

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření



**Diplomová práce**  
**Simulace autonomních a hybridních FV systémů**

*Bc. Tomáš Švach*

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Studijní program: Inteligentní budovy

Praha, květen 2016

---

**Vedoucí práce:**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.  
Katedra měření  
Fakulta elektrotechnická  
České vysoké učení technické v Praze  
Thákurova 9  
160 00 Praha 6  
Česká republika

Copyright © 2016 Bc. Tomáš Švach



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Tomáš Švach**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Simulace autonomních a hybridních FV systémů**

Název tématu anglicky: **Simulation of Stand-alone and Hybrid PV Systems**

### Pokyny pro vypracování:

- 1) Identifikujte potřebné parametry pro určení modelu akumulátorové baterie, používané v autonomních a hybridních FV systémech.
- 2) Na základě předchozí práce navrhnete model akumulátorové baterie jako blok v prostředí Simulink.
- 3) Obdobně postupujte pro další komponenty typického autonomního/hybridního FV systému – například střídač, MPPT, FV modul a další...
- 4) U systému instalovaného v laboratořích UCEEB získajte měření a analýzou datových listů potřebné parametry komponent.
- 5) Simulujte tento instalovaný systém a výsledky porovnejte s naměřenými údaji.
- 6) Ověřte variabilitu Vámi vytvořeného simulačního systému porovnáním s dalšími systémy.

### Seznam odborné literatury:

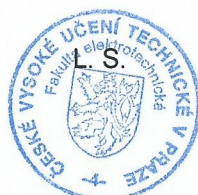
- [1] BROUSSELY, M. – PISTOIA, G.: *Industrial Applications of Batteries*. Elsevier, 2007, první vydání, ISBN 978-0-444-52160-6.
- [2] BRUNET, Y.: *Energy Storage*. ISTE, 2011. ISBN 978-1-84821-183-4.
- [3] HANKINS, M.: *Stand-alone solar electric systems*. Dunstan House, London UK: Earthscan, Ltd, 2010. ISBN 978-1-84407-713-7.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. (K13113)

Datum zadání diplomové práce: 16. září 2015

Platnost zadání do<sup>1</sup>: 3. února 2017

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.  
vedoucí katedry



V Praze dne 16. 9. 2015

Prof. Ing. Pavel Ripka, ČSc.  
děkan

<sup>1</sup> Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

---

## Poděkování

Děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za čas strávený při konzultacích, podnětné rady a pomoc při zajišťování formálních požadavků práce. Dále bych chtěl poděkovat Panu Ing. Petru Wolfovi, Ph.D. a Ing. Aleši Vodičkovi za poskytnutí pomocné ruky, praktických rad a cenných informací při náročných experimentálních měřeních na univerzitním centru v Buštěhradě. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za trpělivost a celkovou podporu nejen během psaní této práce, ale během celého studia.



---

# 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 27. 5. 2016

.....



---

# Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá modelováním a následnými simulacemi autonomních a hybridních FV systémů v programu Matlab a v jeho prostředí Simulink.

První část této práce se zaměřuje na základní definice a typy modelů akumulátoru nutné k pochopení dané problematiky. Seznamuje nás s jednotlivými modely a jejich základními principy fungování, které je nutné před samotnou realizací modelu akumulátoru znát. V této části je i ověření funkčnosti vybraného modelu akumulátoru.

Druhá část se zabývá modely pro simulaci zbývajících komponent FV systému. Po seznámení a ověření funkčnosti těchto komponent je celý model ověřen a ozkoušen vůči reálnému FV systému.

Výsledkem práce je komplexní model FV systému, schopný dostatečně přesně a rychle simulovat reálný FV systém.

## **Klíčová slova:**

FV systém, autonomní FV systém, hybridní FV systém, akumulátory, model, Matlab, Simulink, MPPT, fotovoltaický článek, měnič napětí.





---

# Abstract

This diploma thesis focuses on the concept of modelling of a stand-alone and hybrid PV systems using Matlab and Simulink environment.

The first part of this thesis discusses basic definitions and models of battery, which are necessary for understanding the issue of modelling. It presents verification of functionality and accuracy of chosen battery model.

The diploma thesis also contains models for the modelling other PV components. The verification of functionality and accuracy of the chosen models for PV components is also included. In conclusion, complex model of PV system is validated against real PV system.

The intention of this diploma thesis is to create comprehensive model of PV system which can be used for fast and accurate simulations of the real PV system.

**Keywords:**

PV system, stand-alone PV system, hybrid PV sytem, batteries, model, Matlab, Simulink, MPPT, photovoltaic cell, buck converter.



---

# Obsah

Zkratky	xvii
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Model akumulátoru</b>	<b>5</b>
2.1 Požadavky pro modelování akumulátorů . . . . .	5
2.2 Modely akumulátorů . . . . .	6
2.2.1 Jednoduchý model . . . . .	6
2.2.2 Théveninův model . . . . .	7
2.2.3 Lineární (Théveninův) model . . . . .	7
2.2.4 Odporový (Théveninův) model . . . . .	8
2.2.5 Upravený odporový (Théveninův) model . . . . .	9
2.2.6 Vylepšený (Théveninův) ekvivalentní model . . . . .	10
2.2.7 Third-Order model . . . . .	11
2.2.8 Impedanční modely . . . . .	13
2.2.9 Run-time model . . . . .	13
2.2.10 Kombinovaný obvodový model . . . . .	14
2.2.11 Generický (obecný) model . . . . .	15
2.2.12 Upravený generický model . . . . .	18
2.3 Modelování akumulátoru v prostředí Matlab/Simulink . . . . .	19
2.3.1 Použitelná kapacita $C_{CAP}$ a stav nabití akumulátoru $SOC$ . . . . .	21
2.3.2 Napětí naprázdno $U_0$ . . . . .	22
2.3.3 $RC$ články . . . . .	23
2.3.4 Vnitřní odpor $R_{int}$ . . . . .	25
2.3.5 Napětí na vnitřním odporu $U_{R_{int}}$ . . . . .	26
2.3.6 Výsledné napětí $U_{sv}$ (na svorkách) . . . . .	26
2.4 Extrakce parametrů a validace modelu akumulátoru . . . . .	26
<b>3 Model autonomního/hybridního fotovoltaického systému</b>	<b>35</b>

---

3.1	Požadavky pro modelování FV systému . . . . .	36
3.2	Modely fotovoltaického článku . . . . .	37
3.2.1	Model FV článku s jednou diodou . . . . .	37
3.2.2	Model FV článku s dvěma diodami . . . . .	38
3.2.3	Model FV článku se třemi diodami . . . . .	39
3.2.4	Modelování FV článku v prostředí Matlab/Simulink . . . . .	39
3.3	Modelování MPPT a měniče napětí . . . . .	44
3.3.1	MPPT algoritmus . . . . .	44
3.3.2	DC-DC měnič napětí . . . . .	47
3.3.3	Střídač a nabíječ akumulátorů . . . . .	50
<b>4</b>	<b>FV systém v laboratoři UCEEB</b>	<b>51</b>
4.1	Extrakce parametrů a validace modelu . . . . .	53
4.2	FV panel . . . . .	53
4.3	MPPT, měnič napětí a regulátor nabíjení . . . . .	57
4.4	Střídač . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Porovnání instalovaného FV systému a modelu</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>Variabilita vytvořeného FV systému</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>67</b>
	<b>Literatura</b>	<b>69</b>
<b>A</b>	<b>Simulink model akumulátoru</b>	<b>73</b>
<b>B</b>	<b>Simulink model FV panelu</b>	<b>75</b>
<b>C</b>	<b>Simulink model MPPT</b>	<b>79</b>
<b>D</b>	<b>Simulink model měniče napětí, MPPT a FV panelu</b>	<b>81</b>
<b>E</b>	<b>Simulink model celého FV systému</b>	<b>83</b>
<b>F</b>	<b>PV charakteristiky FV panelu</b>	<b>85</b>

---

## Seznam obrázků

2.1	Jednoduchý model akumulátoru. . . . .	6
2.2	Théveninův model akumulátoru. . . . .	7
2.3	Lineární model akumulátoru. . . . .	8
2.4	Odporový Théveninův model akumulátoru. . . . .	9
2.5	Upravený odporový (Théveninův) model. . . . .	10
2.6	Vylepšený ekvivalentní model. . . . .	11
2.7	Obecné schéma dynamického modelu akumulátoru. . . . .	11
2.8	Third-order model. . . . .	12
2.9	Third-order model pro olověný akumulátor. . . . .	12
2.10	Impedanční model, Randlesův obvod. . . . .	14
2.11	Run-time model. . . . .	15
2.12	Kombinovaný obvodový model. . . . .	15
2.13	Pokles napětí při skokové změně proudu v RC člancích. . . . .	16
2.14	Generický model. . . . .	16
2.15	Vybíjecí charakteristika akumulátoru. . . . .	17
2.16	Modifikovaný generický model. . . . .	19
2.17	Kombinovaný obvodový model a jeho dynamický ekvivalent. . . . .	20
2.18	Napěťová odezva akumulátoru v relaxačním a v zátěžovém stavu. . . . .	23
2.19	Blokové schéma měřícího systému akumulátorů. . . . .	27
2.20	Získané parametry prvků pro 30 A a 90 A . . . . .	30
2.21	Porovnání výsledků simulace modelu 30 A. . . . .	31
2.22	Porovnání výsledků simulace modelu 90 A. . . . .	32
3.1	Schéma autonomního/hybridního FV systému. . . . .	36
3.2	Model FV článku s jednou diodou. . . . .	37
3.3	Model FV článku s dvěma diodami. . . . .	38
3.4	Náhradní schéma modelu FV panelu. . . . .	43
3.5	Výkonové omezení panelu bez MPPT. . . . .	44
3.6	Blokové schéma MPPT a měniče napětí. . . . .	45

---

3.7	Schéma obvodu buck konvertoru . . . . .	47
3.8	Impedanční přizpůsobení zátěže vůči FV panelu. . . . .	48
3.9	Zjednodušený měnič napětí . . . . .	49
4.1	Univerzitní centrum v Buštěhradě.[uceeb.cz] . . . . .	51
4.2	Srovnání VA charakteristiky modelu a flash testu. . . . .	54
4.3	Srovnání VA charakteristiky modelu a flash testu po úpravě $n$ . . . . .	55
4.4	Srovnání VA charakteristiky modelu a flash testu po úpravě $n$ a $R_s$ . . . . .	55
4.5	VA charakteristiky modelu při různých teplotách FV panelu. . . . .	56
4.6	VA charakteristiky modelu při různých intenzitách záření. . . . .	56
4.7	Hledání maximálního bodu výkonu při změně intenzity záření. . . . .	57
4.8	Napětí na vstupu měniče řízené PWM generátorem. . . . .	58
5.1	Porovnání výstupu reálných FV panelů a modelu. . . . .	61
5.2	Porovnání výstupu reálného MPPT regulátoru a modelu. . . . .	62
5.3	Porovnání výstupu reálného akumulátoru a modelu. . . . .	63
5.4	Porovnání vstupu reálného střídače a modelu. . . . .	64
A.1	Model akumulátoru v prostředí Simulink. . . . .	73
A.2	Subsystém pro kalkulaci stavu nabití v prostředí Simulink. . . . .	74
B.1	Model FV panelu v prostředí Simulink. . . . .	75
B.2	Subsystém FV panelu v prostředí Simulink. . . . .	76
B.3	Subsystém FV panelu pro kalkulaci saturačního proudu diody . . . . .	77
C.1	Model MPPT algoritmu v prostředí Simulink. . . . .	79
D.1	Model buck konvertoru včetně MPPT a FV panelu v prostředí Simulink. . . . .	81
E.1	Celý model FV systému v prostředí Simulink. . . . .	83
F.1	Srovnání PV charakteristiky modelu a flash testu. . . . .	85
F.2	Srovnání PV charakteristiky modelu a flash testu po úpravě $n$ . . . . .	86
F.3	Srovnání PV charakteristiky modelu a flash testu po úpravě $n$ a $R_s$ . . . . .	86
F.4	PV charakteristiky modelu při různých intenzitách záření. . . . .	87
F.5	PV charakteristiky modelu při různých teplotách FV panelu. . . . .	87

---

## Seznam tabulek

2.1	Seznam přístrojů při experimentálním měření. . . . .	27
2.2	Odebraná kapacita z akumulátorů při různých vybíjecích proudech. . . . .	29
2.3	Srovnání dvou simulací vůči experimentálnímu měření . . . . .	33
3.1	Parametry pro identifikaci šířky zakázaného pásu. . . . .	41
3.2	Faktor ideálnosti diody podle FV technologie. . . . .	41
4.1	Seznam komponent instalovaných v laboratoři UCEEB. . . . .	52
4.2	Parametry FV panelu z katalogového listu a z flash testu. . . . .	53





---

## Zkratky

<b>FV</b>	Fotovoltaika
<b>CDT</b>	Plynulé vybíjení akumulátoru (Continuous discharge test)
<b>PDT</b>	Pulsní vybíjení akumulátoru (Pulse discharge test)
<b>SOC</b>	Stav nabití akumulátoru (State of charge)
<b>BMS</b>	Monitorování stavu akumulátoru (Battery management system)
<b>VA</b>	Volt-ampérová charakteristika fotovoltaického článku
<b>MPPT</b>	Typ napěťového měniče se sledováním maximálního bodu výkonu (Maximum power point tracking)
<b>Grid</b>	Rozvodná distribuční síť
<b>P&amp;O</b>	Perturb & Observe (Odchýlení a vyhodnocení)
<b>CCGX</b>	Color control GX - ovládací a monitorovací panel FV systému
<b>PLC</b>	Programmable Logic Controller (Programovatelný logický automat)



## Úvod

Ze začátku, než bude popsána problematika simulací autonomních a hybridních FV systémů a používané technologie ve fotovoltaických systémech, by měla zaznít jedna základní a jednoduchá otázka. Proč solární energie a v čem je tak výjimečná?

Odpověď je jednoduchá. Slunce je v podstatě nevyčerpatelný zdroj energie, kterou jsme již schopni v dnešní době jednoduše přeměnit na energii elektrickou. Sluneční záření je nejlevnější a zároveň nejlépe dosažitelný zdroj energie nejen na Zemi, ale v celé naší sluneční soustavě. Z enviromentálního hlediska je nutné podotknout, že elektrická energie vyrobená pomocí fotovoltaických panelů je jedním z nečistších druhů energie, kterou je schopen člověk vyrobit, aniž by degradoval životní prostředí. Už jen díky těmto faktům je velice perspektivní využívat tak velký energetický potenciál, který nám Slunce a potažmo fotovoltaický systém nabízí.[1]

V posledních letech nastal velký rozvoj ve využití fotovoltaických systémů. Jednak k tomu napomohl rychlý vývoj nových pokročilých technologií a také lepší cenová dostupnost. Výroba elektřiny ze slunečního záření se od roku 2002 zdvojnásobuje každé dva roky, roste v průměru o 48% za rok, což z ní činí nejrychleji se rozvíjející technologií na výrobu elektrické energie.[2][1]

Z ekonomického hlediska je fotovoltaický systém finančně náročný pouze při realizaci jako počáteční investice. Při spuštění a uvedení do provozu je fotovoltaický systém nenáročný na údržbu a jeho životnost se pohybuje okolo 20 let. Průměrná návratnost investice činí zhruba 6 až 10 let a vzhledem k tomu, že životnost panelů je zhruba 20 let, tak v druhé půlce životnosti jsou schopny panely generovat zisk.[1]

Dalším neopomenutelným faktem, který hraje do karet fotovoltaickým systémům je vývoj a výroba účinnějších solárních panelů pro běžné použití, kde jejich efektivita se nyní pohybuje přibližně mezi 15%-17%<sup>1</sup>. Avšak technologie solárních panelů je již mnohem dál. Už teď existuje technologie solárních panelů s účinností 44,7% vytvořený výzkumníky z Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.[3] U těchto článků byla využita technologie koncentrátorové fotovoltaiky (CPV), díky které je dosaženo dvojnásobné účinnosti

---

<sup>1</sup>Záleží na použité technologii a na výrobcí.

