedné varianty nemůže distributor očekávat nějaký ekonomický zisk, tak by pro distributora byla výhodnější varianta ta, která ho v přepočtu na Kč/rok životnosti dané varianty vyjde lépe. Celková cena i životnost linkového kondicionéru je zobrazena v tabulce 24. V tabulce 25 je zobrazena celková odhadovaná cena navrhovaného systému. Dále pro další krok je třeba určit životnost systému, která je dána nejkratší životností prvku obsaženého v systému. V tomto případě je prvek s nejkratší životností FV střídač s životností 15 let. U FV modulů garantuje výrobce 80% výkon výkonu původního po 30 letech. Životnost bateriového úložiště je udávána v cyklech. U zvolených typů akumulátorů je výrobcem garantováno 10 000 cyklů. Pro zjednodušení budu tedy uvažovat životnost akumulátorů 30 let, i když si myslím, že by se mohly sloužit i delší dobu. Životnost obou variant budu tedy uvažovat 30 let s nutnou reinvesticí do FV střídače po 15 letech života (v případě navrhovaného systému) a s nutnou reinvesticí do linkového kondicionéru po 15 letech života. Dále lze na obě varianty čerpat dotaci OP-TAK (Operační program Technologie a aplikace pro konkurenceschopnost) z programu Smart grids I. Dotace je v případě obou variant stejná, a to ve výši 40 % počáteční investice. V následující tabulce jsou zobrazeny výsledné porovnávací výpočty obou variant s/bez dotace.

Tabulka 26: Ekonomické porovnání linkového kondicionéru a navrhovaného systému

Varianta	Linkový kondicionér	Navrhovaný systém
Počáteční cena [Kč]	650 000	1 843 183
Reinvestice [Kč]	650 000	159 369
Životnost [roky]	30	30
Celková cena bez dotace [Kč]	1 300 000	2 002 552
Celková cena s dotací [Kč]	780 000	1 201 531
Cena za rok života bez dotace [Kč/rok]	43 333	66 752
Cena za rok života s dotací [Kč/rok]	26 000	40 051

Z tabulky 26 je patrné, že se distributorovi z hlediska ekonomického vyplatí spíše investice do linkového kondicionéru. Nicméně z hlediska technického nabízí navrhovaný systém širší rozsah využití v podobě omezení přetoků jalové energie do nadřazené soustavy, a tak si distributor musí sám říct, co preferuje více.

7. ZÁVĚR

7.1. Shrnutí obsahu práce

Téma této diplomové práce bylo bateriové úložiště v distribuční soustavě. V první části práce byla zpracována teoretická část popisující typy obnovitelných zdrojů energie a akumulačních technologií. Touto teoretickou částí byly splněny první dva body zadání práce. V praktické části bylo navrženo bateriové úložiště napájené obnovitelným zdrojem energie. Jako nejvhodnější zdroj byla zvolena fotovoltaická elektrárna. Tímto návrhem byl splněn třetí bod zadání. Poslední kapitola praktické části popisuje technicko-ekonomické porovnání současně (distributorem) používané varianty a mnou navrženého systému ke zvýšení kvality elektrické energie v dané lokalitě distribuční soustavy.

7.2. Novost

V práci byl vypracován návrh systému za účelem zvýšení kvality elektrické energie v dané lokalitě distribuční soustavy na hladině NN. Za tímto účelem se bateriové úložiště v distribuční soustavě na území České republiky na hladině NN nepoužívá. Novost této práce tedy spočívá v návrhu řešení na reklamaci elektrické energie, které dosud nebylo distributorem EG.D, a.s. v praxi využito.

7.3. Přínos práce pro autora

V teoretické části jsem si rozšířil znalosti v oblasti obnovitelných zdrojů energie a akumulačních technologií. Obě oblasti jsou dnes poměrně žhavá témata, ve kterých je pro elektrotechnika dobré se orientovat. V praktické části jsem si vyzkoušel vyhodnotit reálná data z kvalimetru, který se používá k měření kvality elektrické energie. Vyzkoušel jsem si návrh nového řešení ke zvýšení kvality elektrické energie uvažované obce. Dále jsem se zúčastnil několik konzultací s hlavním technikem kontroly kvality ve společnosti EG.D, a.s. panem Ing. Martinem Kurfiřtem. Díky těmto konzultacím jsem se dozvěděl spoustu zajímavých a užitečných věcí, které mi pomohly při vypracování této práce.

7.4. Přínos práce pro společnost

Praktická část práce byla psána ve spolupráci se společností EG.D, a.s. Distributor EG.D, a.s. jako řešení stížností na nekvalitu elektrické energie v distribuční soustavě na hladině NN používá linkové kondicionéry. Já jsem v této práci navrhl systém, který by v očích distributora mohl být zajímavou alternativou pro zvýšení kvality elektrické energie v dané lokalitě. V samém závěru práce provedl technicko-ekonomické porovnání mnou navrženého systému a linkového kondicionéru. Provoz linkového kondicionéru vyjde distributora na 43 333 Kč bez dotace (26 000 Kč s dotací). Provoz navrženého systému by vyšel distributora na 66 752 Kč bez dotace (40 051 Kč s dotací). Subjekt poskytující distribuční služby ve veřejném zájmu volí variantu s minimem investičních výdajů. Tímto porovnáním jsem tedy došel k závěru, že po ekonomické stránce se distributorovi vyplatí více investovat do linkových kondicionérů. Nicméně mnou navržený systém disponuje širším rozsahem použití, co se týče technické stránky. Distributor se tedy musí sám rozhodnout, jestli mu záleží pouze na velikosti vstupní investice nebo zda má zájem o širší technické využití stabilizačního prvku.

7.5. Jak s prací nakládat dál?

Praktická část obsahuje návrh systému, který by podle předpokladů měl zvýšit kvalitu elektrické energie. Toto je ovšem pouze předpoklad. Je třeba aby distributor investoval do takového typu systému a ověřil předpokládanou funkci systému. Je nutné podotknout, že v současné době není distributorovi umožněno si vyrábět elektrickou energii, a tak nemá možnost takovýto systém postavit. Nicméně nikde není napsáno, že tento zákaz nebude distributorovi v budoucnu zrušen a v právě tento moment by tato práce mohla distributora inspirovat k zajímavé alternativě k linkovým kondicionérům ke zvýšení kvality elektrické energie v určité lokalitě distribuční soustavy.

8. SEZNAM LITERATURY

- [1] BATTERY UNIVERSITY. *Comparison Table of Secondary Batteries* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries - Battery University.
- [2] BATTERY UNIVERSITY. *How does a Supercapacitor Work?* [online, cit. 2022-02-15]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor.
- [3] BATTERY UNIVERSITY. *Summary Table of Alternate Batteries* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: BU-217: Summary Table of Alternate Batteries - Battery University.
- [4] BECHNÍK, Bronislav. Akumulace tepelné energie - fyzikální principy [online, cit. 2022-02-15]. Dostupné z: Akumulace tepelné energie - fyzikální principy - TZB-info.
- [5] BENDA, Vítězslav. *Přednášky z předmětu Aplikace solárních systémů (BIM13ASS)*. ČVUT FEL v Praze, 2021.
- [6] DRÁPELA, Jan. *Analýza vlivu rychlonabíjecích stanic s akumulací na distribuční soustavu elektrické energie* [online]. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. Dostupné z: F3-BP-2019-Drapela-Jan-Analyza vlivu rychlonabíjecí stanice s akumulací na distribuční soustavu elektrické energie.pdf (cvut.cz).
- [7] ELCOM. *Využití technologie kondicionérů pro energetiku* [online, cit. 2022-05-11]. Dostupné z: Linkový kondicionér | ELCOM.
- [8] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy české republiky za rok 2020* [online, cit. 2022-03-01]. Dostupné z: edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173 (eru.cz).

- [9] ENERGY STORAGE ASSOCIATION. *Compressed Air Energy Storage (CAES)* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Mechanical Electricity Storage Technology | Energy Storage Association.
- [10] ENERGY STORAGE ASSOCIATION. *Flywheel Energy Storage Systems (FESS)* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Mechanical Electricity Storage Technology | Energy Storage Association.
- [11] EN:FORMER. *When wind warms in the winter* [online, cit. 2022-05-15]. Dostupné z: When wind warms in the winter | en:former (en-former.com).
- [12] EUROPEAN ENERGY RESEARCH ALLIANCE. *Superconducting Magnetic Energy Storage* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Microsoft Word - EERA_JPES_SP5_Factsheet_final.docx (eera-energystorage.eu).
- [13] FINSTERLE, Tomáš. *Diagnostika degradace fotovoltaických článků a modulů* [online, cit. 2022-01-22]. Dostupné z: F3-D-2021-Finsterle-Tomas-Disertace Finsterle-1.pdf (cvut.cz).
- [14] FVE-MP. *Pozemní nakloněná konstrukce pro 14 panelů, přírodní elox, 25°* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Pozemní nakloněná konstrukce pro 14 panelů, přírodní elox, 25° | FVE-MP.
- [15] FVE-MP. *Solární kabel MGWIRES – 4 mm², černý* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Solární kabel MGWIRES - 4 mm², černý | FVE-MP.
- [16] FVE-MP. *Solární konektor MC4 – 30 – pár, 30 A* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Solární konektor MC4 - 30 - pár, 30 A | FVE-MP.