## 1. ÚVOD

---

oproti běžným článkům používaných v panelech. Bylo toho dosaženo pomocí subčlánků vytvořených z vrstev různých polovodičů navršených na sebe. Díky tomu každý článek absorbuje jinou vlnovou délku světelného spektra.[4][1]

Jenže co se stane, když nejsou ideální světelné podmínky nebo je noc? Bohužel v těchto případech fotovoltaický systém neprodukuje dostatek potřebné energie a tato ztráta musí být něčím kompenzována. Na základě této potřeby vznikl požadavek na akumulaci přebytečné elektrické energie a tak se v solárních systémech začaly využívat akumulátory, případně superkapacitory.[1]

Využití akumulátorů ve fotovoltaických systémech má samozřejmě hlubší význam. Nejen, že nám přináší efektivnější využití elektrické energie díky možnosti "uskladnění", ale také řadu dalších výhod. Jedná se například o rychlou rezervu výkonu, pokrytí zvýšených energetických nároků, vyhlazení krátkodobých špiček, stabilizace napětí/frekvence a v neposlední řadě kompenzace jalového výkonu. V těchto aspektech je akumulace energie velmi cenná a užitečná. Bohužel tyto výhody jsou "vykoupeny" finanční nákladností realizace.[1]

Aktuálně trend solárních systémů s akumulací energie stále roste a lze říct, že to bude mít pouze a jen stoupající tendenci. Je to dáno tím, že cena této technologie je ode dne nižší a účinnost systémů prudce roste. Ve výsledku i přes velkou počáteční nákladnost realizace, přináší akumulace energie nespočet výhod, které jsou někdy mnohem důležitější než samotná cena.[1]

Nicméně před samotnou realizací FV systému je velice užitečné vědět, jakou energetickou výtěžnost by měl potenciální systém v dané lokalitě a jaké budou přibližné energetické toky mezi jednotlivými komponentami FV systému. Může to značně ulehčit návrh a dimenzování FV systému, přesněji určit energetickou výtěžnost a v neposlední řadě posoudit, zda navrhovaný FV systém opravdu výkonově dostačuje pro konkrétní použití.

To stejné platí pro případ, kdy FV systém je již realizovaný. U realizovaného FV systému je důležité je co nejefektivněji provozovat a docílit tak co největší energetické výtěžnosti. To znamená na základě predikce intenzity záření a okolní teploty možnost určit, kolik elektrické energie bude schopen vyrobit FV systém. Tato možnost je klíčová právě u autonomních a hybridních FV systémů, které jsou v podstatě odkázány hlavně na energii získanou přeměnou slunečního záření. Například lze jednoduše určit, zda elektrická energie, uchovaná v akumulátorech a elektrická energie získaná pomocí FV panelů, bude plně dostačovat na budoucí spotřebu. Díky tomu je docíleno efektivnějšího hospodaření s dostupnou a s potenciální elektrickou energií.

Této problematice se právě věnuje obor modelování a simulace FV systémů, které v dnešní době patří mezi nejefektivnější a nejsilnější nástroje pro optimalizaci a návrh FV systémů. Přináší to obrovskou výhodu zejména při návrhu, kdy modelovaný FV systém a komponenty nemusí být fyzicky vyrobeny. Díky tomu dochází ke značné redukci nákladů na návrh a případnou optimalizaci. V dnešní době, než se konkrétní komponenty nebo celé systémy vyrobí a postaví, jsou nejprve navrženy a odladěny ve speciálních programech. Poté, co je ověřena funkčnost v simulacích, je teprve komponenta nebo celý systém vyroben a ověřen v praxi.

Na základě těchto faktů jsem se rozhodl detailněji věnovat ve své diplomové práci této problematice a podrobněji ji zanalyzovat. Ve své diplomové práci se konkrétně věnuji

---

nejpoužívanější metodě modelování FV systémů pomocí programu Matlab/Simulink. Poté jsem vybral nejvhodnější typy modelů pro jednotlivé komponenty a provedl jsem následně ověření jejich funkčnosti. V poslední fázi jsem ověřil funkčnost celého modelu FV systému.

Dalším důvodem, proč jsem si vybral toto téma, je nedostatečné množství odborných publikací a článků věnujících se modelování celého FV systému. Často jsou odborné publikace zaměřeny pouze na jednu část respektive komponentu FV systému jako je FV panel, MPPT, akumulátor, ale je velice málo odborných publikací, které se věnují modelování celého FV systému. Navíc některé modely jsou zbytečně složité a jejich simulace jsou často náročné na výpočetní prostředky a čas. Jsou sice velmi přesné, avšak málo flexibilní a díky tomu je nelze jednoduše aplikovat na jiné FV systémy.

Mým cílem je tedy sestavit jednoduchý a dostatečně přesný model FV systému, který by byl v rámci možností aplikovatelný na více FV systémů. Tam kde to není bezpodmínečně nutné, bude radikálně model zjednodušen, díky čemuž bude dosaženo nižší doby simulace.

Pro lepší orientaci je práce členěna na šest stěžejních kapitol, tak aby čtenář získal ucelenější pohled nad danou problematikou.

První část respektive druhá kapitola se věnuje pouze modelováním akumulátorů. Akumulátorům byla věnována samostatná kapitola, neboť jsou nejsložitější komponentou při modelování FV systému. Je to dáno stavbou a složením samotného akumulátoru. Jedná se o elektrochemický zdroj, kde se prolínají nejen elektrické, ale také chemické principy. Navíc chování akumulátoru je těžké předvídat kvůli mnoha vlivům jako stárnutí nebo teplota.

Třetí kapitola se zabývá modelováním zbývajících komponent jako je FV panel, MPPT, měnič napětí atd. Tato část pojednává pouze o teoretických předpokladech a principech chování jednotlivých komponent v modelu.

Čtvrtá kapitola popisuje reálný FV systém, který byl použit pro získání experimentálních dat jež jsou později použita pro ověření správné funkčnosti modelu. Kapitola se také zabývá extrakcí parametrů z katalogových listů pro modely jednotlivých komponent. Dalším krokem po extrakci bylo ověření modelu každé komponenty FV systému, aby byla zaručena funkčnost dílčích částí celého modelu.

Pátá kapitola porovnává celý model FV systému s reálným FV systémem, kde součástí kapitoly je také rozbor výsledků včetně grafů.

Poslední šestá kapitola pojednává o schopnosti modelu simulovat i jiné FV systémy a porovnává vytvořený model s ostatními simulačními programy.



---

## Model akumulátoru

Modely akumulátorů jsou velmi důležitou součástí při vývoji nových technologií a realizaci projektů, neboť značně urychlují proces vývoje a šetří finanční prostředky. Pomocí modelů jsme schopni se přiblížit s velkou přesností k vlastnostem a charakteristikám reálného akumulátoru a díky tomu je můžeme úspěšně nahradit modelem.

Přestože se akumulátory „navenek“ chovají jako jednoduchá elektrická zařízení pro uchovávání energie, vnitřní elektrochemické procesy z nich dělají velmi složité a obtížně pochopitelné zařízení. Je zde velký počet faktorů, které mají vliv na jejich nelineární chování a velmi málo modelů, které to dokáží předvídat.

### 2.1 Požadavky pro modelování akumulátorů

Aby bylo možné co nejvěrněji modelovat akumulátor, je potřeba jasně vymežit požadavky, které by měl model splňovat. Konkrétně se jedná o tyto požadavky:

- Napětí naprázdno závislé na stavu nabití akumulátoru.
- Napětí akumulátoru závislé na vybíjecím proudu.
- Dostupná kapacita akumulátoru závislá na vybíjecím proudu, teplotě a počtu cyklů.
- Doba běhu akumulátoru.
- Uchování stavu nabití akumulátoru po odpojení zátěže.
- Dynamické chování akumulátoru při změně vybíjecího proudu (VA charakteristika a přechodová odezva).
- Zohlednění samovybíjení akumulátoru.
- Možnost reverzibilního děje (nabíjení).

Na základě těchto požadavků lze velice přesně dynamicky modelovat chování jakéhokoliv typu akumulátoru.



## 2.2 Modely akumulátorů

Modely akumulátorů lze rozdělit do třech základních skupin. Elektrochemické, matematické a modely založené na elektrických obvodech.

Elektrochemické modely jsou výhradně založené na chemických procesech odehrávající se uvnitř akumulátoru a ignorují tak termodynamické a kvantové účinky. Tyto modely dokáží předpovídat akumulaci energie, ale nejsou schopny modelovat změny napětí v čase při změně zátěže a nezahrnují teplotní vlivy. Jsou velice přesné, nicméně jsou velmi složité a obtížně konfigurovatelné.

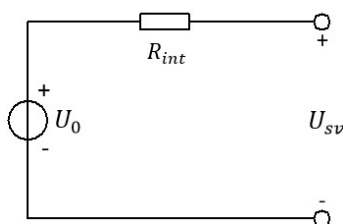
Matematické (stochastické) modely jsou jednoduché, s rychlou předpovědí chování akumulátoru, avšak nejméně přesné a příliš abstraktní. Matematické a ani elektrochemické modely se značně nehodí pro dynamické modelování akumulátorů.

Pro nás jsou nejvhodnější modely založené na elektrických obvodech, které svými vlastnostmi leží mezi matematickými a elektrochemickými modely. Jsou dostatečně přesné, poměrně jednoduché a plně vyhovují pro simulaci chování akumulátoru v oblasti elektrotechniky. Dále tedy budou zmíněny pouze modely založené na bázi elektrických obvodů.

### 2.2.1 Jednoduchý model

Jednoduchý model akumulátoru, který patří mezi nejpoužívanější modely všeobecně, zobrazuje obrázek 2.1. Skládá se z ideálního zdroje napětí  $U_0$  (napětí naprázdno) a z konstantního vnitřního rezistoru  $R_{int}$ . Výsledkem je svorkové napětí  $U_{sv}$  akumulátoru.[5][6]

Tento model nebere v úvahu měnící se vnitřní impedanci akumulátoru, která je závislá na stavu nabití, koncentraci elektrolytu a na vytvořeném množství sulfátu. Chová se jako neomezený zdroj elektrické energie, ve kterém stav nabití není důležitý a nemá vliv na vlastnosti akumulátoru. Z tohoto důvodu není vhodný pro přesnou simulaci chování akumulátoru, neboť je značně zidealizovaný.[5][6]



Obrázek 2.1: Jednoduchý model akumulátoru.[6]

Dodatečně byl tento model upraven tak, že zohledňoval stav nabití na základě výměny konstantního vnitřního rezistoru  $R_{int}$  za proměnný vnitřní rezistor, odvíjející se od stavu nabití.[6][5]

$$R_{int} = \frac{R_0}{S^k} \quad (2.1)$$

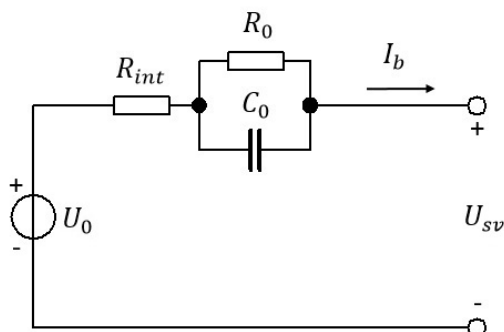
$R_0$  je počáteční vnitřní elektrický odpor při plně nabitém akumulátoru a  $S$  je stav nabití, který je určen z rovnice (2.2):

$$S = 1 - \frac{It}{C_{10}} \quad (2.2)$$

Kde  $C_{10}$  je kapacita při deseti hodinovém vybíjení a při referenční teplotě,  $I$  je vybíjecí proud a  $h$  je doba vybíjení akumulátoru v hodinách.  $S$  se mění podle stavu nabití od 0 (akumulátor vybitý) do 1 (akumulátor nabitý). Koeficient  $k$  je funkcí rychlosti vybíjení, určený pomocí tří vybíjecích charakteristik udávané výrobcem. Tento upravený model byl používán řadou výrobců pro monitorování akumulátorů.[6][5]

### 2.2.2 Théveninův model

Dalším velmi běžně používaným modelem je Théveninův model zobrazený na obrázku 2.2, který je sestaven z ideálního zdroje napětí  $U_0$  (napětí naprázdno), vnitřního rezistoru  $R_{int}$  a RC článku. V RC článku kondenzátor  $C_0$  představuje dvojkapacitu mezi elektrodami a přepětový<sup>1</sup> rezistor  $R_0$  charakterizuje nelineární přechodový elektrický odpor mezi elektrodami a elektrolytem. Konkrétně rezistor  $R_0$  charakterizuje přepětí přenosu náboje neboli aktivační přepětí. Všechny parametry pasivních prvků jsou konstantní, nicméně ve skutečnosti se dynamicky mění v závislosti na stavu nabití a rychlosti vybíjení akumulátoru.[6][5]



Obrázek 2.2: Théveninův model akumulátoru.[6]

### 2.2.3 Lineární (Théveninův) model

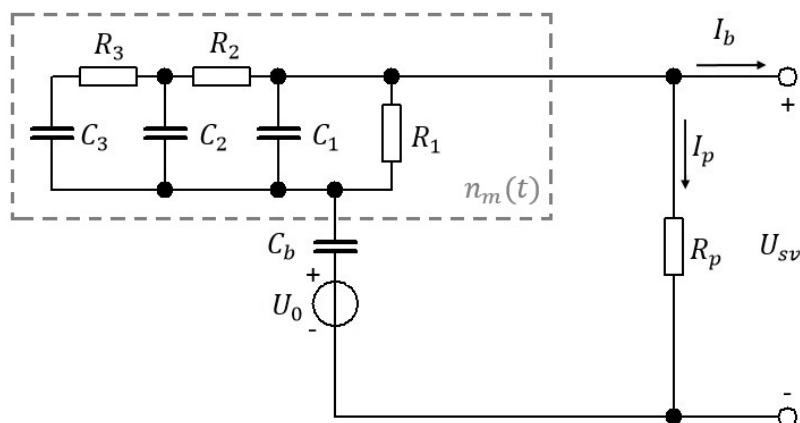
Lineární model (obrázek 2.3) vychází z Théveninového modelu, který využívá taktéž lineární prvky. Zdroj napětí naprázdno  $U_0$  (napětí naprázdno plně vybitého článku) a kondenzátor

<sup>1</sup>Jedná se o přepětí, které charakterizuje rozdíl mezi potenciálem v rovnováze a potenciálem v případě proudového zatížení.