SEZNAM LITERATURY

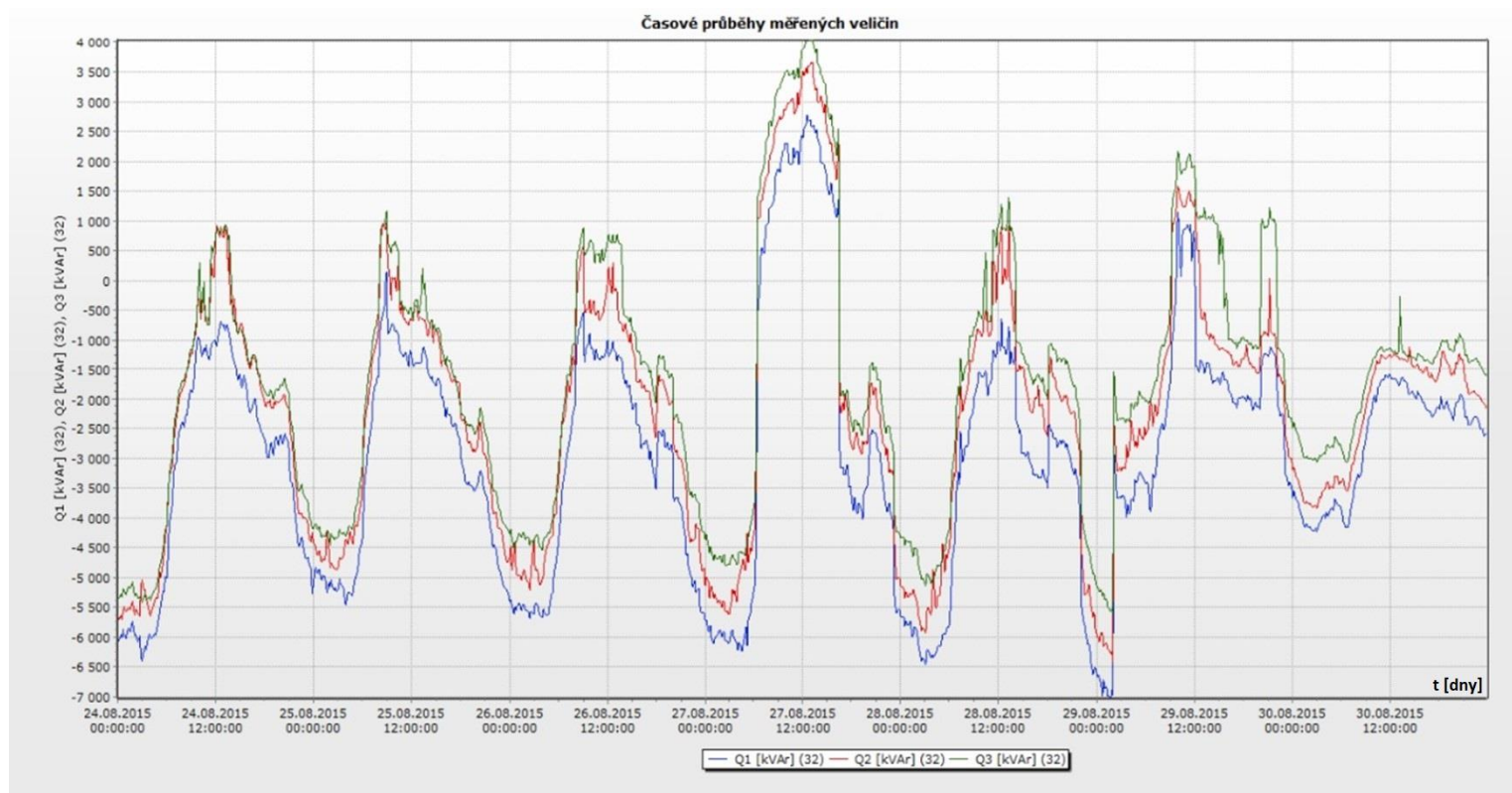
- [17] HOSSAIN E., FARUQUE H. M. R., SUNNY Md. S. H., MOHAMMAD N., NAWAR N. A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Schematic diagram of a compressed air energy storage (CAES) Plant. Air... | Download Scientific Diagram (researchgate.net).
- [18] HRZINA, Pavel. *Přednášky z předmětu Aplikace elektrochemických zdrojů (BIM13AEZ)*. FEL ČVUT v Praze, 2019.
- [19] IFTECH. *Bateriový modul WATTSONIC 3,84 kWh* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Bateriový modul WATTSONIC 3,84kWh - ifTECH s.r.o.
- [20] IFTECH. *Komerční BMS WATTSONIC* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Komerční BMS WATTSONIC, 900V - ifTECH s.r.o.
- [21] IFTECH. *Racková skříň WATTSONIC* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Racková skříň WATTSONIC - ifTECH s.r.o.
- [22] IFTECH. *Solární panel Trina 450Wp MONO stříbrný rám* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Solární panel Trina 450Wp MONO stříbrný rám - ifTECH s.r.o.
- [23] IFTECH. *Třífázový hybridní měnič WATTSONIC 30kW,wifi,smart* [online, cit. 2022-04-19]. Dostupné z: Třífázový hybridní měnič WATTSONIC 30kW,wifi,smart - ifTECH s.r.o.
- [24] ISOFENERGY. *Fotovoltaika v podmínkách České republiky* [online, cit. 2022-01-22]. Dostupné z: Fotovoltaika - sluneční záření v České republice (isofenenergy.cz).
- [25] *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission* [online, cit. 2022-04-01]. Dostupné z: JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission (europa.eu).

- [26] KLOUBEC M., PANÁČ M., JURÍK M. *Skladování elektrické energie v bateriových stanicích a její využití v elektrizační soustavě – trendy a zkušenosti* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Sborník ČK CIRED 2002 (azureedge.net).
- [27] KURFIŘT M., JURÍK M. *Hodnocení zkušebního provozu bateriového úložiště v Mydlovarech* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Sborník ČK CIRED 2002 (azureedge.net).
- [28] LI X., WEI B. *Supercapacitors based on nanostructured carbon* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Supercapacitors based on nanostructured carbon - ScienceDirect.
- [29] LIU X., LI K. *Energy storage devices in electrified railway systems: A review* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Schematic diagram of an SMES | Download Scientific Diagram (researchgate.net).
- [30] MAHLIA T.M.I., SAKTISAHDAN T.J., JANNIFAR A., HASAN M.H., MATSEELAR H.S.C. *A review of available methods and development on energy storage; Technology update* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: CAES plant schematic diagram [27]. | Download Scientific Diagram (researchgate.net).
- [31] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online, cit. 2022-01-22]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2. Dostupné z: Microsoft Word - CVUT-2-OZE.doc (mpo-efekt.cz).
- [32] Matuška, Tomáš. *Výpočet FV systému s akumulací elektrické energie* [online]. Dostupné z: C5_FVsys_bat.pdf (cvut.cz).
- [33] PUCHNAR, Jiří. *Ani vodní elektrárny nejsou bezrizikovým energetickým zdrojem* [online, cit. 2022-02-25]. Dostupné z: Ani vodní elektrárny nejsou bezrizikovým energetickým zdrojem (oenergetice.cz).

SEZNAM LITERATURY

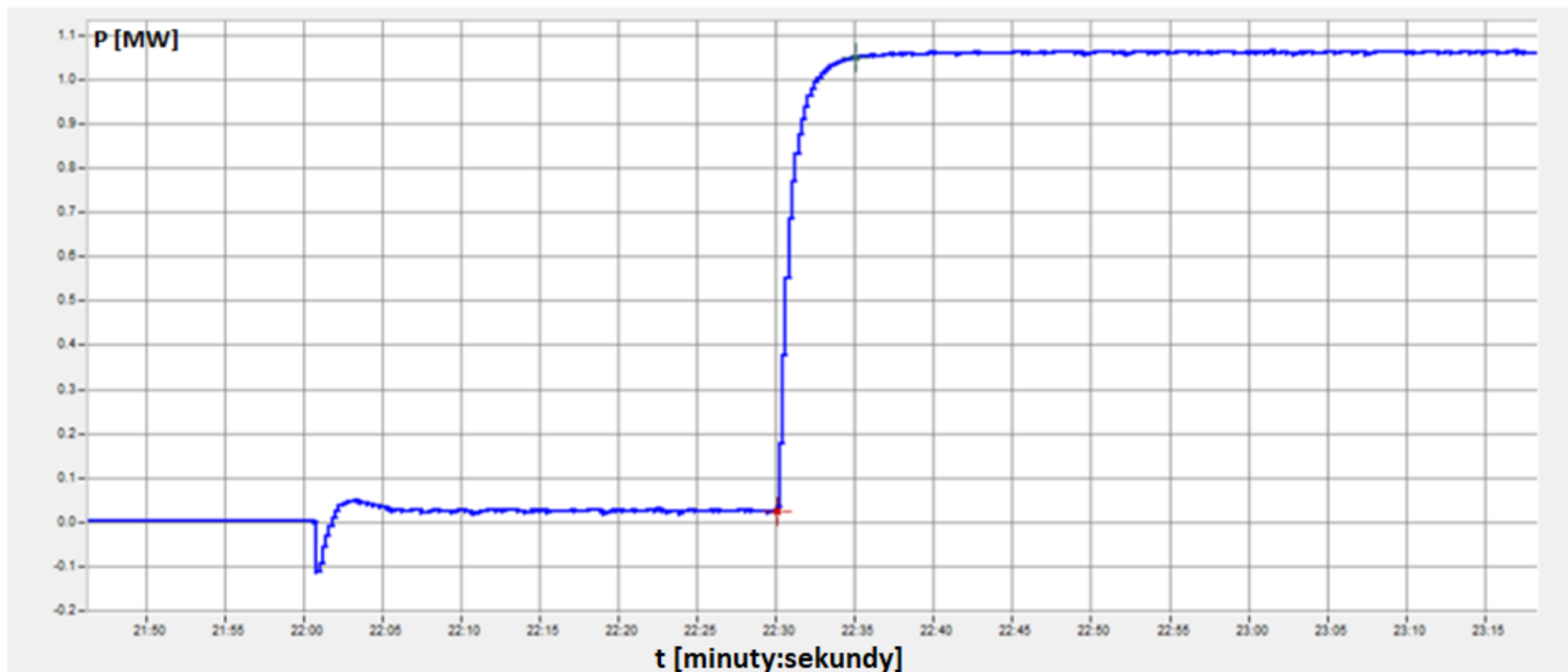
- [34] SCHOLTZOVÁ, Jiřina. *Nové baterie bez těžkých kovů* [online, cit. 2022-02-17]. Dostupné z: Jiřina Scholtzová: Nové baterie bez těžkých kovů (aldebaran.cz).
- [35] VOBOŘIL, David. *Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR* [online, cit. 2022-02-28]. Dostupné z: Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR (oenergetice.cz).
- [36] VOBOŘIL, David. *Geotermální energie* [online, cit. 2022-02-28]. Dostupné z: Geotermální energie (oenergetice.cz).
- [37] VOBOŘIL, David. *Power to Gas – budoucnost akumulace elektřiny?* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie (oenergetice.cz).
- [38] VOBOŘIL, David. *Vodní elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR* [online, cit. 2022-02-25]. Dostupné z: Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR (oenergetice.cz).
- [39] WAGNER, Vladimír. *Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie (oenergetice.cz).

Příloha 1: Průběh jalového výkonu v rozvodně Dasný ⁸⁵



⁸⁵ KLOUBEC M., PANÁČ M., JURÍK M. *Skladování elektrické energie v bateriových stanicích a její využití v elektrizační soustavě – trendy a zkušenosti* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Sborník ČK CIRED 2002 (azureedge.net).

Příloha 2: Doba najeť bateriového úložiště z 0 W na plný výkon ⁸⁶

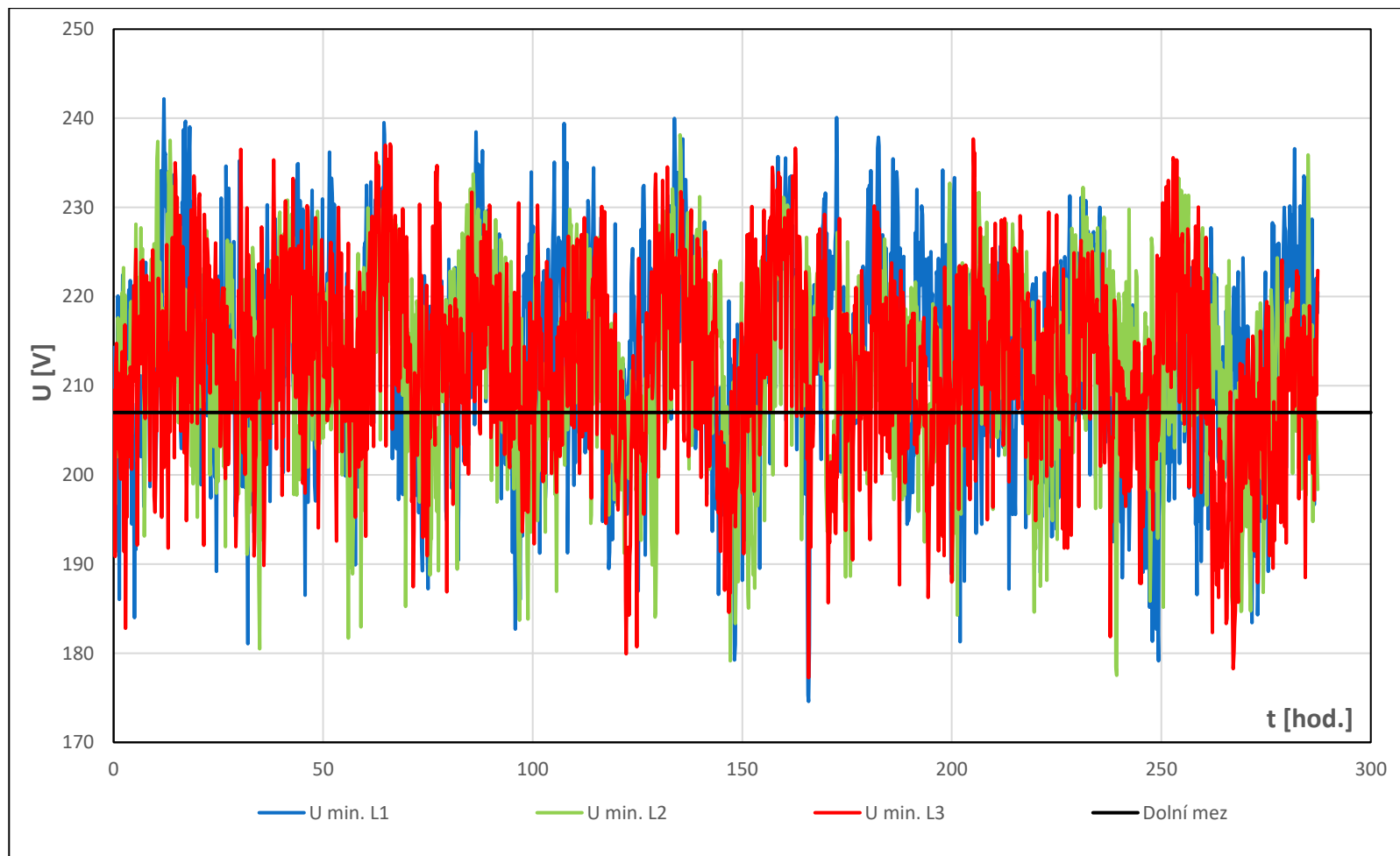


⁸⁶ KURFIŘT M., JURÍK M. *Hodnocení zkušebního provozu bateriového úložiště v Mydlovarech* [online, cit. 2022-04-14]. Dostupné z: Sborník ČK CIRED 2002 (azureedge.net).

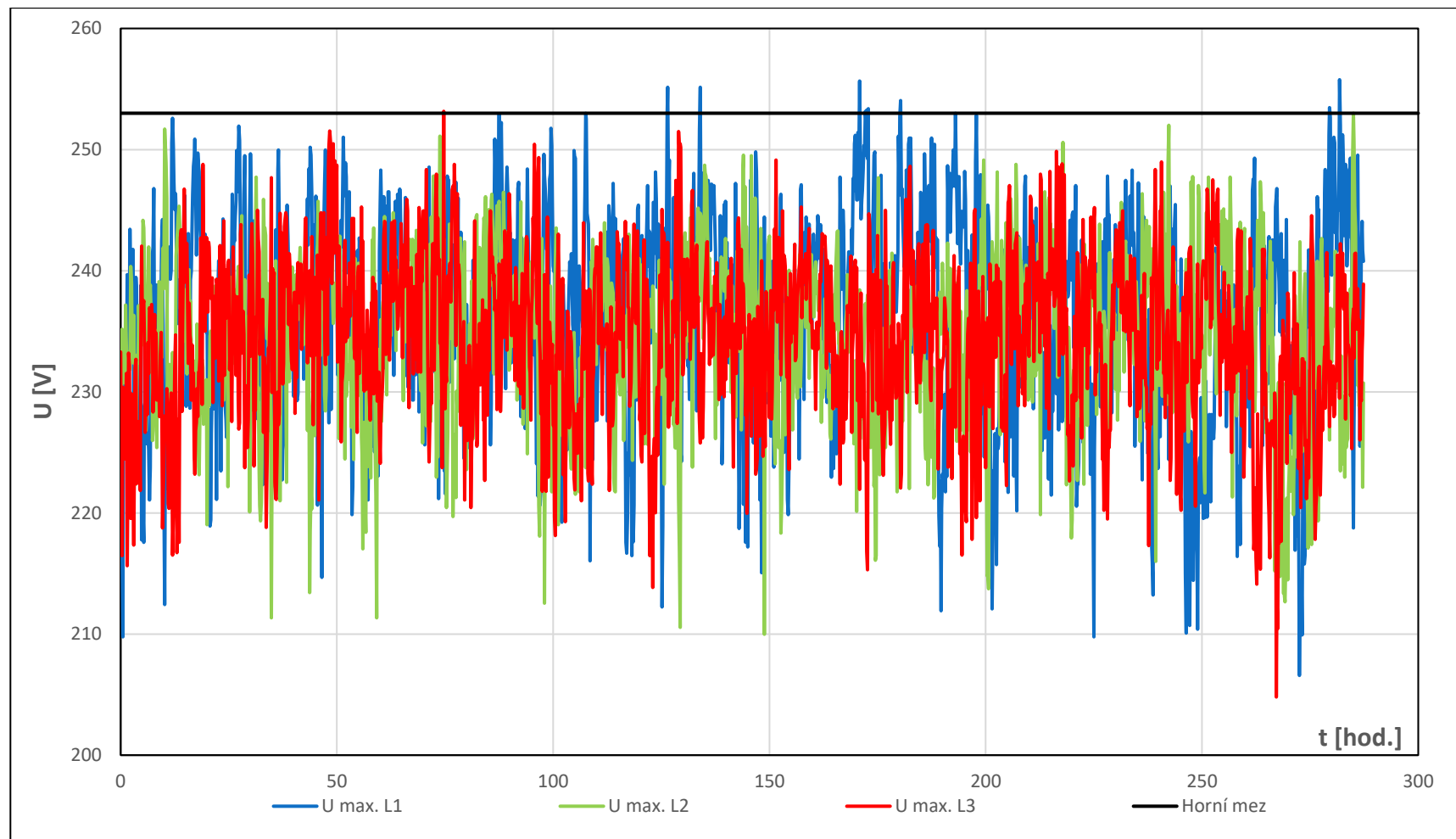
Príloha 3: Vyhodnocení kvality elektrické energie v odběrném místě

Velikona	Označení	Jednotka	Interval měření	Stat. úroveň	Int. hodnocení	Norm. mez	Hodnota (Hod. %)	Spĺiuje
Napětí	U	[V]	10 min	min. 95%	1 týden	-10%	207,100 (90,04%)	✓
				max. 95%	1 týden	10%	243,060 (105,68%)	✓
				min. 100%	1 týden	-15%	189,440 (82,37%)	✗
				max. 100%	1 týden	10%	247,170 (107,47%)	✓
Napětí (dlouhá vedení)	U	[V]	10 min	min. 100%	1 týden	-20%	189,440 (82,37%)	✓
				max. 100%	1 týden	11%	247,170 (107,47%)	✓
Krátkodobý flír	Pst	-	10 min	max. 95%	1 týden	1	2,115	✗
Dlouhodobý flír	Plt	-	2 hod	max. 95%	1 týden	1	1,866	✗
Napětiová nesymetrie	Uu	%	10 min	max. 95%	1 týden	2%	2,100	✗
Harmonické zkreslení	THDu	%	10 min	max. 95%	1 týden	8%	7,110	✓
Harmonická napětí	Uh2	%	10 min	max. 95%	1 týden	2%	0,100	✓
	Uh3	%	10 min	max. 95%	1 týden	5%	5,970	✗
	Uh4	%	10 min	max. 95%	1 týden	1%	0,050	✓
	Uh5	%	10 min	max. 95%	1 týden	6%	3,180	✓
	Uh6	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,050	✓
	Uh7	%	10 min	max. 95%	1 týden	5%	1,960	✓
	Uh8	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,050	✓
	Uh9	%	10 min	max. 95%	1 týden	1,5%	1,220	✓
	Uh10	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,050	✓
	Uh11	%	10 min	max. 95%	1 týden	3,5%	1,320	✓
	Uh12	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,050	✓
	Uh13	%	10 min	max. 95%	1 týden	3%	0,840	✓
	Uh14	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,050	✓
	Uh15	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,600	✗
	Uh16	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,000	✓
	Uh17	%	10 min	max. 95%	1 týden	2%	0,500	✓
	Uh18	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,000	✓
	Uh19	%	10 min	max. 95%	1 týden	1,5%	0,310	✓
	Uh20	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,000	✓
	Uh21	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,210	✓
	Uh22	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,000	✓
	Uh23	%	10 min	max. 95%	1 týden	1,5%	0,190	✓
	Uh24	%	10 min	max. 95%	1 týden	0,5%	0,000	✓
	Uh25	%	10 min	max. 95%	1 týden	1,5%	0,150	✓