$C_b$  (elektrochemická kapacita článku) charakterizují elektrochemický průběh ukládání náboje. Tři odpory a kondenzátory ( $R_1, R_2, R_3, C_1, C_2, C_3$ ) dynamicky modelují chování akumulátoru při různých stavech nabití. Označením větve obvodu  $n_m(t)$  je vyjádřena dynamická změna lineárních prvků v čase respektive v závislosti na stavu nabití akumulátoru. Rezistor  $R_p$  charakterizuje samovybíjení.[6][7]

Jelikož rozeznáváme 4 druhy přepětí (přenosové, koncentrační, reakční a krystalizační), které mohou nastat v akumulátoru, je tento model oproti Théveninovému modelu (obrázek 2.2) doplněn dalšími dvěma rezistory a kondenzátory. Je to dáno díky zohlednění nejen přenosového přepětí, ale také koncentračního a reakčního přepětí. Krystalizační přepětí nemusí pokaždé nastat a proto není v tomto modelu zohledněno. V porovnání tak s Théveninovým modelem, který modeluje pouze jeden druh přepětí (přenosové), je lineární model mnohem komplexnější. Díky tomu je přesnější a víc se přibližuje k vlastnostem reálného akumulátoru.[6][7]

Tento model je celkem vhodný pro modelování přechodných a ustálených stavů akumulátoru, nicméně nebere v úvahu teplotní závislost. Model navíc je mnohem složitější díky většímu počtu prvků, kde se jejich hodnoty liší podle stavu nabití akumulátoru. Ve výsledku pak vyhodnocování tohoto modelu akumulátoru je značně složité a zdlouhavé.[6][7]



Obrázek 2.3: Lineární model akumulátoru.[6]

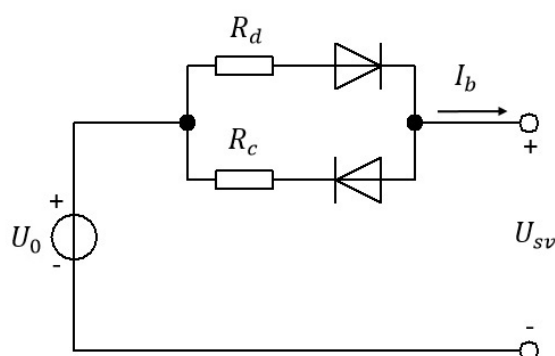
### 2.2.4 Odporový (Théveninův) model

Další model, který vychází ze základního Théveninova modelu, je odporový Théveninův model, viz obrázek 2.4. Je velice podobný modelu, který byl popsán výše, ale používá se pouze při jistých předpokladech:[6][7]

- Elektrody jsou z porézního materiálu.

- Odpor elektrolytu je konstantní napříč vybíjením.
- Polarizace je lineární funkcí hustoty aktivního materiálu.
- Vybíjení probíhá konstantním proudem.

Vy výsledku to znamená, že tento model je vhodný pouze pro modelování olověných akumulátorů.[6]



Obrázek 2.4: Odporový Théveninův model akumulátoru.[6]

Odporový model má dva typy vnitřních odporů, kde  $R_c$  je odpor pro nabíjení a odpor  $R_d$  pro vybíjení. Tyto odpory charakterizují veškeré energetické (elektrické i neelektrické) ztráty. Ideální diody jsou určeny pouze pro logické vyjádření rozdílu mezi nabíjecím a vybíjecím odporem a nemají žádný hlubší význam.[6][7]

Tento model je jednodušší a lepší jako předchozí model, avšak nebere v úvahu stav nabití akumulátoru nebo kapacitní účinky. Například vznik přechodových jevů při skokové změně vybíjecího proudu v akumulátoru.[6]

### 2.2.5 Upravený odporový (Théveninův) model

Odporový model byl upraven přidáním kondenzátoru  $C$  (polarizační kapacita) a odporu  $R_b$  pro zohlednění kapacitních účinků, které mají za následek vznik přechodových jevů v akumulátoru, viz obrázek 2.5. Model je exaktně popsán pomocí dvou rovnic. Rovnice (2.3) popisuje změnu napětí při vybíjení a rovnice (2.4) při nabíjení. Výsledný proud procházející akumulátorem je dán rovnicí (2.5).[6]

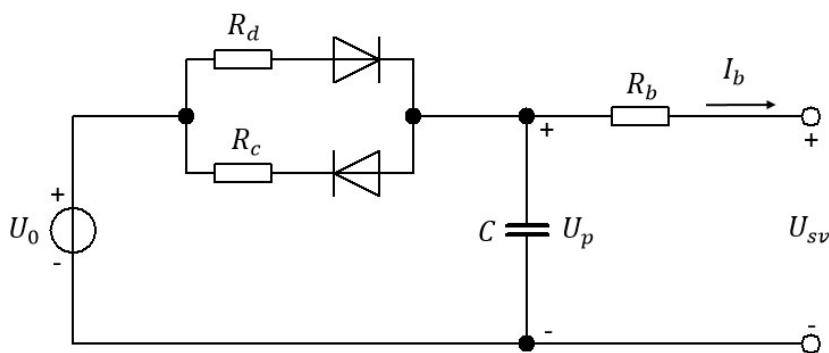
Jedná se o jednoduchý dynamický model, neboť hodnota „polarizační kapacity“  $C$  závisí na stavu nabití, na teplotě a na typu konstrukce akumulátoru. Samozřejmostí je zohlednění elektrických a neelektrických ztrát při nabíjení a vybíjení pomocí  $R_d$  a  $R_c$  odporů, stejně

jako u odporového modelu. Tento model se v některých případech používá pro simulaci elektrických nebo hybridních vozidel.[7]

$$\frac{dU_p}{dt} = -U_p \frac{1}{R_d C} + U_0 \frac{1}{R_d C} - I_b \frac{1}{C}, \quad U_p \leq U_0 \quad (2.3)$$

$$\frac{dU_p}{dt} = -U_p \frac{1}{R_c C} + U_0 \frac{1}{R_c C} - I_b \frac{1}{C}, \quad U_p > U_0 \quad (2.4)$$

$$I_b = \frac{U_p - U_0}{R_b} \quad (2.5)$$



Obrázek 2.5: Upravený odporový (Théveninův) model.[6]

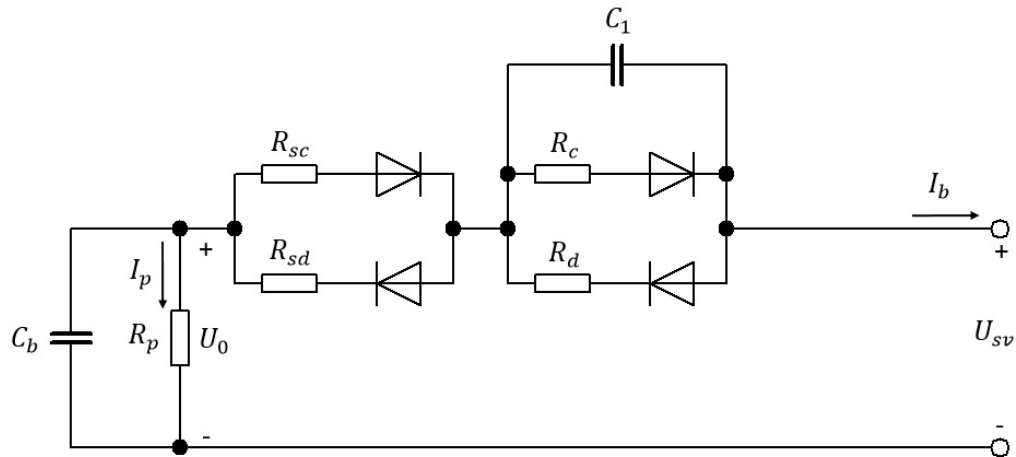
### 2.2.6 Vylepšený (Théveninův) ekvivalentní model

Vylepšený dynamický model, viz obrázek 2.6, vznikl na základě experimentálních testů a přezkoumání výrobních specifikací. Velkým přínosem tohoto modelu je zohlednění všech nelineárních charakteristik akumulátoru během nabíjení a vybíjení, které se mění podle stavu nabití. Model vychází z jednoduchého a z Théveninova modelu, kde navíc eliminuje všechny jejich nedostatky.[5]

Vylepšený ekvivalentní model je složen ze samovybíjecího rezistoru  $R_p$ , který modeluje malé proudové úniky uvnitř akumulátoru při odpojené zátěži. Dále z odporové větve z rezistorů  $R_{sc}$  pro nabíjení a  $R_{sd}$  pro vybíjení, které simulují vnitřní rezistivitu akumulátoru. Ta charakterizuje elektrický odpor elektrolytu a elektrod. Druhá větev složená z rezistorů  $R_c$  pro nabíjení a  $R_d$  pro vybíjení jsou určena pro charakterizaci přepětí v akumulátoru, kde jejich hodnoty se výrazně zvyšují v důsledku difúze elektrolytu<sup>2</sup>. Kondenzátor  $C_1$  cha-

<sup>2</sup>Rozdílná hustota reaktantů v elektrolytu a na elektrodách při nabíjení/vybíjení. Rozdíl je tím větší, čím větším proudem je akumulátor vybíjen/nabíjen a čím více je akumulátor vybit/nabit. Důsledkem je rostoucí rezistivita uvnitř akumulátoru.

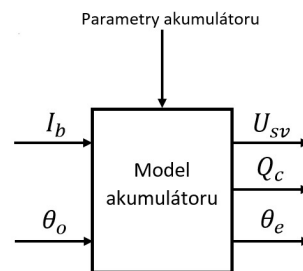
arakterizuje kapacitní dvojrstvu mezi elektrodou a elektrolytem. Kondenzátor  $C_b$  modeluje kapacitu akumulátoru jako zdroj napětí.[5][7]



Obrázek 2.6: Vylepšený ekvivalentní model.[6]

### 2.2.7 Third-Order model

Tento dynamický model zohledňuje více faktorů, které mají vliv na činnost akumulátoru, viz obrázek 2.7. Jedná se o teplotu prostředí  $\Theta_o$  a elektrolytu  $\Theta_e$ , vybíjecí/nabíjecí proud  $I_b$ , stav nabití akumulátoru  $Q_c$  (odebraná kapacita) a výstupní napětí  $U_o$ . [6]

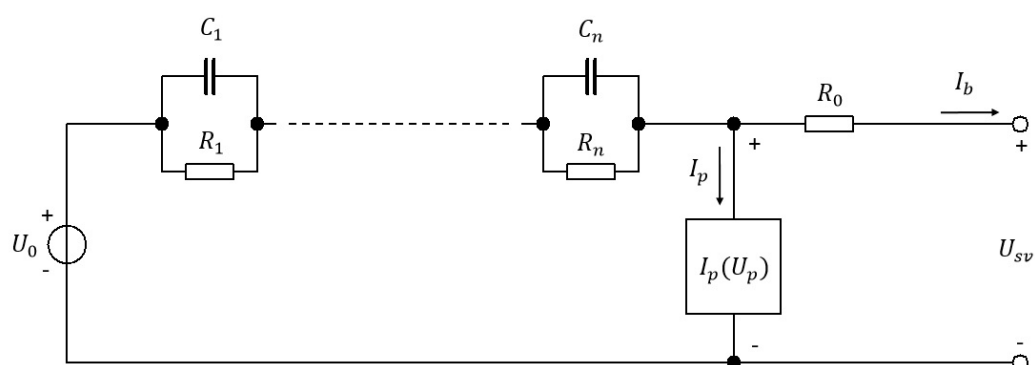


Obrázek 2.7: Obecné schéma dynamického modelu akumulátoru.[6]

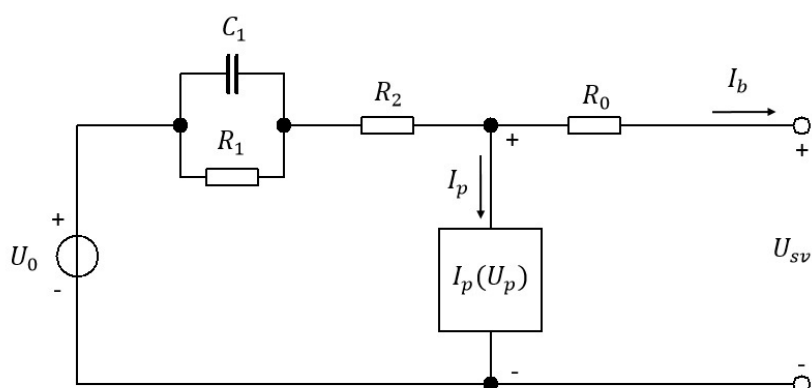
Ekvivalentní obvod third-order modelu je zobrazen na obrázku 2.8. Model má dvě důležité části (větvě). Hlavní reakční větev a parazitní reakční větev. Hlavní větev je složená z dvou RC článků, které charakterizují dynamické chování akumulátoru (odezva akumulátoru). Hodnoty odporů a kondenzátorů v RC blocích nejsou konstantní a mění se v závislosti na teplotě elektrolytu a stavu nabití akumulátoru.[6]

## 2. MODEL AKUMULÁTORU

Parazitní větev charakterizuje chování akumulátoru při nabíjení (zejména ke konci nabíjení a přebíjení), kdy dochází ke změnám proudové hustoty na elektrodách v akumulátoru. Parazitní větev zohledňuje také samovybíjení. U lithiových akumulátorů se parazitní větev často vynechává z důvodu velké coulombické účinnosti<sup>3</sup> a velice malému samovybíjení. Výhodou tohoto modelu je zohlednění teplotních vlivů na činnost akumulátoru. Nevýhodou je značná složitost určování hodnot jednotlivých prvků v obvodu, které se navíc dynamicky mění.[6][9][10]



Obrázek 2.8: Third-order model.[6]



Obrázek 2.9: Third-order model pro olověný akumulátor. [6]

<sup>3</sup>Coulombická účinnost je vztah mezi vybičející a nabíjecí nábojovou kapacitou.[8]

### 2.2.8 Impedanční modely

Jsou modely využívající elektrochemické impedanční spektroskopie (EIS), což je metoda, kterou lze určit elektrické vlastnosti elektrochemického systému. Metoda je založená na měření odchylky (rušení) elektrochemického systému pomocí proudového nebo napěťového signálu sinusového tvaru o malé amplitudě a následným měřením komplexní impedance  $Z$  v závislosti na frekvenci  $f$ . [11]

Díky tomu lze zmapovat charakter jak rychlých elektrodových dějů (přenos náboje), tak i pomalých dějů (difuzní děje). Výstupem z měření je impedanční spektrum zobrazené do Nyquistova diagramu, kde reálná složka představuje rezistivitu článku a imaginární složka představuje reaktanci. [11]

Důvodem použití této metody je snaha zachovat chování v lineární oblasti, neboť výstup bude sinusový s různými amplitudami a fázovými posuny. [11]

Stanovení elektrických vlastností systému se provádí aproximací modelem ekvivalentního obvodu, který lze odvodit z chování systému dle impedančního spektra. Jednotlivým prvkům ekvivalentního obvodu je pak přiřazen fyzikální význam. Pro komplexnější modely se využívá Randlesův obvod složený z rezistoru, kondenzátoru a impedance, viz obrázek 2.10. [11]