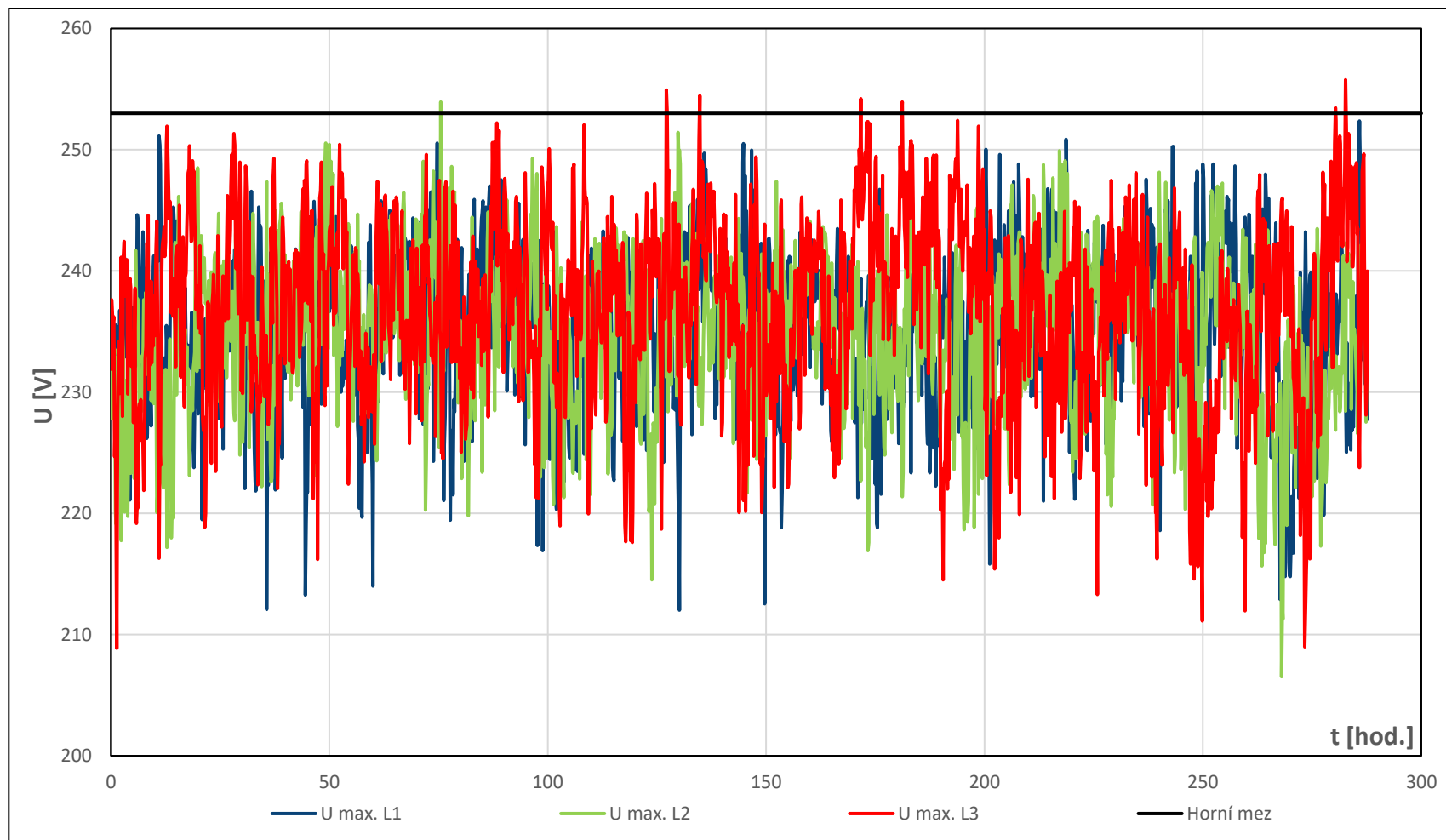
Příloha 4: Detail průběhu minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 4



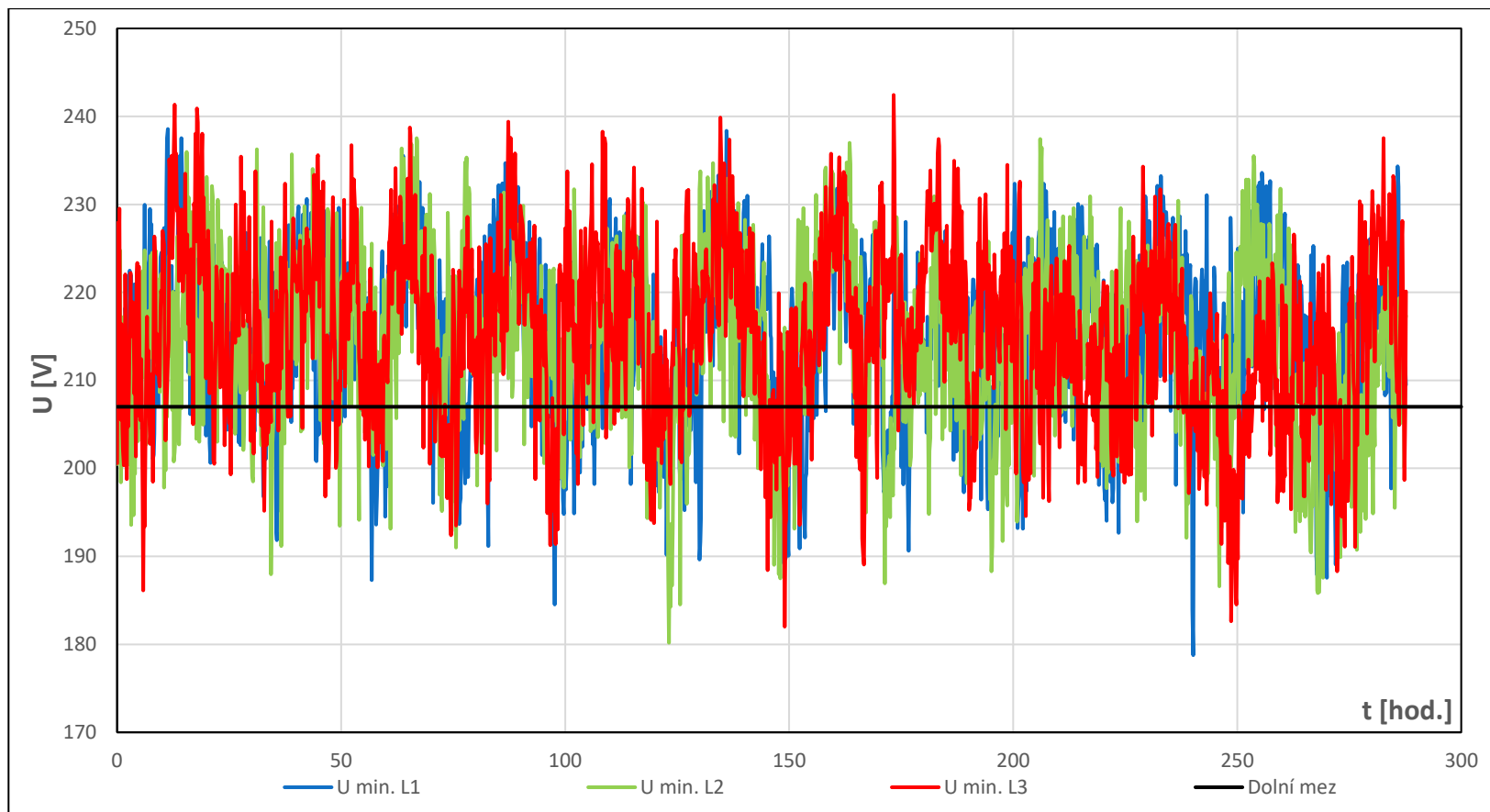
Příloha 5: Detail průběhu maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 4



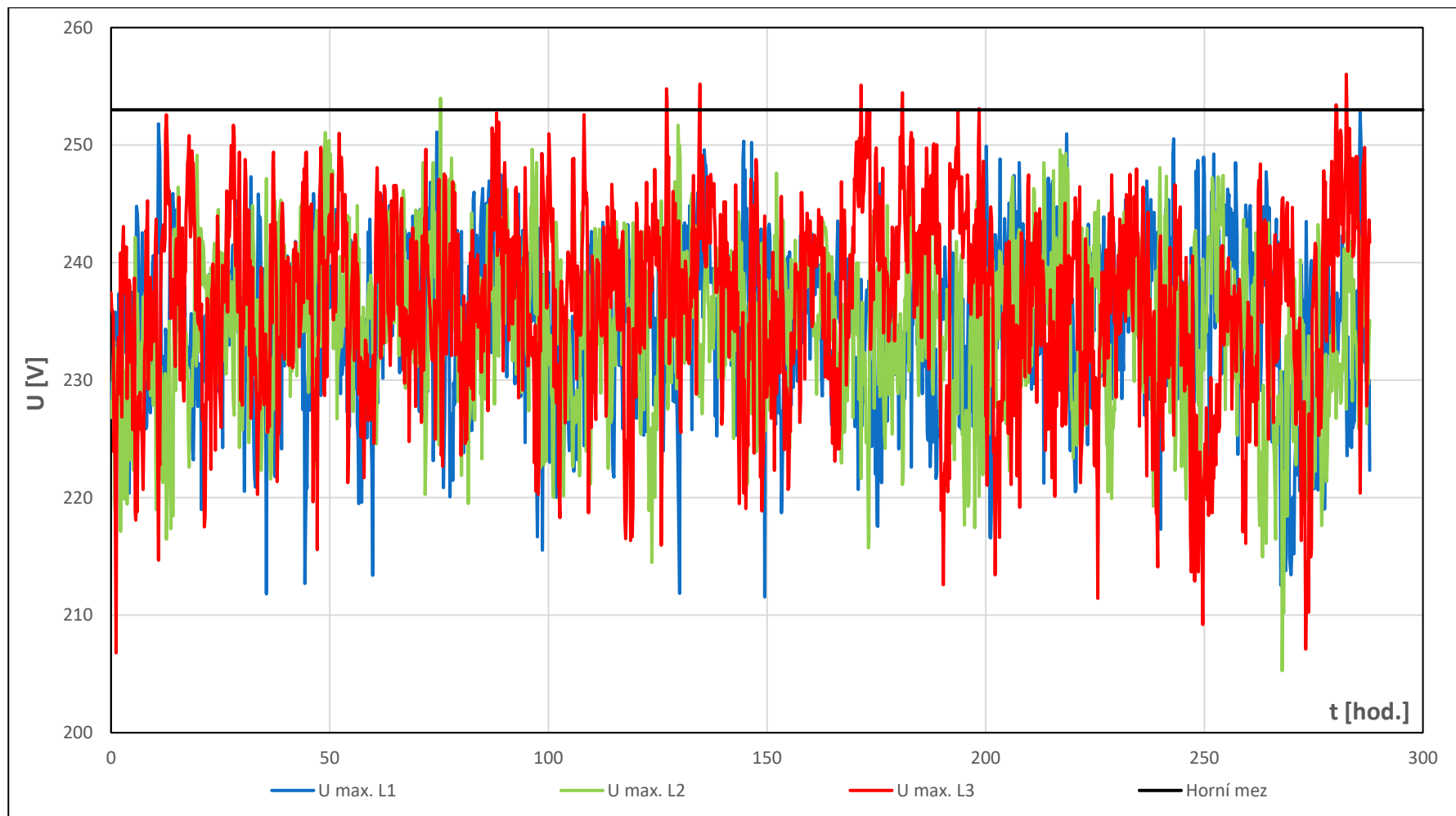
Příloha 6: Detail průběhu maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 2