Konkrétně se skládá z rezistoru  $R_{int}$  (vnitřní elektrický odpor) charakterizující vodivost mezi elektrodami a separátorem. V sériovém zapojení je RC článek, kde rezistor  $R_{SE}$  a kondenzátor  $C_{SE}$  charakterizují elektrický odpor a kapacitu nevodivé vrstvy na elektrodách. V sériovém zapojení s prvním RC článkem se vyskytuje ještě druhý RC článek s kondenzátorem  $C_{CT}$  charakterizující kapacitní dvojrstvu mezi elektrodou a elektrolytem a rezistorem  $R_{CT}$  charakterizující elektrický odpor při přenosu náboje. K rezistoru  $R_{CT}$  je navíc sériově zapojen rezistor s impedancí  $Z_W$ , který modeluje Warburgovu<sup>4</sup> impedanci. [7]

Impedanční modely fungují pouze pro pevně daný stav nabití a teplotu a tudíž nejsou schopny předpovědět změnu napětí akumulátoru v průběhu nabíjení a vybíjení. [12]

### 2.2.9 Run-time model

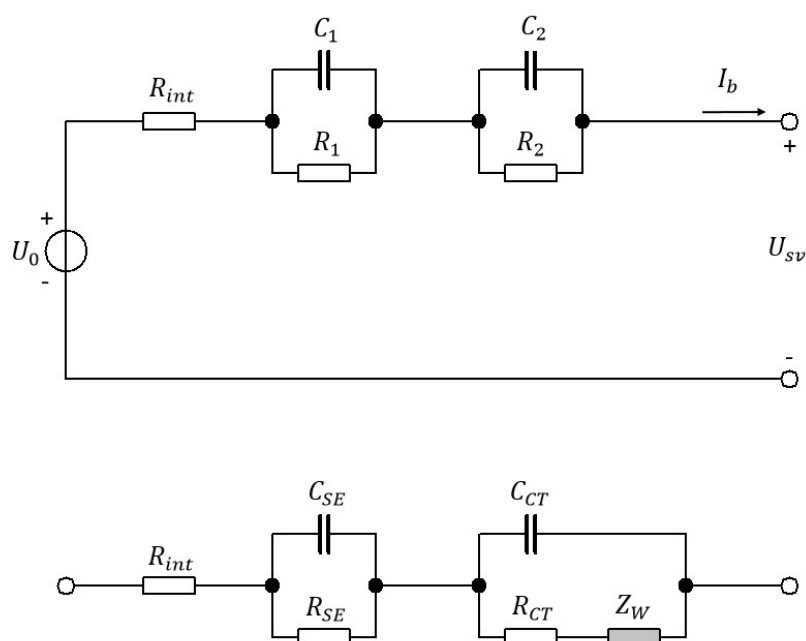
Je to komplexní model určený pro simulaci stavu napětí akumulátoru v průběhu nabíjení a vybíjení konstantním proudem. Run-time model zohledňuje stav napětí akumulátoru při různém stavu nabití, aktuální kapacitu na základě míry vybíjení a celkovou velikost elektrického náboje (kapacity) odvíjející se od četnosti vybíjecího proudu. Ve velmi omezené míře dokáže zohledňovat přechodové jevy v akumulátoru. [7]

Model je rozdělen do tří oddělených obvodů, viz obrázek 2.11. Levý obvod charakterizuje závislost stavu nabití na četnosti vybíjení. Jinými slovy zohledňuje degradaci celkové kapacity akumulátoru s narůstajícím počtem cyklů a stárnutím. Skládá se z rezistoru  $R_0$ , kondenzátoru  $C_0$  a z napěťového zdroje řízeného napětím  $U_{c-rate}$ . Rezistor  $R_0$  a kondenzátor  $C_0$  tvoří filtr dolní propusti za účelem kontroly  $U_{c-rate}$ . [7][13]

Prostřední obvod charakterizuje závislost stavu nabití akumulátoru na rychlosti vybíjení. Skládá se z napěťového zdroje řízeného proudem  $U_{lost}$ , z kondenzátoru  $C_{bat}$ , z rezistoru  $R_{sdis}$

<sup>4</sup>Warburgova impedance popisuje difúzní řízené procesy, respektive popisuje difúzi iontů na přechodu elektroda-elektrolyt.





Obrázek 2.10: (a) Impedanční model, (b) Randlesův obvod.[7]

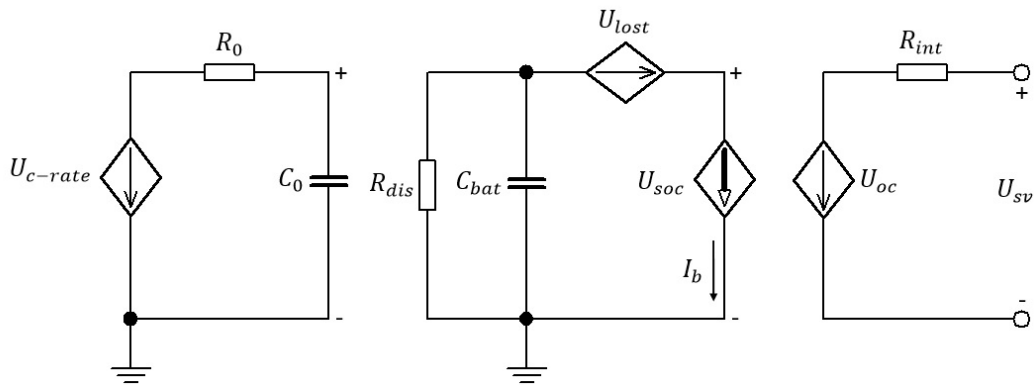
a ze zdroje proudu řízeného proudem  $I_b$  ( $U_{SOC}$ ).  $U_{lost}$  indikuje míru vybíjení z čehož plyne, že řídí stav nabití a tudíž i výstupní napětí akumulátoru. Velikost  $U_{lost}$  závisí na míře vybíjení, která je modelována pomocí vyhledávací tabulky (look-up table). Kondenzátor  $C_{bat}$  charakterizuje kapacitu akumulátoru a rezistor  $R_{sdis}$  charakterizuje samovybíjení akumulátoru.[7][13]

Poslední pravá část obsahuje napěťový zdroj řízený napětím  $U_{oc}$  charakterizující napětí naprázdno a rezistor  $R_{int}$  charakterizuje vnitřní elektrický odpor akumulátoru.[7]

### 2.2.10 Kombinovaný obvodový model

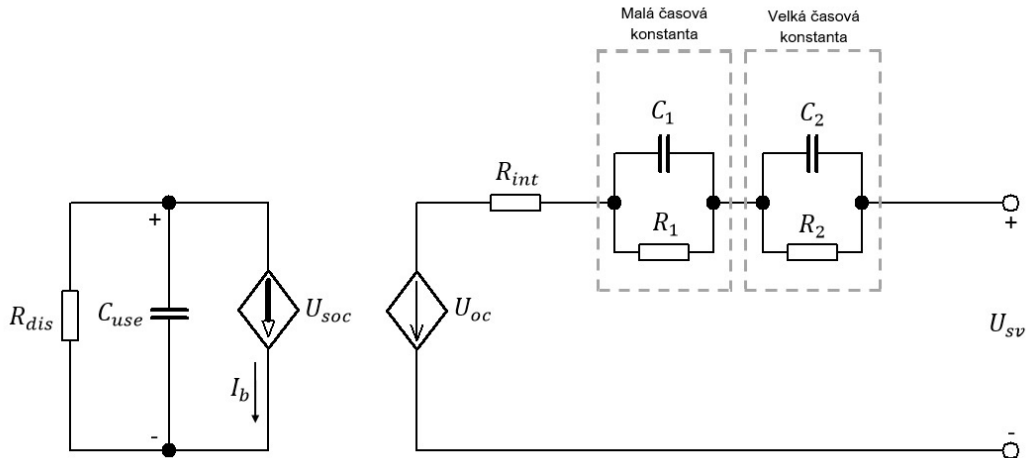
Tento model je kombinací Théveninového, impedančního a run-time modelu. Obsahuje dvě oddělené části, viz obrázek 2.12. První část charakterizující energetické bilance, modeluje kapacitu akumulátoru, zbývající množství energie (kapacity) v akumulátoru, samovybíjení a stav napětí v určitém čase vybíjení/nabíjení. Kapacita akumulátoru je indikována pomocí kondenzátoru  $C_{use}$ , na kterém se mění napětí mezi 0 V a 1 V  $U_{soc}$ , které je rovnocenné stavu nabití akumulátoru tak, že lze poté použít procentuální vyjádření stavu nabití namísto  $U_{soc}$ . Samovybíjení je charakterizováno odporem  $R_{sdis}$ . [7]

Druhá část charakterizuje napěťové odezvy (přechodové jevy) akumulátoru, která modeluje závislost změny napětí na zatěžovacím proudu.  $U_{oc}$  je závislý zdroj napětí (napětí naprázdno), jehož hodnota je určována (řízena) podle stavu nabití akumulátoru ( $U_{soc}$ ). Odpor  $R_{int}$  charakterizuje vnitřní odpor akumulátoru. První RC článek charakterizuje



Obrázek 2.11: Run-time model.[7]

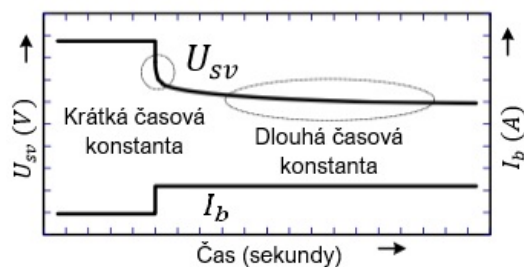
krátkou časovou konstantu reakce napětí (pokles napětí při skokové změně proudu, viz obrázek 2.13), které jsou závislé na odporu při přenosu náboje  $R_{sdis}$  a na kapacitní dvojvrstvě mezi elektrodou a elektrolytem  $C_{ct}$ . Druhý RC člunek (jednoduchý Randlesův obvod) charakterizuje Warburgovu impedanci (dlouhá časová konstanta) za účelem modelování difúzních jevů v akumulátoru.[7]



Obrázek 2.12: Kombinovaný obvodový model.[7]

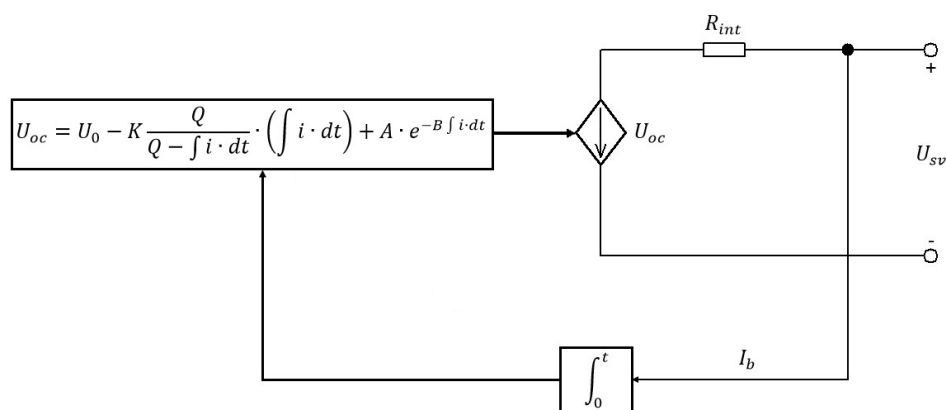
### 2.2.11 Generický (obecný) model

Tento generický model se skládá s řízeného zdroje napětí a konstantního odporu (viz. obrázek 2.14, který může být použit pro modelování různých typů elektrochemických aku-



Obrázek 2.13: Pokles napětí při skokové změně proudu v RC člancích.[12]

mulátorů. Každý typ akumulátoru má svoje vlastní matematické vyjádření výpočtu napětí naprázdno, které je poté nastaveno na řízeném napěťovém zdroji. Je velice jednoduchý díky možnosti extrahovat dynamické parametry akumulátoru z dat uvedených v katalogových listech výrobců akumulátorů.[7][14]



Obrázek 2.14: Generický model.[7]

Tento model je založen na Shepherdově rovnici (rovnice (2.6)), která popisuje elektrochemické chování akumulátoru z hlediska proudu a napětí. Konkrétně představuje vztah nelineární změny napětí na velikosti odebíraného proudu a na aktuálním stavu nabití akumulátoru. Díky této rovnici lze vyvodit svorkové napětí jak pro nabíjení tak i pro vybíjení, vnitřní odpor akumulátoru, napětí naprázdno, vybíjecí proud a stav nabití.[7][14]

$$U_{oc} = U_0 - \underbrace{K \frac{Q}{Q - \int i dt}}_{\text{Polarizační odpor}} i - R_0 i \quad (2.6)$$

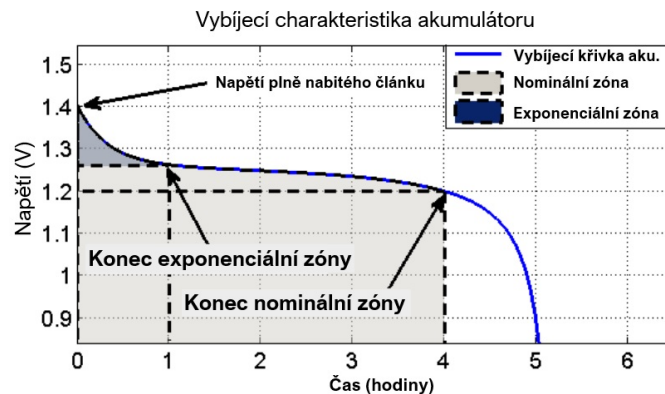
Kde  $U_{oc}$  je napětí naprázdno,  $U_0$  je konstantní napětí akumulátoru,  $Q$  je kapacita akumulátoru,  $K$  je polarizační konstanta (polarizační odpor),  $R_0$  je vnitřní odpor aku-

mulátoru a  $i$  je proud procházející akumulátorem. Dále v rovnici je nelineární výraz (zlomek), který vyjadřuje velikost napětí na základě stavu nabití akumulátoru (velikosti elektrického náboje) a odebíraného proudu. Polarizační konstanta spolu s nelineárním výrazem tvoří takzvaný polarizační odpor <sup>5</sup>, kterým protéká proud.[7][14]

Když je akumulátor skoro vybit a neproudí již žádný vybíjecí proud, tak svorkové napětí se přiblíží velice blízko ke konstantnímu napětí  $U_0$ . Jakmile ale začne znova téct obvodem vybíjecí proud, napětí prudce klesne. Tohle chování odpovídá reálnému akumulátoru, avšak matematický (Shepherdův) model, způsobuje při simulaci algebraickou smyčku. Výsledkem je nestabilní simulace a proto je namísto polarizačního odporu použito polarizační napětí. Výsledná rovnice vypadá takto:[7][14]

$$U_{oc} = U_0 - \underbrace{K \frac{Q}{Q - \int i dt}}_{\text{Polarizační napětí}} \int i dt + A \cdot e^{(-B \cdot \int i dt)} \quad (2.7)$$

Kde  $A$  je amplituda exponenciální zóny,  $B$  je časová konstanta exponenciální zóny (viz. obrázek 2.15) a  $K$  je polarizační konstanta (v tomto případě polarizační napětí). Nyní se velikost napětí odvíjí pouze od stavu nabití. Ve výsledku to znamená, že pokud je akumulátor téměř vybitý a žádný vybíjecí proud již neprotéká, napětí bude téměř rovno nule.[14]



Obrázek 2.15: Vybíjecí charakteristika akumulátoru.[14]

Tento model předpokládá, že vnitřní odpor akumulátoru  $R_{int}$  se nemění v průběhu nabíjení a vybíjení. Dále model nezohledňuje Peukertův efekt<sup>6</sup>, samovybíjení, teplotu akumulátoru a ani paměťový efekt, který se vyskytuje u některých typů akumulátorů. Navíc model předpokládá, že parametry akumulátoru jsou stejné jak pro vybíjení tak i pro

<sup>5</sup>Potenciální rozdíl na odporu elektrody za průchodu proudu.

<sup>6</sup>Vyjadřuje závislost kapacity akumulátoru na rychlosti vybíjení. Se zvětšujícím vybíjecím proudem se celková kapacita akumulátoru nelineárně zmenšuje.

nabíjení. Což u reálného akumulátoru neplatí. Posledním nedostatkem je absence omezení maximální dosažitelné kapacity při nabíjení. Znamená to, že pokud akumulátor je přebíjen, tak stav nabití přesáhne 100%. [14]

### 2.2.12 Upravený generický model

Upravený generický model eliminuje nedostatky předchozího modelu a značně jej vylepšuje. Zásadní změnou je zohlednění rozdílného chování akumulátoru při nabíjení a vybíjení. Model je charakterizován dvěma rovnicemi, kde první rovnice charakterizuje průběh vybíjení a druhá průběh nabíjení. Obě rovnice ((2.8) a (2.9)) vycházejí stejně jako u předchozího modelu z Sheperdovi rovnice: [7]

$$U_{dis} = U_0 - \underbrace{K_{dv} \frac{Q}{Q - \int i dt} \int i dt}_{\text{Polarizační napětí}} - R_0 i + A \cdot e^{(-B \cdot \int i dt)} - \underbrace{K_{dr} \frac{Q}{Q - \int i dt} i^*}_{\text{Polarizační odpor}} \quad (2.8)$$

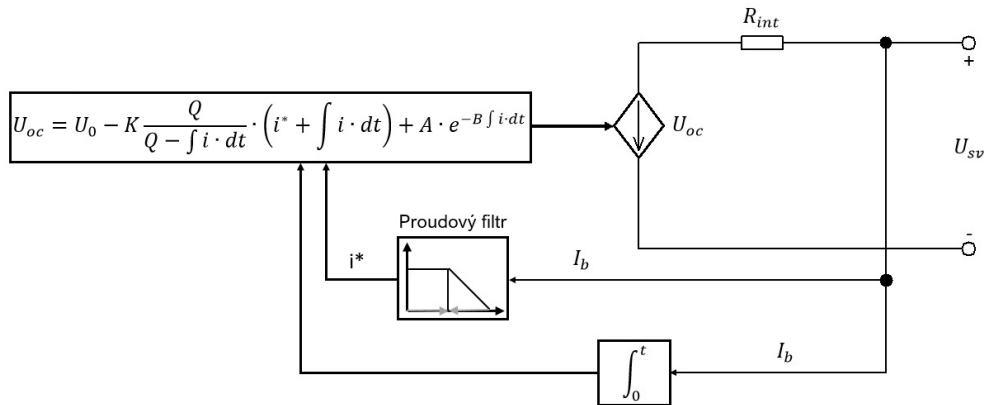
$$U_{char} = U_0 - \underbrace{K_{cv} \frac{Q}{Q - \int i dt} \int i dt}_{\text{Polarizační napětí}} - R_0 i + A \cdot e^{(-B \cdot \int i dt)} - \underbrace{K_{cr} \frac{Q}{\int i dt - \lambda Q} i^*}_{\text{Polarizační odpor}} \quad (2.9)$$

Kde  $Q$  je kapacita akumulátoru,  $K_{dr}$  a  $K_{cr}$  jsou polarizační konstanty pro vybíjení a nabíjení. Díky zavedení filtračního proudu  $i^*$  do modelu se vyřešily algebraické smyčky, neboť polarizační proud protéká skrz polarizační odpor a vzniká tak polarizační napětí. Hodnoty polarizačního napětí jsou odlišné pro nabíjení a vybíjení. Úpravu (posunutí) polarizačního odporu v průběhu nabíjení symbolizuje  $\lambda$ . Teoreticky je polarizační odpor při plně nabitém akumulátoru (nulový vybíjecí proud) roven nekonečnu, avšak v praxi bylo experimentálním měřením dokázáno, že hodnota polarizačního odporu je posunuta přibližně o 10% kapacity akumulátoru níž. Odpor  $R_0$  charakterizuje vnitřní odpor akumulátoru při nabíjení a vybíjení.  $K_{dv}$  a  $K_{cv}$  jsou polarizační konstanty zohledňující polarizační napětí. Výraz  $A + \exp(-B \cdot \int i dt)$  popisuje chování napětí v exponenciální zóně, kde se projevuje nelineární hystereze mezi nabíjecím a vybíjecím cyklem. [15][7]

I když je upravený generický model vylepšený, stále oplývá jistými nedostatky, které modelování akumulátoru značně omezují. Jedná se například o neměnný vnitřní odpor, kapacita akumulátoru se nemění s velikostí odebíraného proudu, nejsou zahrnuty teplotní vlivy a není zohledněno samovybíjení. [7][15]

Dále model má určité limity jako například v hodnotách napětí, kde nejnižší možná hodnota je 0 V a nejvyšší možná hodnota je rovna dvojnásobku  $U_0$ . Obdobná situace je u kapacity akumulátoru, kde minimální kapacita je 0 Ah a maximální kapacita není nijak limitována. Co se týče přebíjení, tak akumulátor již nemůže být nabit na víc jak 100%. [15]

Výhodou tohoto modelu je možnost použití pro široké spektrum typů akumulátorů a jeho jednoduchost. Další neopomenutelnou výhodou je možnost extrahovat dynamické parametry akumulátoru z dat v uvedených v katalogových listech a tím odpadá nutnost



Obrázek 2.16: Modifikovaný generický model.[7]

složitého odvozování a experimentálního měření akumulátoru. To je samozřejmě na úkor přesnosti a různých limitů, kterým se model nedokáže vyhnout.

Nicméně tento model je implementován do Matlabu/Simulinku jako knihovna, kde je používán pro modelování trakčních systémů, které se například vyskytují v hybridních vozech.[15]

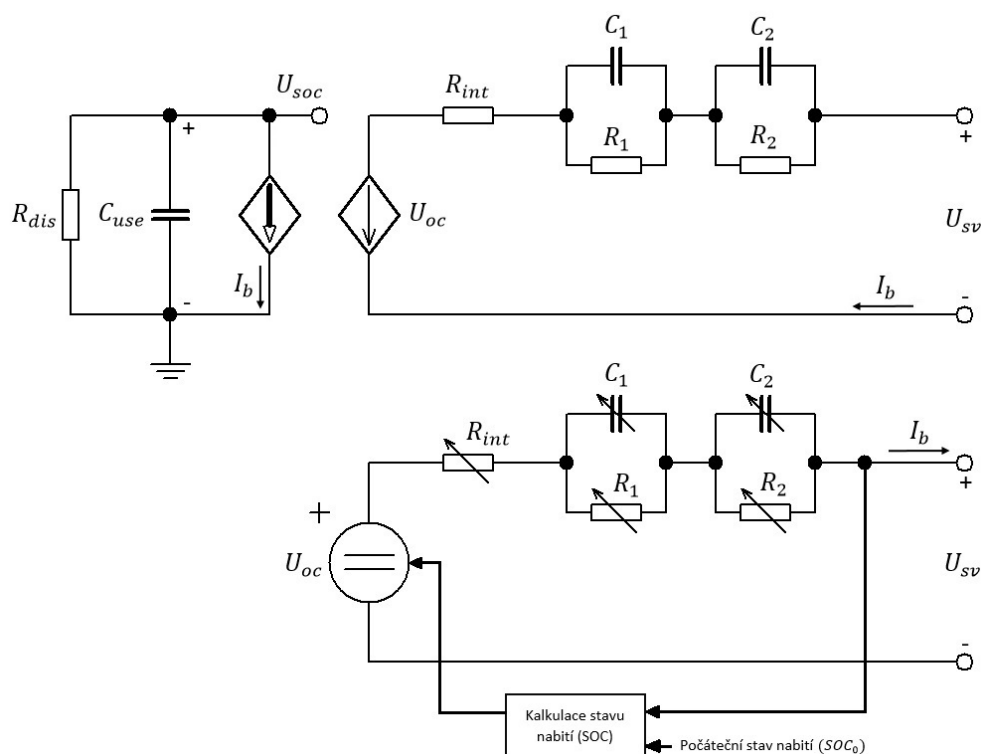
## 2.3 Modelování akumulátoru v prostředí Matlab/Simulink

Pro modelování a simulaci akumulátoru byl zvolen program Simulink, který je součástí programu Matlab. Simulink je vhodný nástroj pro simulaci dynamických systémů a elektronických obvodů. Samotný proces vytváření modelu je velice intuitivní a interaktivní, neboť Simulink poskytuje přehledné uživatelské rozhraní. Samotný model je tvořen pomocí základních spojitých, diskretních a nelineárních bloků, které v sobě ukrývají jednotlivé matematické operace a funkce.

Samotný Matlab/Simulink již obsahuje model akumulátoru (upravený generický model, viz sekce 2.2.12), avšak díky jistým limitům a nevýhodám byl zvolen jiný model akumulátoru. Jelikož se jedná konkrétně o simulaci lithiových akumulátorů  $LiFePO_4$  o jmenovité kapacitě 200Ah a jmenovitém napětí 12,8 V, jako nejvhodnější byl vybrán kombinovaný obvodový model, který již byl popsán v sekci 2.2.10. Jedná se o nelineární dynamický model, který je schopen naplnit požadavky zmíněné v sekci 2.1 a plně dostačuje pro modelování chování bateriových článků, respektive akumulátoru.

Na obrázku 2.17 je vyobrazen zvolený kombinovaný obvodový model a jeho překreslení do podoby dynamického ekvivalentu, který v této podobě je poskládán v Simulinku pomocí bloků.[16]

Oproti modelu implementovaného v Simulinku, u kterého stačí vyčíst parametry pouze z katalogového listu výrobce, je tento model mnohem složitější. Složitost spočívá v nutné extrakci parametrů akumulátoru z experimentálního měření. Tato složitost je naštěstí „vykou-



Obrázek 2.17: Kombinovaný obvodový model a jeho dynamický ekvivalent.[16]

pena“ mnohem větší dynamičností, podáním přesnějších VA charakteristik a zohledněním přechodových jevů.

Model se skládá ze základních prvků jako je zdroj stejnosměrného napětí  $U_{oc}$ , vnitřní rezistor  $R_{int}$  a dvou RC článků. Napěťový zdroj charakterizuje napětí naprázdno, vnitřní rezistor modeluje vnitřní elektrický odpor akumulátoru a dva RC články modelují přechodové jevy (stavy) napětí na akumulátoru. Výsledné napětí na akumulátoru je vyjádřeno napětím na svorkách  $U_{sv}$ .

Samozřejmostí při modelování akumulátoru je zohlednění vlivu vybíjecího proudu na celkovou kapacitu akumulátoru, kde s narůstajícím vybíjecím proudem klesá celková kapacita.

Parametry jednotlivých prvků v obvodu závisí na stavu nabití akumulátoru a vybíjecím proudem. Tuto vazbu je nutno zohlednit. Proto celý model v Simulinku se skládá z pěti subsystémů, které v podstatě upravují a mění výsledné napětí akumulátoru na základě stavu nabití a vybíjecího proudu. Jedná se o subsystém pro výpočet stavu nabití akumulátoru (SOC), výpočet napětí naprázdno  $U_{oc}$ , dynamicky se měnící parametry prvků v RC člancích, napětí na RC člancích a napětí na vnitřním odporu  $R_{int}$ .

Základní princip modelu spočívá na dodatečném dopočítání svorkového napětí na základě velikosti elektrického odporu zátěže a vybíjecího proudu, který protéká zátěží. V modelu

je tedy zavedena zpětná vazba vybíjecího proudu  $I_b$  do jednotlivých subsystémů. Tyto subsystémy a jejich funkce jsou podrobněji popsány v následujících sekcích.

### 2.3.1 Použitelná kapacita $C_{CAP}$ a stav nabití akumulátoru $SOC$

Při vybíjení akumulátoru z plně nabitého stavu do úrovně napětí, charakterizující vybitý stav, dochází k odebrání „uskladněné“ elektrické energie z akumulátoru. Tato uskladněná energie je definována jako použitelná kapacita respektive nominální kapacita, na kterou se projevují určité vlivy, které její velikost snižují. Jedná se například o počet cyklů, velikost vybíjecího proudu, doba uchovávání energie v akumulátoru, teplota elektrolytu atd.[12]

Tento jev může být modelován jako kondenzátor, který představuje elektrický náboj uchovaný v akumulátoru. Hodnota použitelné kapacity  $C_{use}$  vychází z rovnice (2.10), kde  $C$  vyjadřuje elektrický náboj akumulátoru,  $f_1$  je korekční faktor počtu cyklů a  $f_2$  je korekční faktor teplotní závislosti akumulátoru.[12]

$$C_{use} = 3600 \cdot C \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (2.10)$$

Avšak tyto dva korekční součinitele jsou zanedbány. Faktor  $f_1$  upravující kapacitu na základě počtu cyklů je zanedbán, neboť experimentálně měřené akumulátory jsou téměř nové, a díky tomu lze vliv „opotřebovanosti“ zanedbat. Navíc u LiFePO akumulátorů je tato závislost značně menší než je tomu u jiných typů akumulátorů. Nemá tedy až tak významný vliv na výslednou kapacitu.

Faktor  $f_2$  je zanedbán z důvodu provozování akumulátorů v klimatizované místnosti, kde se teplota pohybuje v rozmezí 22,7° - 25°C. Vzhledem k tomu, že výrobce udává nominální kapacitu při 25°C, není důvod korekčním faktorem nijak upravovat výslednou kapacitu akumulátoru.

Počáteční stav nabití akumulátoru je v modelu řešen numericky pomocí počátečního stavu napětí  $U_{soc}$  na kondenzátoru  $C_{use}$  jak je znázorněno v náhradním schématu 2.17. To znamená, že stav nabití akumulátoru představuje určité napětí, které se pohybuje od 0 V pro stav vybití 0% do 1 V pro 100% stav nabití.[12]

Pro zjištění aktuálního stavu nabití akumulátoru je potřeba znát počáteční stav před vybíjením a od něj odečtenou převrácenou hodnotu nominální kapacity akumulátoru násobenou proudem tekoucí skrz akumulátor, který je integrován podle času (lichoběžníková metoda), viz rovnice (2.11).

$$U_{soc}(t) = U_{soc}(0) - \frac{1}{C_{use}} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (2.11)$$

Kde  $U_{soc}(0)$  představuje počáteční stav nabití,  $U_{soc}(t)$  aktuální stav nabití akumulátoru a  $C_{use}$  je nominální kapacita akumulátoru v ampérhodinách.

Pro modelování nabíjení a vybíjení akumulátoru je potřeba zanést do modelu proudový zdroj řízený proudem, který je v modelu označen jako  $I_b$ . Tento proudový zdroj má za úkol nabíjet nebo vybíjet kondenzátor  $C_{use}$  a díky tomu se stav nabití akumulátoru (SOC), zastupujícím napětím  $U_{soc}$ , mění dynamicky.