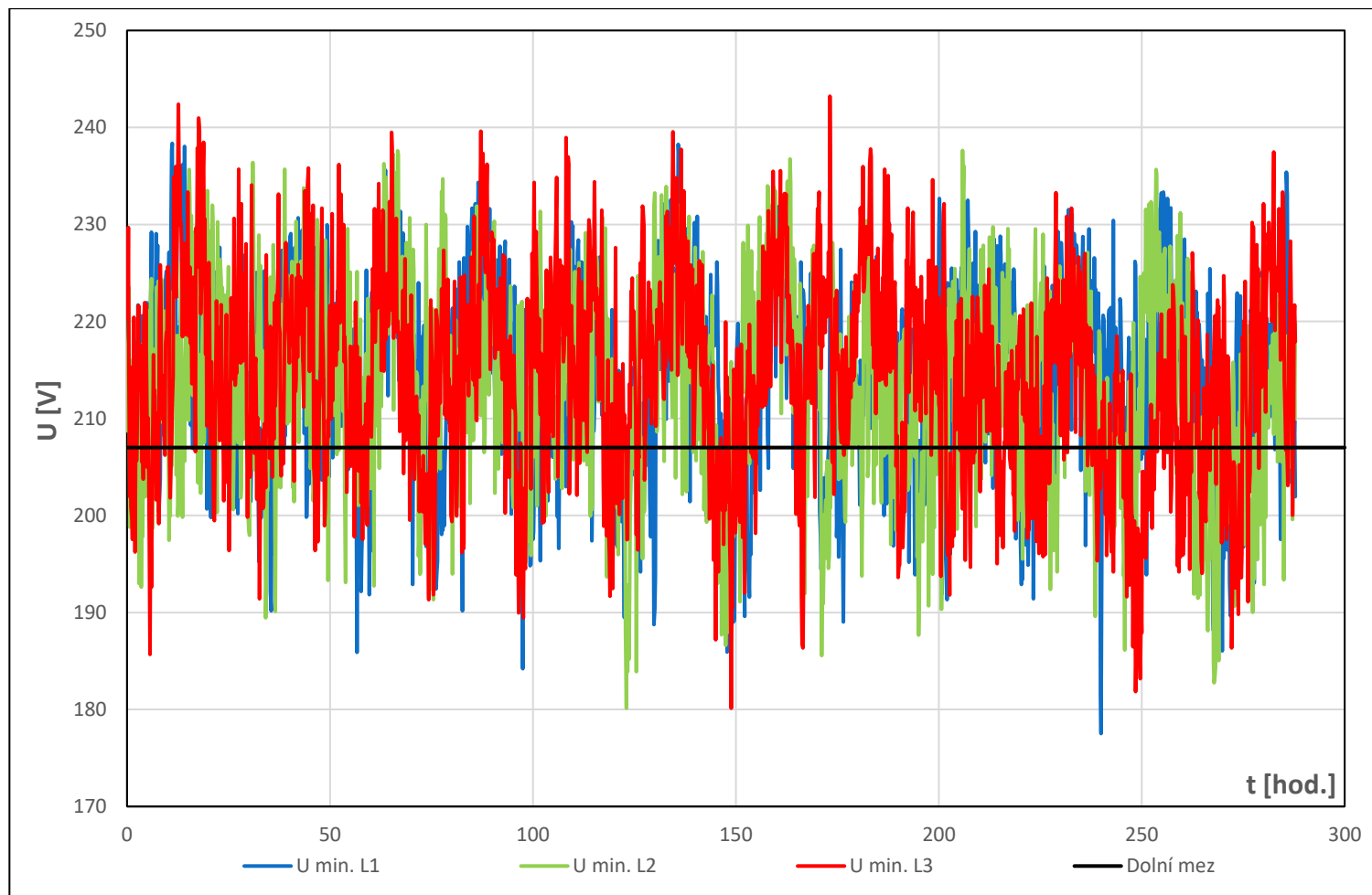
Příloha 7: Detail průběhu minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 2



Příloha 8: Detail průběhu maximálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 3



Příloha 9: Detail průběhu minimálních desetiminutových hodnot napětí v bodě 3



Příloha 10: Výstup výpočtu plochy a výkonu fotovoltaické elektrárny ze softwaru Mathematica Wolfram

```
In[9]:=  $\eta_{MPP} = 0.98;$   
 $\eta_{DC} = 0.98;$   
 $\eta_{CC} = 0.98;$   
 $\eta_{BAT} = 0.94;$   
 $\eta_{INV} = 0.987;$   
 $\eta_D = 0.98;$ 
```

```
 $\eta_{sys} = \eta_{MPP} * \eta_{DC} * \eta_{CC} * \eta_{BAT} * \eta_{INV} * \eta_D;$ 
```

```
Print["Celková účinnost systému je ",  $\eta_{sys}$ , "."]
```

Celková účinnost systému je 0.855755.

```
In[17]:=  $E_{p,den} = 57000;$   
 $\eta_{FV} = 0.206;$   
 $H_{T,den} = 1700;$ 
```

$$A_{FV} = \frac{E_{p,den}}{\eta_{FV} * H_{T,den} * \eta_{sys}};$$

```
Print["Celková plocha FV pole je ",  $A_{FV}$ , " m2."]
```

Celková plocha FV pole je 190.2 m².

```
In[22]:=  $S = 2.18608;$   
 $n = \frac{A_{FV}}{S};$ 
```

```
Print["Počet modulů FV elektrárny je ",  $n$ , "."]
```

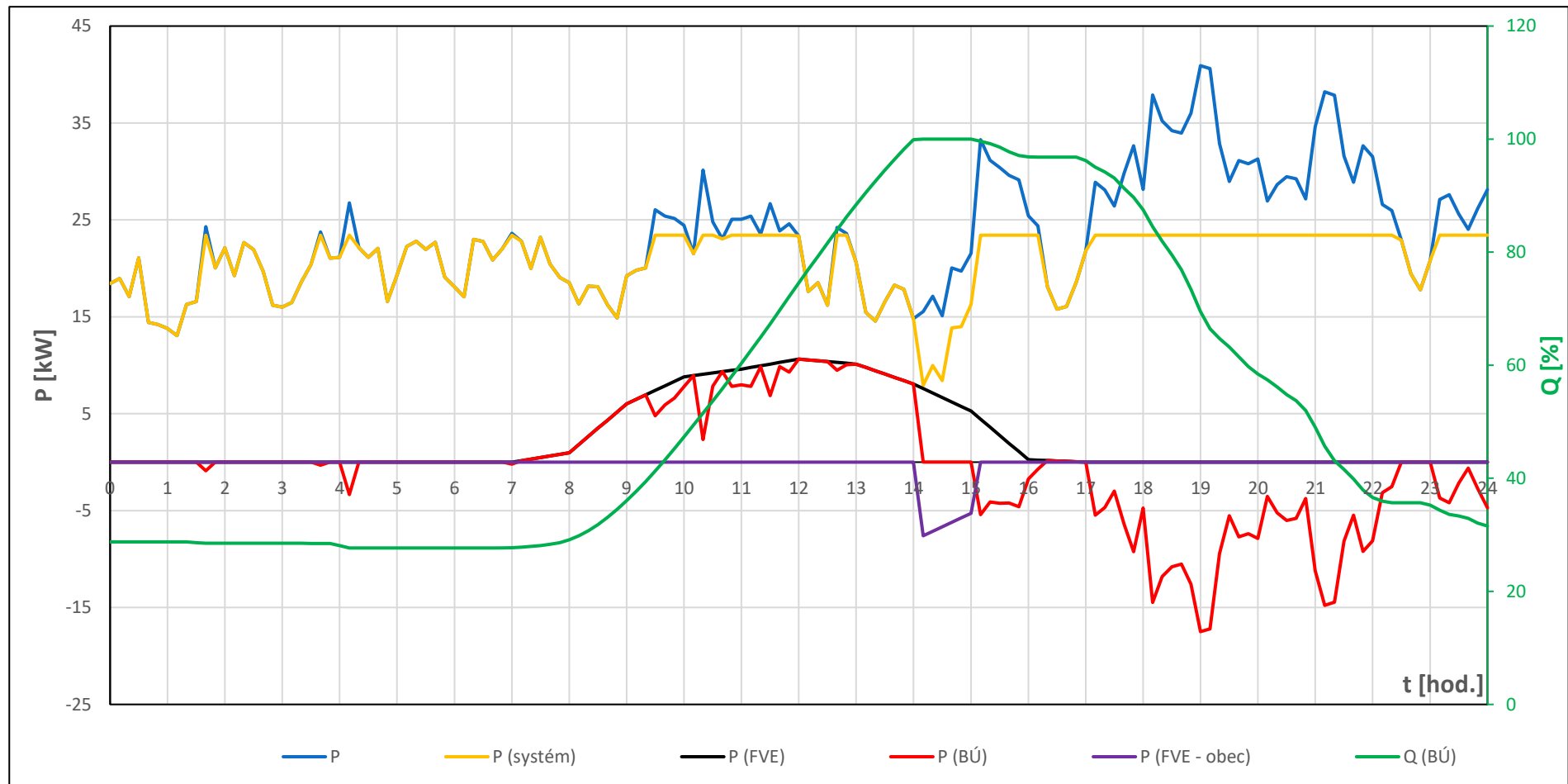
Počet modulů FV elektrárny je 87.0048.

```
In[25]:=  $n_{zaokrouhleno} = 90;$   
 $P_{modulu} = 450;$   
 $P_{FVE} = n_{zaokrouhleno} * P_{modulu};$ 
```

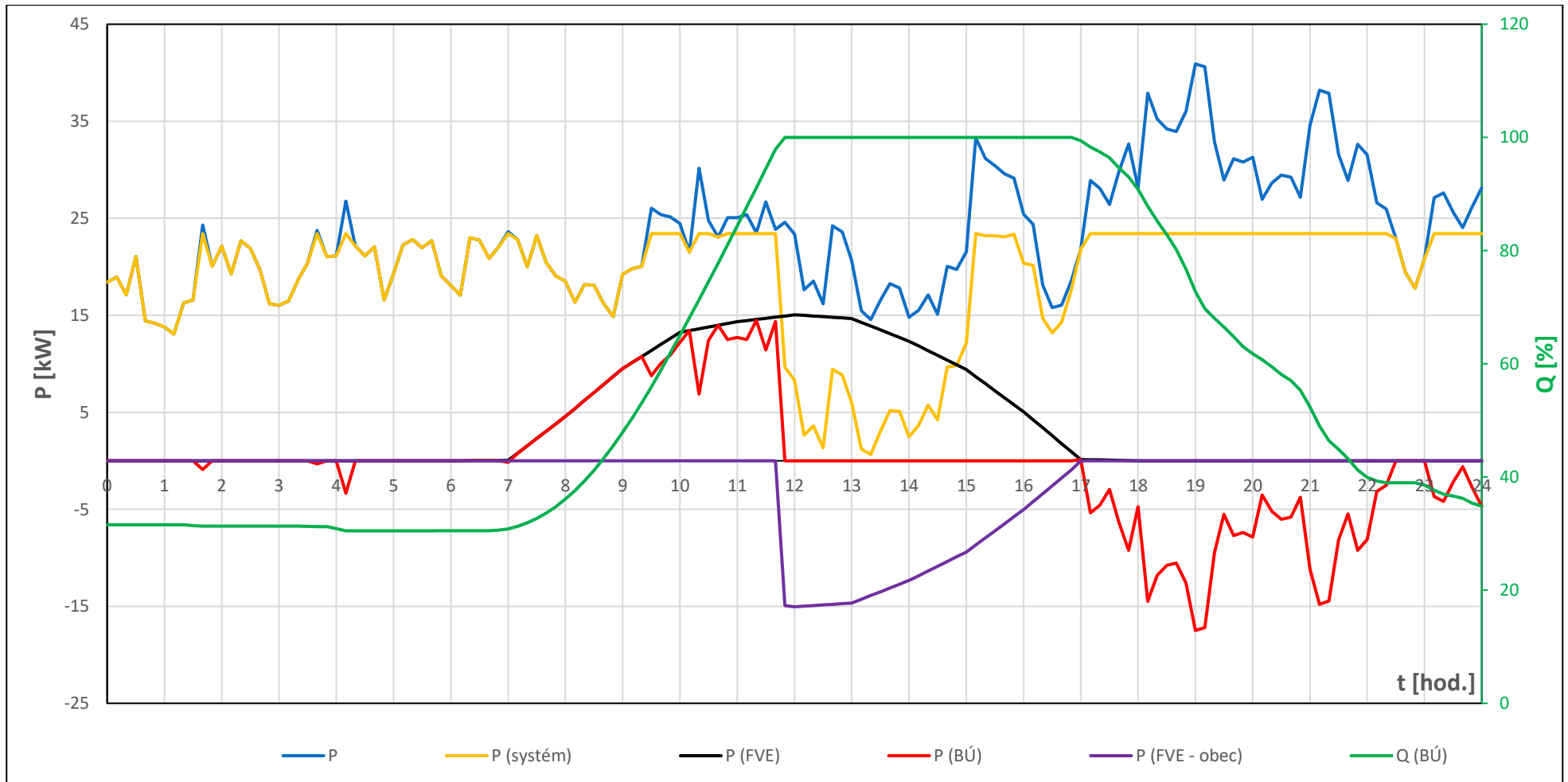
```
Print["Celkový špičkový výkon FVE je ",  $P_{FVE}$ , " Wp."]
```

Celkový špičkový výkon FVE je 40500 Wp.

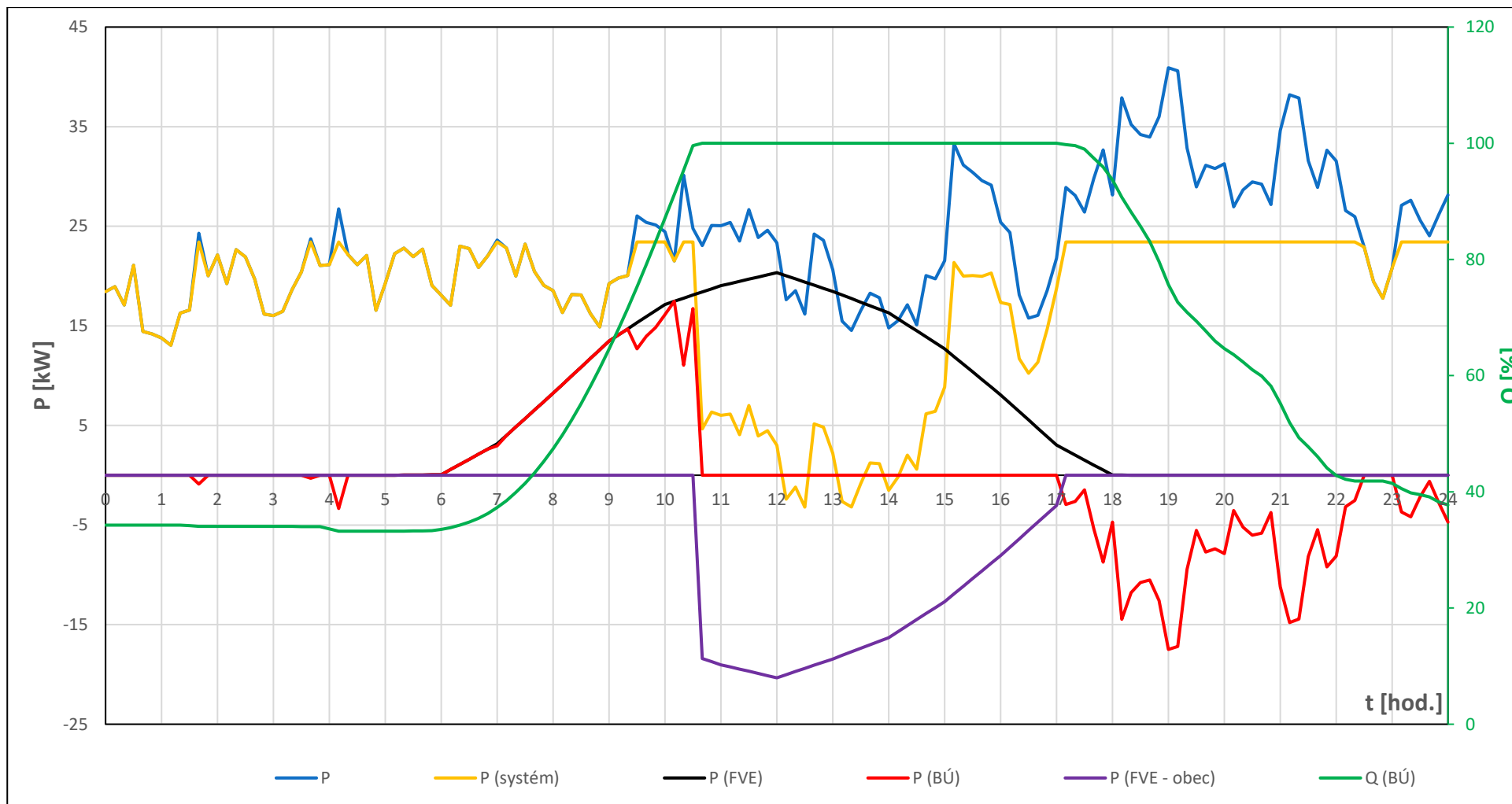
Příloha 11: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v lednu



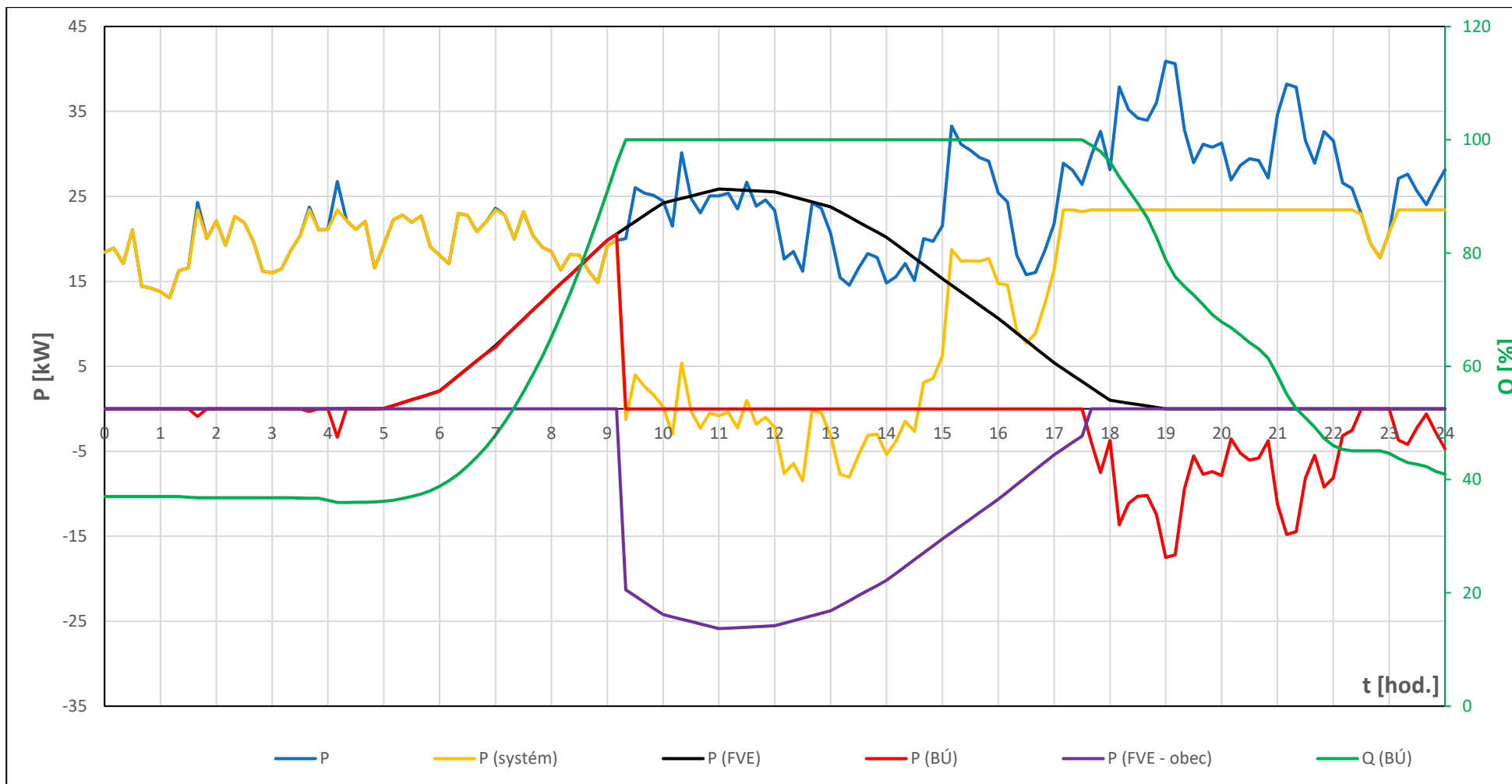
Příloha 12: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v únoru