U reálných akumulátorů dochází se vzrůstajícím vybíjecím proudem ke snižování nominální kapacity. Tuto charakteristickou vlastnost je nutné zohlednit také v modelu. Jak jde vidět z rovnice (2.11), nikde nedochází numericky ke změně nominální kapacity na základě velikosti vybíjecího proudu, neboť se jedná pouze o rovnici vyjadřující uchování určité elektrické energie.

Jsou dvě možnosti jak zavést tuto vlastnost do modelu. První z nich je využít Peukertův zákon (viz rovnice (2.12)), která definuje závislost kapacity akumulátoru na rychlosti vybíjení. Princip spočívá v umělém navýšení velikosti vybíjecího proudu  $I$  pomocí Peukertovy konstanty  $k$ .

$$C_p = I^k \cdot t \quad (2.12)$$

Kde  $C_p$  je jmenovitá kapacita při vybíjení po dobu  $p$  hodin a  $t$  je požadovaný čas vybíjení. V praxi se ale tato formulace Peukertova zákona nepoužívá. Proto je vhodné Peukertův zákon přeformulovat tak, aby výsledkem byla upravená jmenovitá kapacita v závislosti na daném vybíjecím proudu. Tento vztah popisuje rovnice (2.13).

$$It = C \left( \frac{C}{IH} \right)^{k-1} \quad (2.13)$$

Kde  $H$  je čas do plného vybití jmenovité kapacity akumulátoru,  $C$  je jmenovitá kapacita akumulátoru a  $I$  je proud, kterým bude akumulátor vybíjen.

Výhoda Peukertovy rovnice je jednoduchost a univerzálnost, neboť stačí zadat parametry z katalogových listů. Bohužel to je vykoupeno přesností, kde chyba predikce může činit až 100%. Navíc Peukertova konstanta nezohledňuje samovybíjení při nízkých vybíjecích proudech.

Druhá možnost je na základě experimentálního měření vytvořit look-up tabulku a data vyčítat z ní. Akumulátor se vybije různými proudy až do stavu vybití. Následně získané kapacity z akumulátoru se vloží do grafu a body se proloží polynomiální funkcí druhého řádu. Tato metoda je mnohem přesnější, avšak za cenu časově náročné extrakce parametrů.

Na velikosti vybíjecího proudu  $I_b$  závisí další parametry jako napěťové úbytky na vnitřním odporu  $R_{int}$  a na odporech  $R_1$ ,  $R_2$  v RC člancích. To znamená, že pro různé vybíjecí proudy jsou různé stavy nabití akumulátoru a také různé napěťové úbytky na rezistorech  $R_{int}$ ,  $R_1$  a  $R_2$ .

Pro simulaci disipace energie při dlouhodobém nepoužívání akumulátoru (samovybíjení) slouží rezistor  $R_{dis}$ . Teoreticky je rezistor  $R_{dis}$  funkcí stavu nabití, teploty a počtu cyklů. V praxi postačí zjednodušení právě v podobě rezistoru, kde v některých případech může být zcela ignorován, pokud dochází ke každodennímu nabíjení a vybíjení akumulátoru. Samovybíjení, které má vliv na stav nabití akumulátoru se projevuje až v řádech měsíců.

### 2.3.2 Napětí naprázdno $U_0$

Další důležitou hodnotou je napětí naprázdno akumulátoru v rovnovážném stavu, tzn. ve stavu, kdy nedochází k vybíjení. Napětí naprázdno se mění na základě různé úrovně

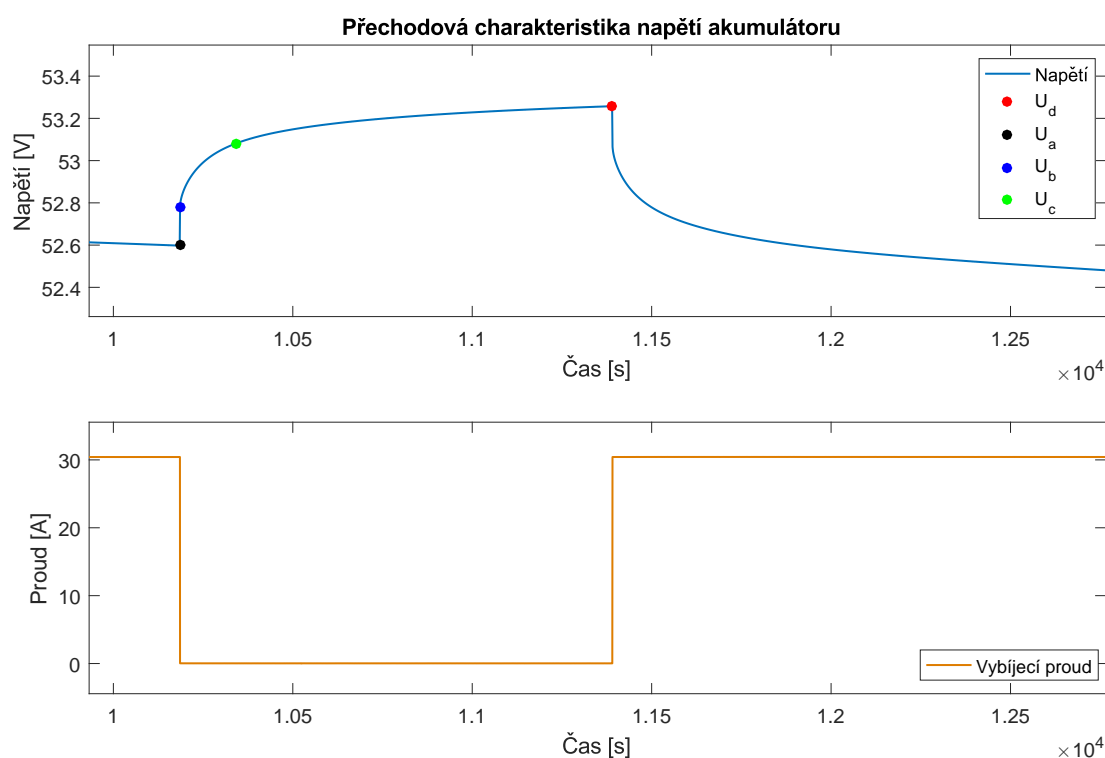
kapacity, lépe řečeno na základě stavu nabití akumulátoru.

Tuto nelineární závislost je nutné také zahrnout do modelu. K tomu slouží napěťový zdroj řízený napětím  $U_{oc}(U_{soc})$ .

Vztah mezi napětím naprázdno a stavem nabití je stanoven z experimentálního měření, kde jednotlivá napětí naprázdno jsou získány z pulsního vybíjení (PDT) ve fázi relaxace. Hodnoty jsou měřeny ve stejných intervalech, většinou po vybití 10% nominální kapacity akumulátoru. Výsledné naměřené hodnoty (body) jsou proloženy polynomiální funkcí a pomocí extrapolace jsou získány zbývající hodnoty napětí.

### 2.3.3 RC články

Při změně z relaxačního do zátěžového stavu akumulátoru dochází na svorkách k určité napěťové odezvě. Tato přechodová charakteristika je znázorněna na obrázku 2.18, kde lze po podrobnějším pozorování vidět, že se celková odezva skládá nejen z krátkodobého (krátká časová konstanta) ale také z dlouhodobého (dlouhá časová konstanta) úbytku napětí na svorkách.[12][16]



Obrázek 2.18: Napěťová odezva akumulátoru v relaxačním a v zátěžovém stavu.

Tuto přechodovou charakteristiku mají za úkol modelovat dva RC články, kde první RC článek složený z  $R_1$ ,  $C_1$  charakterizuje krátkodobou odezvu napětí a druhý RC článek složený z  $R_2$ ,  $C_2$  charakterizuje dlouhodobou odezvu napětí.[16]

První RC článek modeluje kapacitní dvojrstvu mezi elektrodou a elektrolytem, jinými slovy modeluje chemickou kinetiku <sup>7</sup> akumulátoru. První RC článek modeluje dynamické chování akumulátoru při velkých změnách proudu (proudové rázy).[17]

Druhý RC článek má zásadní význam pro předpověď chování akumulátoru při nízkých vybíjecích proudech nebo při tzv. vyrovnávacích proudech <sup>8</sup> uvnitř akumulátoru. Je to dáno velikostí odporu  $R_2$  oproti  $R_1$  a  $R_{int}$ , který je mnohem větší a určuje tak napěťový úbytek při nízkých proudech.[17]

Pro větší přesnost lze použít víc jak dva RC články, avšak následkem je i značný nárůst složitosti obvodu. Dva RC články jsou ideálním kompromisem v přesnosti a zároveň zachování minimální složitosti. Modelování přechodové charakteristiky pomocí jednoho RC článku není vhodné z hlediska značné nepřesnosti při simulaci. Nepřesnost modelu se dvěma RC články se pohybuje v jednotkách milivoltů.[12]

Okamžitý pokles napětí na svorkách je způsoben vnitřním elektrickým odporem akumulátoru, který v náhradním schématu charakterizuje rezistor  $R_{int}$ . Tento elektrický odpor je závislý na elektrické vodivosti elektrolytu, z čehož plyne, že se postupným vybíjením akumulátoru zvětšuje. Na obrázku 2.18 je to část mezi napětím  $U_a$  a  $U_b$ [12]

Parametry dvou sériově řazených RC článků ( $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$  a  $C_2$ ) jsou určeny z přechodové charakteristiky napětí ze zátěžového stavu do relaxačního stavu. Parametry prvního RC článku jsou určeny z odezvy mezi napětím  $U_b$  a  $U_c$  (viz. obrázek 2.18), kde tato napěťová odezva charakterizuje krátkou časovou konstantu. Parametry druhého RC článku jsou určeny z odezvy mezi napětím  $U_c$  a  $U_d$ .

V akumulátoru při vybíjení nebo nabíjení probíhají vratné elektrochemické procesy, díky kterým se mění parametry akumulátoru. Tuto charakteristiku lze zavést do modelu díky dynamické změně parametrů prvků v obou RC člancích. Díky tomu lze dosáhnout mnohem větší přesnosti modelu. K výraznější změně parametrů RC článků dochází v rozsahu 20% - 0% stavu nabití akumulátoru.

Dynamické změny parametrů jsou řešeny pomocí 2D look-up tabulky, kde neznámé hodnoty jsou získány pomocí interpolace a extrapolace. Díky tomu vznikne spojitá křivka mezihodnot.

Parametry RC článků se nemění pouze na základě stavu nabití akumulátoru, ale také na velikosti vybíjecího/nabíjecího proudu. V případě potřeby dosáhnout ještě větší přesnosti, je nutné zavést proudovou závislost parametrů RC článků.[12]

Zavedením třetího parametru vznikne 3D look-up tabulka, kde stejně jako v předchozím případě vznikne pomocí extrapolace a interpolace spojitá plocha mezihodnot.

Získané parametry jsou poté použity pro získání výsledného napětí na jednotlivých RC člancích, viz. rovnice (2.14) pro první RC článek a rovnice (2.15) pro druhý RC článek. Při pohledu na náhradní schéma (obrázek 2.17) je zřejmé, že napětí v podstatě vyjadřují

---

<sup>7</sup>Rychlost chemických reakcí.

<sup>8</sup>Jedná se o proud, který teče mezi jednotlivými články v akumulátoru. Tento jev nastává v případě, kdy jeden článek má nižší napětí než ten druhý a takzvaně ho dobíjí.

napěťové úbytky na RC člancích.

$$\frac{dU_1}{dt} = \frac{-1}{R_1 C_1} U_1 + \frac{1}{C_1} I_b \quad (2.14)$$

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{-1}{R_2 C_2} U_2 + \frac{1}{C_2} I_b \quad (2.15)$$

Při pohledu na rovnice (2.14) a (2.15) je jasně zřetelné, že se jedná o problematiku řešení přechodových jevů v RC obvodech 1. řádu. Při odpojené zátěži (ustálený stav) dostáváme pro napětí  $U_1$  na prvním RC článku rovnici (2.16) a pro napětí  $U_2$  na druhém RC článku (2.17). [18]

$$U_1 = U_1(0) \cdot e^{\frac{-t}{\tau_1}} \quad (2.16)$$

$$U_2 = U_2(0) \cdot e^{\frac{-t}{\tau_2}} \quad (2.17)$$

Kde  $\tau_1 = R_1 \cdot C_1$ ,  $\tau_2 = R_2 \cdot C_2$  jsou časové konstanty. [18]

Při sepnutí zátěže, nebo při nabíjení akumulátoru, dojde k přechodu z ustáleného stavu do přechodového stavu. Při tomto přechodovém jevu jsou napětí na RC člancích definovány rovnicemi (2.18) a (2.19). [18][19]

$$U_1 = I_b R_1 (1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}}) \quad (2.18)$$

$$U_2 = I_b R_2 (1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}}) \quad (2.19)$$

Z rovnic (2.18) a (2.19) lze poté vyjádřit jednotlivé parametry RC článků. Pro první RC článek jsou parametry získány pomocí rovnice (2.20) a (2.21), pro druhý RC článek jsou hodnoty získány podobným způsobem. [19]

$$R_1 = \frac{U_1}{I_b}; \quad (2.20)$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1}; \quad (2.21)$$

### 2.3.4 Vnitřní odpor $R_{int}$

Vnitřní odpor je vypočítán z okamžitého nárůstu napětí při přechodu ze zátěžového do relaxačního stavu akumulátoru, viz rovnice (2.22). Jedná se o napěťovou odezvu mezi  $U_a$  a  $U_b$  na obrázku 2.18.

$$R_{int} = \frac{U_a - U_b}{I_b} \quad (2.22)$$

Parametry pro určité stavy nabití jsou získány ze změřených přechodových charakteristik akumulátoru v průběhu relaxace. Mezhodnoty jsou stejně jako v předchozích případech získány pomocí interpolace extrapolace a poté uloženy do look-up tabulky pro vyčítání hodnot v průběhu simulace v Simulinku.[16]

### 2.3.5 Napětí na vnitřním odporu $U_{Rint}$

$U_{Rint}$  charakterizuje pokles napětí na vnitřním rezistoru  $R_{int}$ . Hodnota poklesu napětí vychází z Ohmova zákona a je dána rovnicí:

$$U_{Rint} = I_b \cdot R_{int} \quad (2.23)$$

Stejně jako u předchozích parametrů, tak i toto napětí je závislé na odebíraném proudu a stavu nabití akumulátoru, neboť vnitřní elektrický odpor narůstá s postupným vybíjením akumulátoru.[16]

### 2.3.6 Výsledné napětí $U_{sv}$ (na svorkách)

Výsledné napětí na svorkách je získáno odečtem všech úbytků napětí (viz. rovnice (2.24)), ke kterým dochází v náhradním obvodu akumulátoru (obrázek 2.17).[16]

$$U_{sv} = U_{oc} - U_1 - U_2 - U_{Rint} \quad (2.24)$$

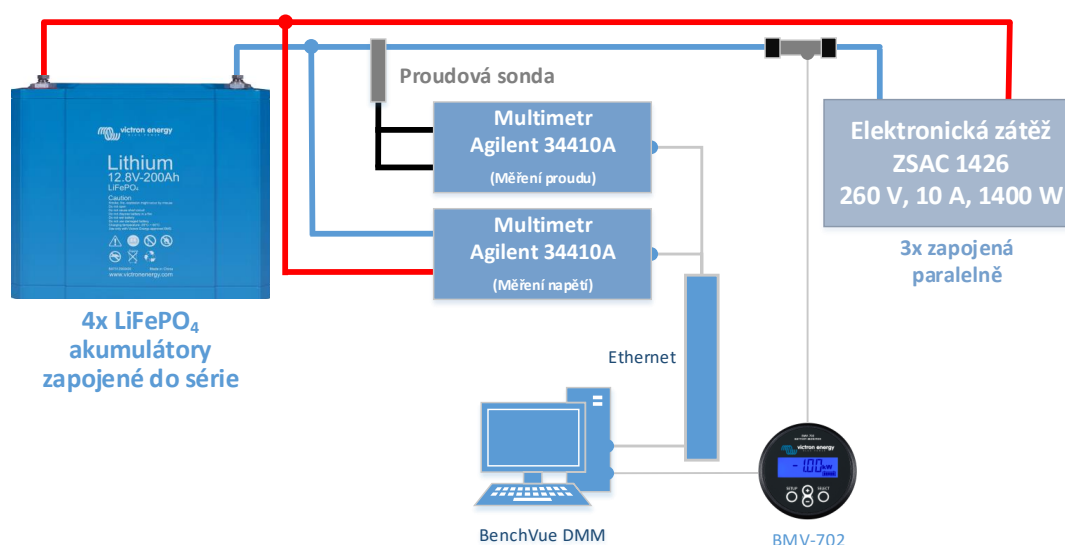
Napětí  $U_1$  a  $U_2$  jsou napěťové úbytky na sériově řazených RC člancích.