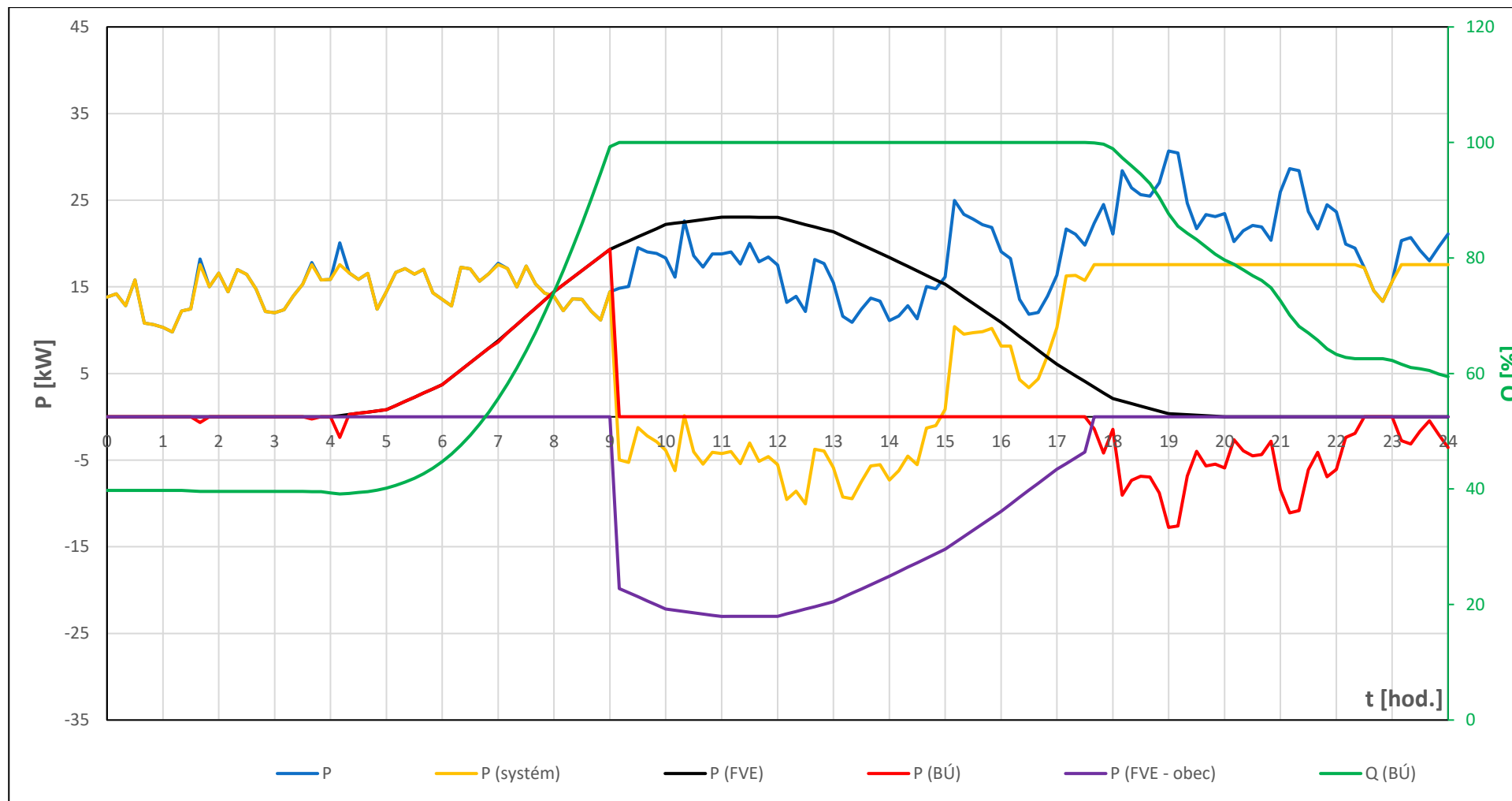
Příloha 13: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v březnu



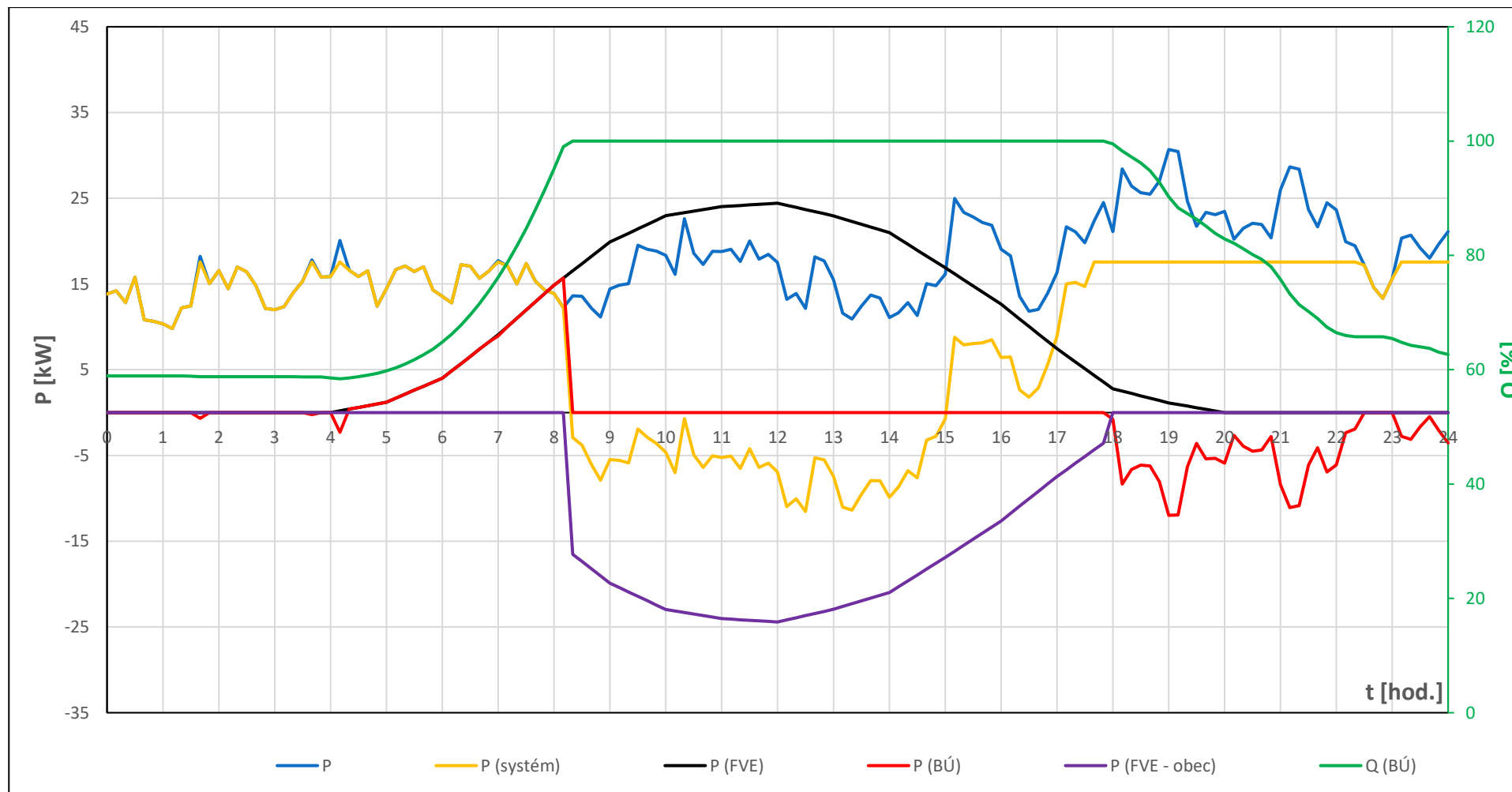
Příloha 14: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v dubnu



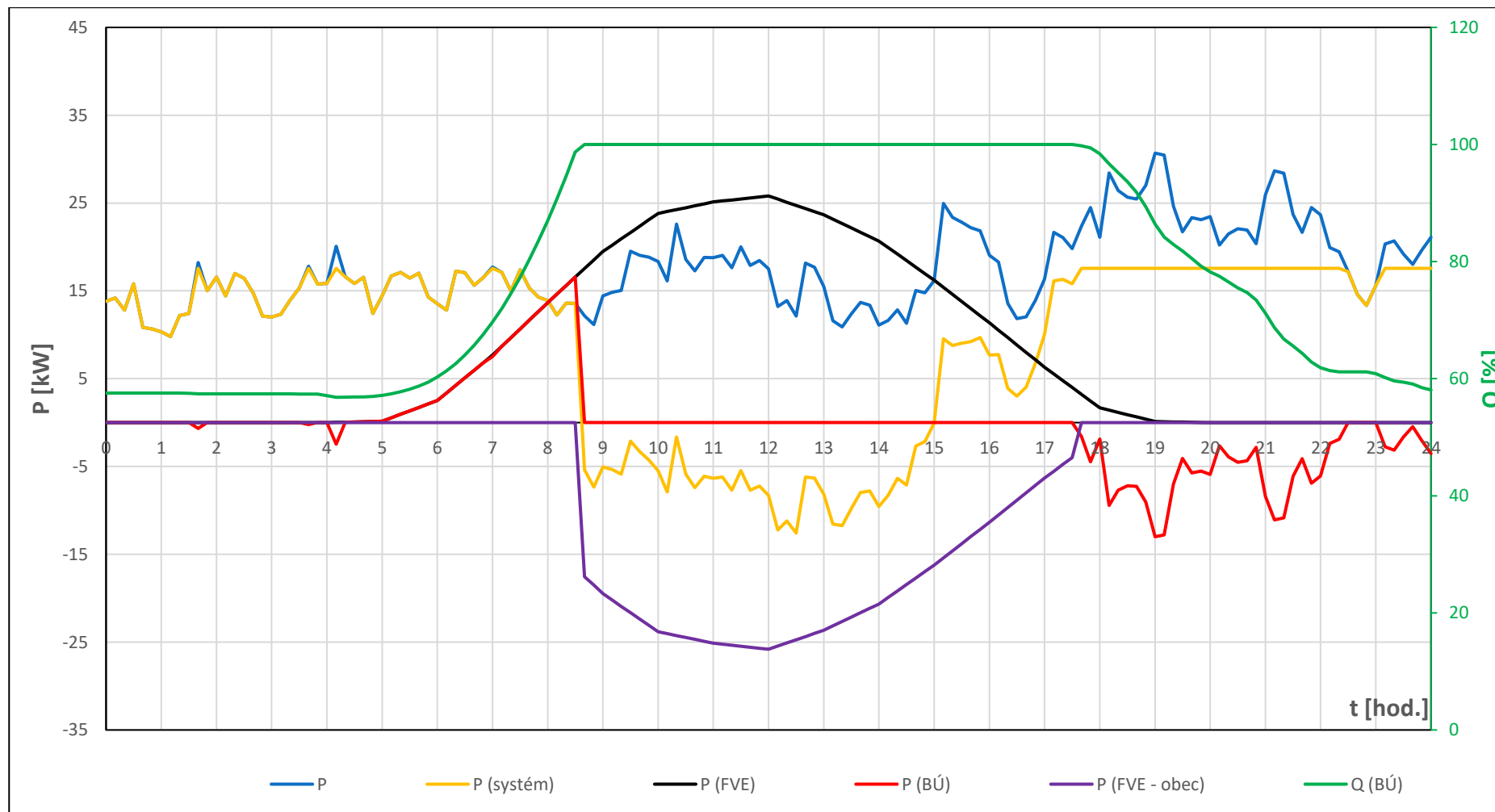
Příloha 15: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v květnu