## 2.4 Extrakce parametrů a validace modelu akumulátoru

Jak již bylo několikrát zmíněno, jednotlivé parametry v modelovém obvodu se mění na základě stavu nabití akumulátoru a velikosti vybíjecího proudu. Proto jsou parametry modelu pro větší přesnost stanoveny experimentálním měřením. Díky tomu model co nejvěrněji kopíruje chování reálného akumulátoru. Mezhodnoty jsou vypočítány pomocí interpolace, které zaručují dostatečnou přesnost modelu i v hodnotách, které nebyly exaktně změřeny.

Obrázek 2.19 znázorňuje blokové schéma testovacího systému akumulátorů. Testovací systém se skládá ze čtyř  $LiFePO_4$  akumulátorů Victron Energy zapojených do série s nominální kapacitou 200 Ah, ze tří elektronických zátěží ZSAC 1426, dvou multimetrů Agilent 34410A a počítače s datalogovacím softwarem. Multimetry byly propojeny s počítačem pomocí Ethernet kabelu (CAT5e, RJ45) využívající protokolu TCP/IP. Pro záznam měřených dat byla použita aplikace Keysight BenchVue DMM. Pro ověření a porovnání měřených dat byl také použit akumulátorový snímač BMV-702 s aplikací BMV Reader od firmy Victron Energy. Kompletní seznam měřících prvků, včetně označení příslušného modelu je uveden v tabulce číslo 2.1. Při testování akumulátorů byla udržována teplota místnosti na 25° Celsia pro zamezení vlivu teploty na akumulátory.

## 2.4. Extrakce parametrů a validace modelu akumulátoru



Obrázek 2.19: Blokové schéma měřícího systému akumulátorů.[victronenergy.com]

Počet	Typ přístroje	Výrobce	Základní specifikace
4	$\text{LiFePO}_4$ akumulátor	Victron Energy	200 Ah; 12,8 V; 4 články
2	multimetr	Agilent 34410A	přesnost $U = \pm (0.0026) \%$
3	elektronická zátěž	Höcherl & Hackl ZSAC 1426	260 V; 10 A; 1400 W
1	akumulátorový snímač	Victron Energy BMV-702	6,5 - 95 V; přesnost $U = \pm 0,3\%$ ; přesnost $I = \pm 0,4\%$
1	proudová sonda	Keysight 1146B	0-70 A/100 A špička; rozsah 10 mV/A
1	proudová sonda	Fluke i1010	0-1000 A; 600 V; rozsah 1 mV/A

Tabulka 2.1: Seznam přístrojů při experimentálním měření.[20][21]

Při experimentálním měření je nutné zamezit poklesu napětí na svorkách akumulátoru pod 10,7 V. Tato hodnota je stanovena výrobcem, aby nedošlo k trvalému poškození akumulátoru. Při experimentálním měření byla tato hodnota zvýšena na 11 V kvůli možné chybě měření a také poskytnutí dostatečné rezervy při jakémkoliv selhání měřících přístrojů. Navíc akumulátor při 11 V se v podstatě považuje za vybitý. Jelikož při experimentálním měření byly čtyři akumulátory spojeny do série, znamená to, že spodní hranice činí 44 V.

Akumulátory  $\text{LiFePO}_4$  musí být v běžném provozu monitorovány battery management

systémem (BMS), neboť u nich může dojít při přebíjení až k explozi. BMS také zabraňuje podvybíjení, neboť i silné podvybíjení může trvale poškodit akumulátor.

Měřený akumulátor je složen ze čtyř  $LiFePO_4$  článků zapojených sériově. Aby nedocházelo k odlišným napěťovým stavům jednotlivých článků uvnitř akumulátoru, je součástí akumulátoru takzvaný load balancer, který zajišťuje rovnoměrné vybíjení/nabíjení každého článku v rámci akumulátoru. Z těchto důvodů obsahuje i měřená soustava BMS a load balancer pro hlídání hraničních napěťových úrovní akumulátoru.

Získávání parametrů akumulátorů probíhá dvěma způsoby, pulsním vybíjením (PDT) a plynulým vybíjením (CDT).[16]

Vliv kapacity na velikost odebíraného proudu je určen z CDT. V katalogovém listě od výrobce akumulátoru je udávána jmenovitá kapacita 200 Ah při vybíjení  $\leq 1C$ . Nicméně reálná použitelná kapacita nemusí korespondovat s nominální kapacitou. Obvykle je kapacita akumulátorů větší a výrobci jako jmenovitou kapacitu uvádí hodnotu, kterou jsou akumulátory 100% schopny dodat obvykle právě při vybíjení 1C. Při experimentálním měření, viz tabulka 2.2, bylo ověřeno, že akumulátory opravdu mají větší kapacitu jak 200 Ah a při ještě nižších vybíjecích proudech i více.[16]

Při experimentálním měření CDT byly bohužel k dispozici v laboratoři pouze tři elektronické zátěže s maximálním proudovým odběrem 30A. Aby bylo možné porovnat kapacitu akumulátorů v závislosti na vybíjecím proudu, byla potřeba vyšších vybíjecích proudů než 30 A. Z tohoto důvodu byl před zátěže zapojen střídač, pomocí kterého bylo dosaženo větších proudových odběrů díky transformaci napětí.[16]

Bohužel oproti elektronickým zátěžím je použití střídače méně vhodné z důvodu odporového charakteru střídače. Elektronická zátěž dokáže udržovat konstantní vybíjecí proud s ohledem na pokles napětí na svorkách akumulátorů se zvyšujícím se stavem vybití. To znamená, že zátěž upravuje svůj vnitřní elektrický odpor tak, aby bylo dosaženo stejné hodnoty vybíjecího proudu po celou dobu vybíjení.

Ve výsledku použití střídače mělo vliv na velikost proudu při nízkých stavech nabití, kde díky razantnímu poklesu napětí na svorkách akumulátorů se zvýšil vybíjecí proud z důvodu udržení konstantního výstupního výkonu ze střídače. Proto z naměřených dat byl vzat aritmetický průměr všech logovaných hodnot vybíjecího proudu.

Akumulátory byly plynule vybíjeny „konstantními“ proudy 27,6 A (0,138C), 57 A (0,285C) a 89,5 A (0,4475C). Bohužel vyšších vybíjecích proudů nešlo dosáhnout z důvodu dosažení maximálního výstupního výkonu střídače a elektronických zátěží. Ukončení vybíjení bylo v režii BMS, která vypnula střídač při dosažení nízkého napětí na článku nebo na akumulátoru. Výsledné hodnoty odebraných kapacit při různých proudech uvádí tabulka 2.2.

Z tabulky je evidentní, že rozdílem  $\pm 30 A$  mezi jednotlivými vybíjecími proudy, dochází ke změně kapacity akumulátorů o necelé 1%. Dá se tedy říci, že vliv vybíjecího proudu na celkovou kapacitu akumulátorů do 1C je minimální a lze jej zanedbat. Další zajímavostí je rozdíl až 50 Ah mezi reálnou kapacitou a jmenovitou kapacitou akumulátorů, která byla převzata z katalogového listu výrobce. Potvrdilo se tedy, že akumulátory opravdu mají vyšší kapacitu než je uváděná jmenovitá kapacita od výrobce. Celková odebraná kapacita z akumulátorů byla určena pomocí akumulátorového snímače BMV-702. Teoreticky mají

Vybíjecí proud [A]	Odebraná kapacita [Ah]	% hodnota z jmenov. kapacity
27,6605 (0,138C)	252,775 (100%)	126,38%
57,0891 (0,285C)	250,956 (99,28%)	125,47%
89,4859 (0,4475C)	250,139 (98,95%)	125,06%

Tabulka 2.2: Odebraná kapacita z akumulátorů při různých vybíjecích proudech.

větší vliv na celkovou kapacitu akumulátorů až vybíjecí proudy nad 1C (více jak 200 A). Avšak těchto proudů v reálném prostředí konkrétního zapojení nelze nikdy dosáhnout.

Při PDT byly akumulátory vybíjeny pulsně (přerušovaně) 30 A a 90 A<sup>9</sup>. Přerušování vybíjení proběhlo vždy po vybití 10% jmenovité kapacity akumulátorů, což znamená po odčerpání 20 Ah z akumulátorů. Určení odčerpaných 20 Ah (10%) bylo provedeno pomocí akumulátorového snímače BMV-702.

Po přerušování vybíjení akumulátoru následoval 20 minutový relaxační interval, kdy docházelo k postupnému zvyšování napětí na svorkách s exponenciálním průběhem, viz obrázek 2.18. Tento časový interval byl aplikován pro každý relaxační puls. Relaxační pulsy jsou velice důležité, neboť při nich dochází k přechodovým jevům, díky kterým lze poté určit parametry RC článků a napětí naprázdno  $U_0$  akumulátoru.[16]

Samotná extrakce parametrů RC článků z PDT je trochu složitá, neboť je celkem náročné přesně určit a vyčíst časové konstanty  $\tau_1$  a  $\tau_2$  z experimentálního měření. Aby tento proces mohl být rychlý, efektivní a plně automatizován, byl použit Curve fitting toolbox, který je součástí Matlabu. Pomocí metody nejmenších čtverců a zadáním obecné rovnice, podle které má toolbox danou křivku fitovat, lze rychle a přesně najít hledané hodnoty.[22]

Nejprve je nutné definovat rovnici charakterizující průběh napětí při přechodovém jevu ve fázi relaxace. Rovnice vychází z rovnic (2.16) a (2.17). Výsledné napětí na RC člancích vyjadřuje rovnice (2.25).[18]

$$U_{RC} = U_1 + U_2 = U_1(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_2(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2.25)$$

Rovnici (2.25) je nutné přepsat do obecného tvaru, podle které Curve fitting toolbox nafituje průběh napětí v přechodovém stavu ve fázi relaxace. Obecný tvar je vyjádřen rovnicí (2.26).[22]

$$y(t) = k + a \cdot e^{bt} + c \cdot e^{dt} \quad (2.26)$$

Po dosažení obecné rovnice v Curve fitting toolboxu vede k získání záporných hodnot parametrů  $a$ ,  $b$ ,  $c$  a  $d$  a kladnou hodnotu pro konstantu  $k$ . Poté stačí dosadit získané hodnoty do rovnic (2.27) až (2.30), které definují parametry prvků v RC člancích.[22]

$$R_1 = -\frac{a}{I_b} \quad (2.27)$$

<sup>9</sup>Zde byl použit střídač pro dosažení vyššího vybíjecího proudu.