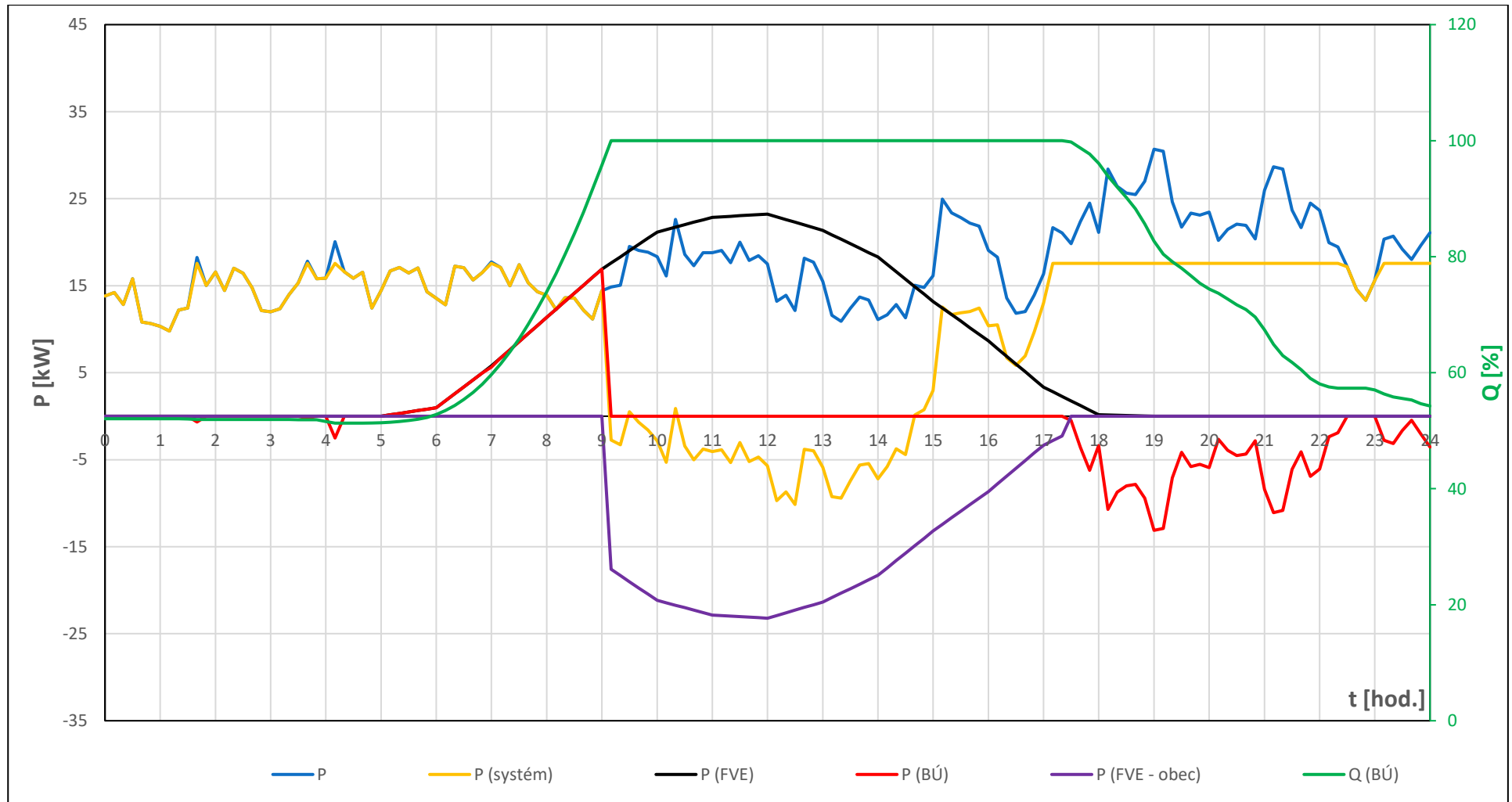
Příloha 16: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v červnu



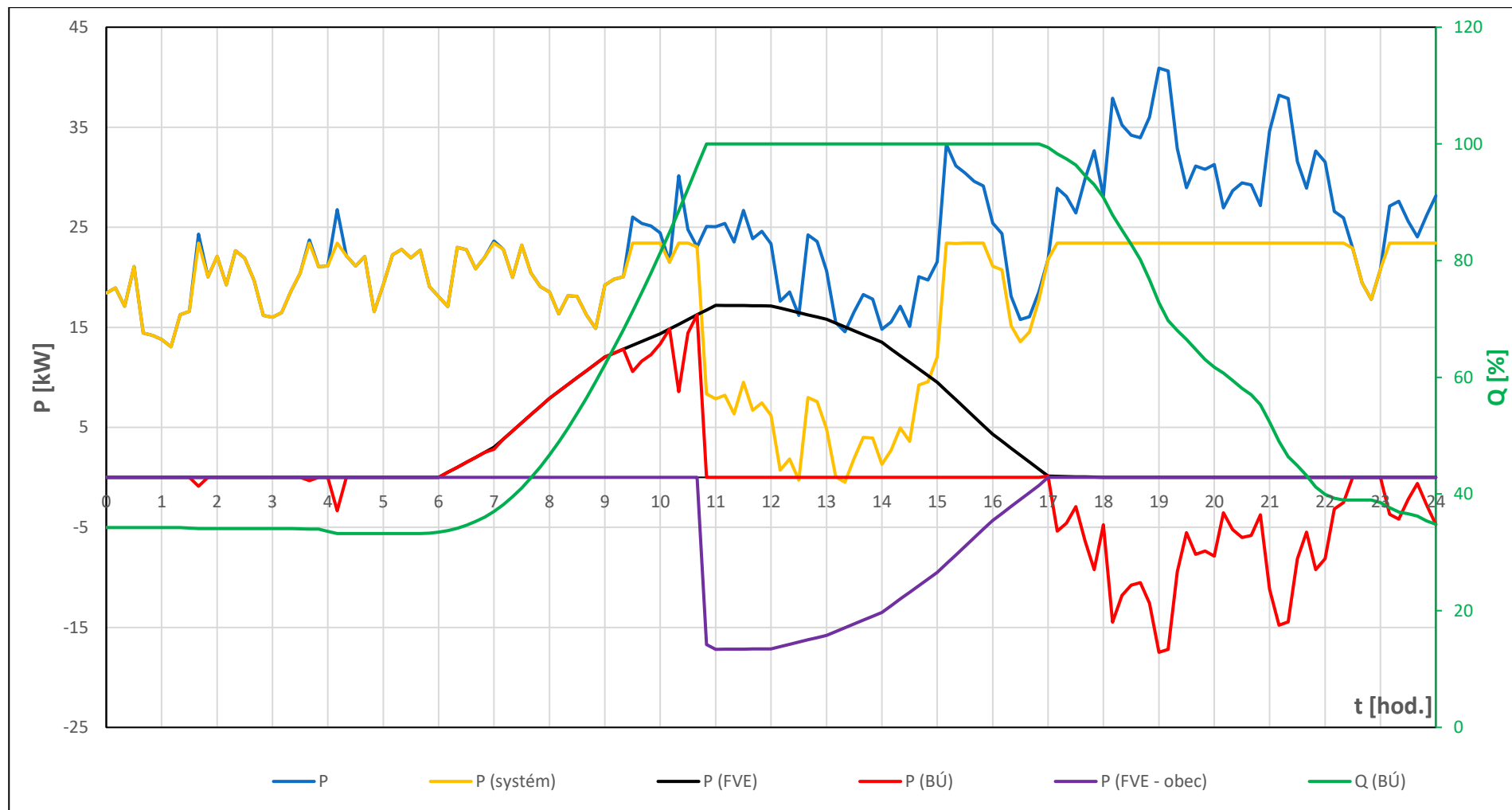
Příloha 17: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v srpnu



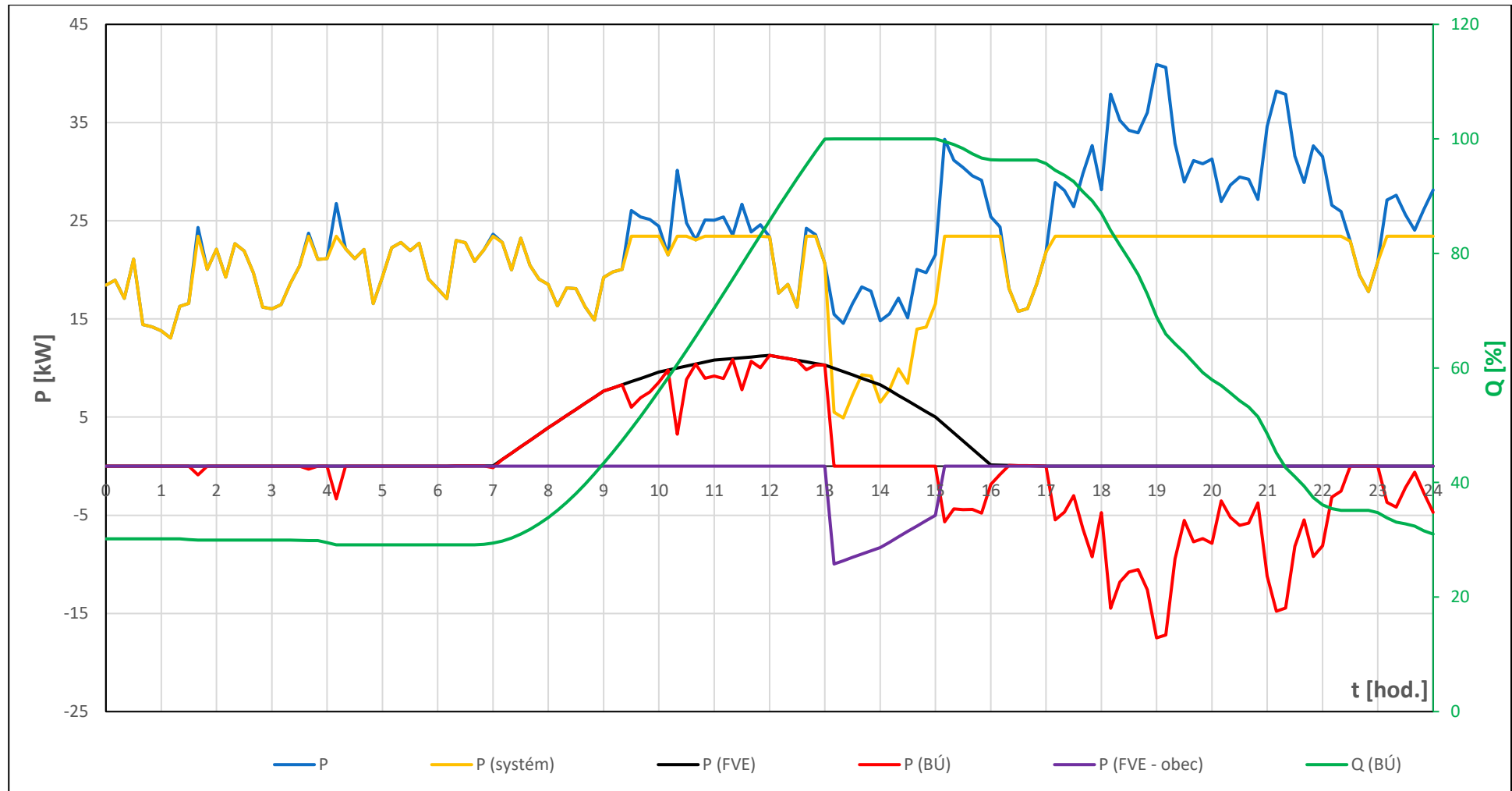
Příloha 18: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v září



Příloha 19: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v říjnu



Příloha 20: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v listopadu



Příloha 21: Výsledek simulace chodu navrhovaného systému v prosinci