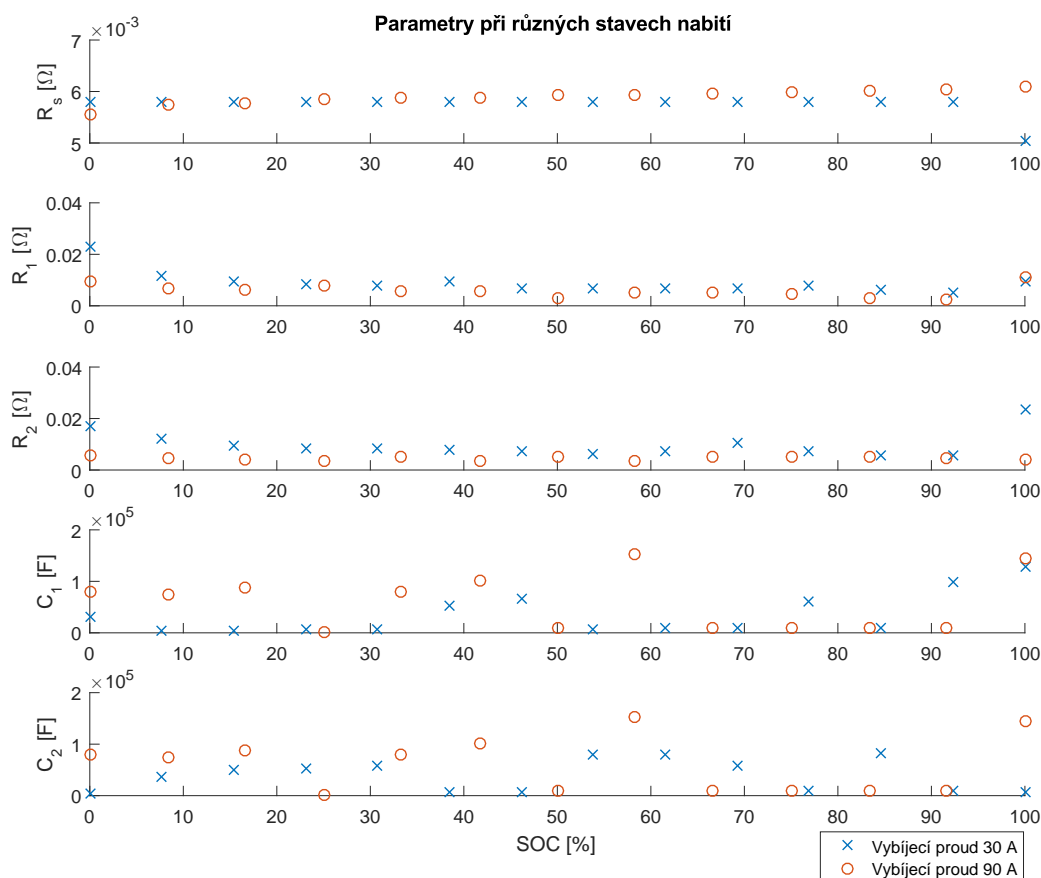


$$R_2 = -\frac{c}{I_b} \quad (2.28)$$

$$C_1 = -\frac{1}{R_1 \cdot b} \quad (2.29)$$

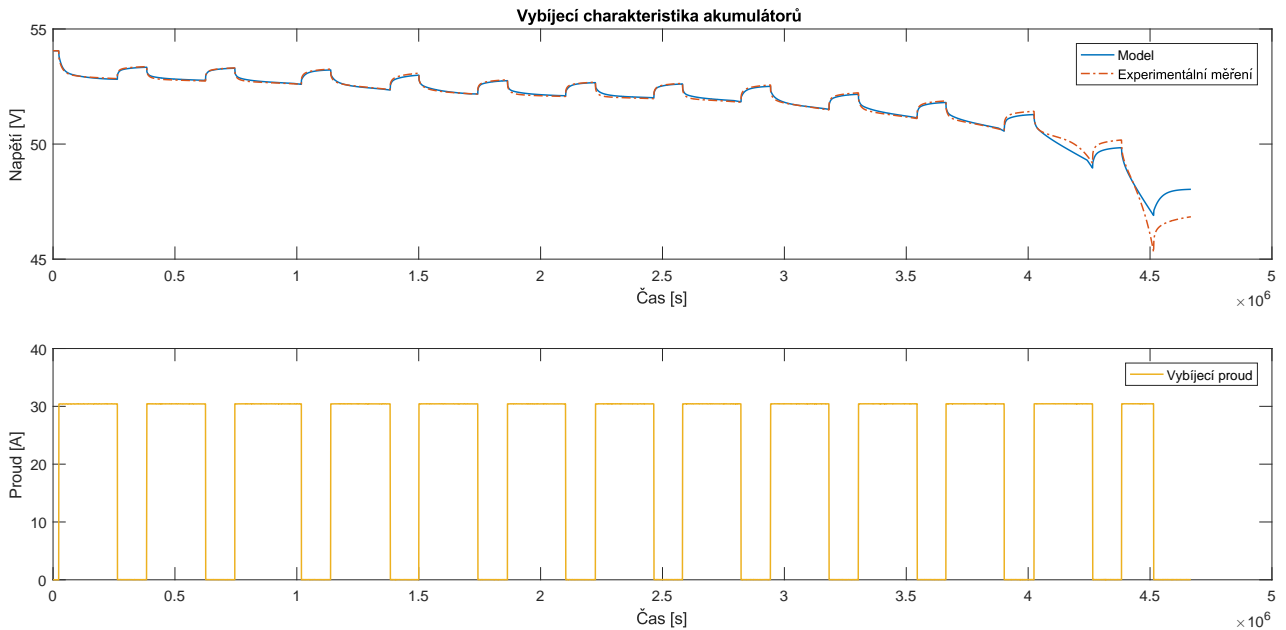
$$C_2 = -\frac{1}{R_2 \cdot d} \quad (2.30)$$

Při extrakci parametrů z relaxačních pulsů, chybí hodnoty prvků pro stav nabití pro 100%, neboť první relaxační puls se nachází přibližně na úrovni 90% vybití. To lze vyřešit pomocí extrapolace nebo pomocí extrakce parametrů z vybíjecího pulsu. Teoreticky hodnoty prvků jsou stejné jak při vybíjení tak i při relaxaci. Použití extrapolace přináší do modelu značnou nepřesnost, neboť dochází k linearizaci exponenciálního průběhu. Proto byla použita extrakce parametrů z vybíjecího pulsu. Získané parametry prvků pro 30 A a 90 A znázorňuje obrázek 2.20.



Obrázek 2.20: Získané parametry prvků pro 30 A a 90 A

## 2.4. Extrakce parametrů a validace modelu akumulátoru



Obrázek 2.21: Porovnání výsledků simulace modelu a experimentálního měření při vybíjecím proudu 30 A.

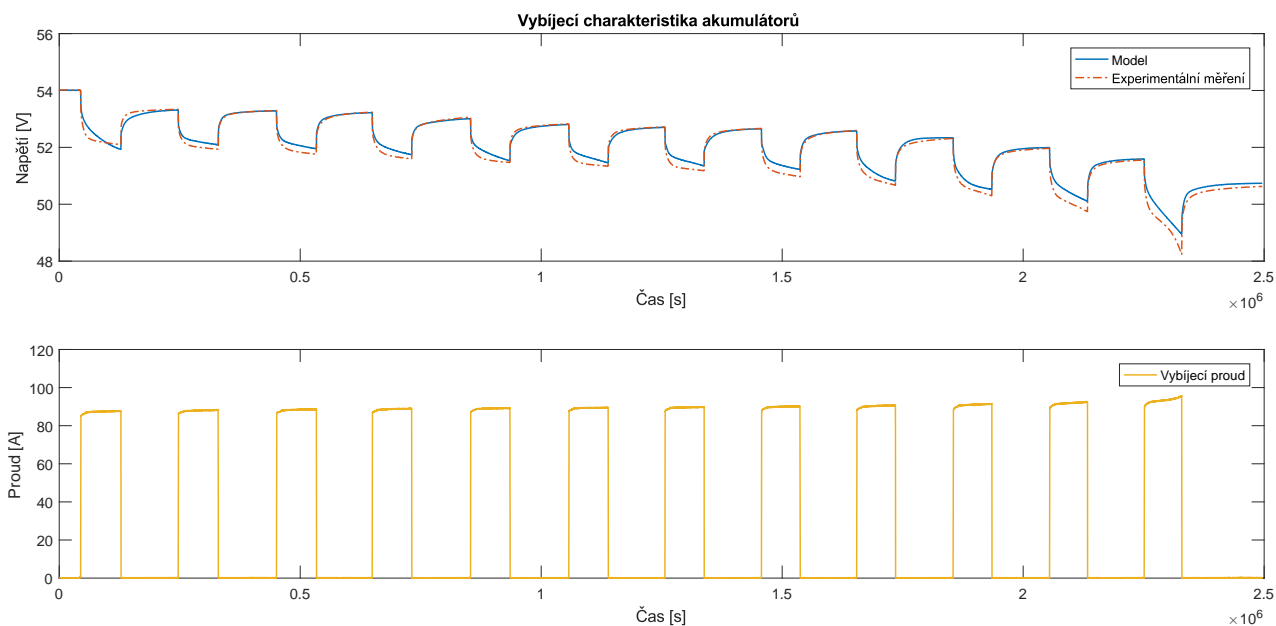
Vzhledem k tomu, že akumulátory měly větší kapacitu než je uváděná jmenovitá kapacita, je počet relaxačních pulsů 12 pro vybíjecí proud 30 A a 11 pro vybíjecí proud 90 A. Důvodem pro chybějící relaxační puls při 89 A je nemožnost opětovného zapnutí střídače na základě zamezení od BMS.

Po získání parametrů byly hodnoty jednotlivých prvků přidány do modelu v podobě vyhledávací tabulky. Aby bylo možné přesně porovnat model s experimentálním měřením, je potřeba změnit nominální kapacitu v modelu na kapacitu, která byla reálně odebrána při měření.

Výsledek simulace modelu a experimentálního měření při vybíjecím proudu 30 A zobrazuje obrázek 2.21. Při tomto experimentálním měření byly zátěže připojeny přímo na akumulátory. Díky tomu bylo zajištěno stálý vybíjecí proud 30 A i v nízkých stavech nabití akumulátoru.

Z výsledku lze vyvodit velkou přesnost modelu v porovnání s experimentálním měřením. Větší rozdíly nastávají až v nízkých stavech nabití, kde dochází k zřetelnějšímu rozdílu mezi napětím simulace a experimentálním měřením. Vliv na tento rozdíl mají parametry jednotlivých prvků. Při nízkých stavech nabití dochází k rychlejším napěťovým změnám na svorkách a tím pádem také k rychlejším změnám parametrů prvků. Aby bylo dosaženo větší přesnosti, je nutné snížit interval mezi jednotlivými relaxačními pulsy. V praxi je to zbytečné, neboť akumulátory v této fázi se považují za vybité. Navíc v běžných provozních podmínkách se nestává, aby se akumulátory pravidelně dostávaly do stavu vybití víc jak 90%.

## 2. MODEL AKUMULÁTORU



Obrázek 2.22: Porovnání výsledků simulace modelu a experimentálního měření při vybíjecím proudu 90 A.

Při pohledu na začátek vybíjení je potvrzena teorie, že lze získat parametry prvků také z vybíjecího pulsu. To znamená, že lze přesně určit napěťovou charakteristiku akumulátoru mezi 100% a 90% stavu nabití.

Výsledek simulace modelu a experimentálního měření při vybíjecím proudu 90 A zobrazuje obrázek 2.22. Při tomto experimentálním měření byl před zátěže připojen střídač.

Simulace při vybíjecím proudu 90 A je méně přesná oproti předchozí simulaci. Je to z důvodu použití střídače, neboť při každém sepnutí došlo k jeho časové prodlevě. To znamená, že při sepnutí byl napřed odebírán malý vybíjecí proud pro napájení samotného střídače a poté teprve v řádech milisekund došlo k vybíjení plným proudem tekoucí do zátěží. Důsledkem této prodlevy bylo složitější a méně přesné fitování přechodových charakteristik při relaxaci, neboť v naměřených datech byly napěťové a proudové „skoky“.

Jak již bylo řečeno, střídač se chová jako konstantní odporová zátěž. To je evidentní ze spodní části obrázku 2.22 charakterizující velikost vybíjecího proudu v čase, kde se při nízkém stavu nabití akumulátoru výrazně zvětšuje. Připojením střídače bylo sice dosaženo větších vybíjecích proudů, avšak za cenu nižší přesnosti modelu.

V závěru pro srovnání obou simulací vůči experimentálním měřením a zhodnocením celkové přesnosti modelu byla vypočtena střední kvadratická odchylka (RMSE), maximální relativní chyba a průměrná relativní chyba. Do kalkulace přesnosti modelu nebyl brán v potaz poslední relaxační puls, který vznikl při odpojení akumulátorů pomocí BMS na základě dosáhnutí nízké hodnoty napětí na svorkách akumulátorů. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 2.3. Model akumulátoru vytvořený v Simulinku je zobrazen v příloze A.

Vybíjecí proud [A]	RMSE [V]	Max. rel. chyba [%]	Prům. rel. chyba [%]
30	0,0967	3,52	0,07
90	0,1238	1,49	0,12

Tabulka 2.3: Srovnání dvou simulací vůči experimentálnímu měření pomocí RMSE a relativní chyby.



## Model autonomního/hybridního fotovoltaického systému

Stejně jako model akumulátoru, tak i model hybridního fotovoltaického systému, lze úspěšně modelovat pomocí elektrických obvodů. Jednotlivé elektrické děje uvnitř obvodu (soustavy) jsou vyjádřeny určitými matematickými rovnicemi, které popisují základní principy fungování daného systému.

Díky tomu lze jednoduše a přesně modelovat fotovoltaické systémy a zkoumat jejich chování za různých podmínek v daném prostředí. Tento způsob modelování je jeden z nejpoužívanějších ve výzkumu a vývoji v oblasti fotovoltaických systémů, neboť nedochází k žádnému narušení životního prostředí a značně redukuje náklady na realizaci FV systémů.

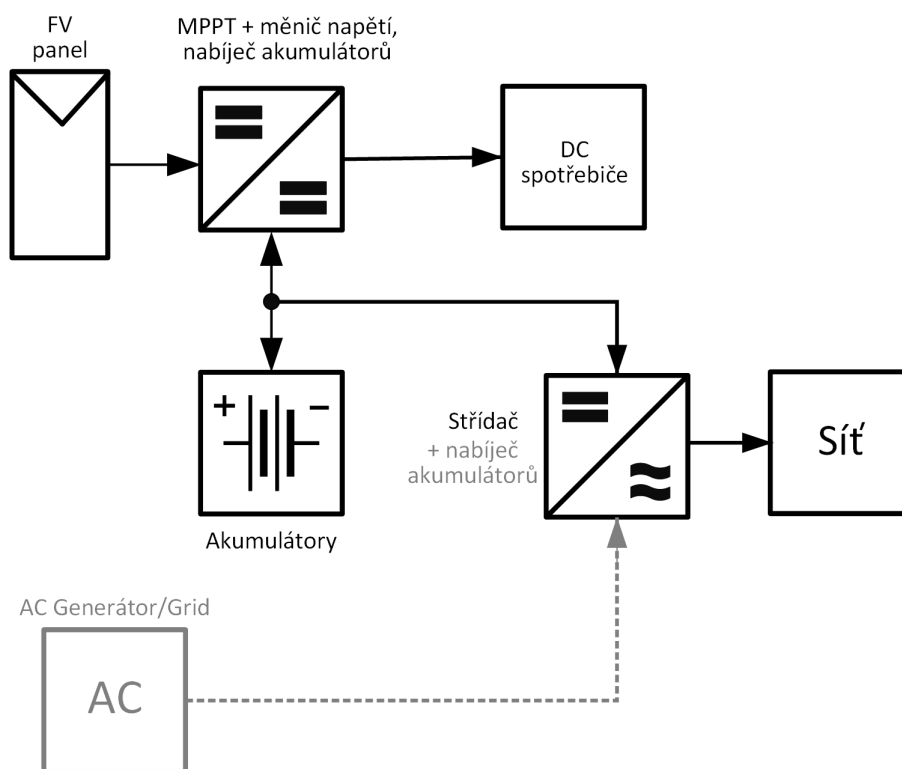
Modelování FV systému se neskládá pouze z modelování fotovoltaického článku respektive panelu, ale z dalších důležitých komponent, které tvoří FV systém. Konkrétně se jedná o MPP tracker<sup>1</sup>, napěťový měnič, nabíječka akumulátorů, akumulátory a střídač. Obecné schéma zapojení FV systému zobrazuje obrázek 3.1.

Akumulátorům byla věnována podstatná část v kapitole 2. Nyní v následujících sekcích bude detailněji popsán princip modelování zbývajících komponent FV systému.

Nutno podotknout, že se na trhu vyskytují FV panely od různých výrobců s různým počtem FV článků, proto se nemodeluje celý FV panel ale pouze FV článek. Do modelu se pouze doplní počet sériově zapojených článků a počet paralelních větví uvnitř panelu. Poté na základě této úpravy bude VA charakteristika panelu odpovídat VA charakteristice modelu.

---

<sup>1</sup>Sledovač maximálního bodu výkonu FV panelu.



Obrázek 3.1: Schéma autonomního/hybridního FV systému.

## 3.1 Požadavky pro modelování FV systému

Základním požadavkem na model FV systému je simulace činnosti jednotlivých komponent a jejich energetických toků. Jedná se konkrétně o výrobu, uchování a spotřebu elektrické energie.

Model by měl popisovat chování systémů z hlediska základních elektrických veličin. Konkrétně se jedná o napětí, proud a výkon na jednotlivých komponentách.

Základní vstupní veličinou pro model je intenzita záření a teplota okolí, případně teplota FV článku. Díky tomu by měl model být schopen také předpovídat energetickou výtěžnost celého FV systému z predikce intenzity záření a teploty okolí.

Všechny důležité parametry jednotlivých komponent by měli být dostupné z katalogových listů, případně získány pomocí jednoduchých matematických operací, nejlépe plně automatizovanými.

Model by měl poskytnout přiměřeně dobrou přesnost, variabilitu a rychlost simulace. Model nesmí být příliš složitý a náročný na výpočetní prostředky a čas.

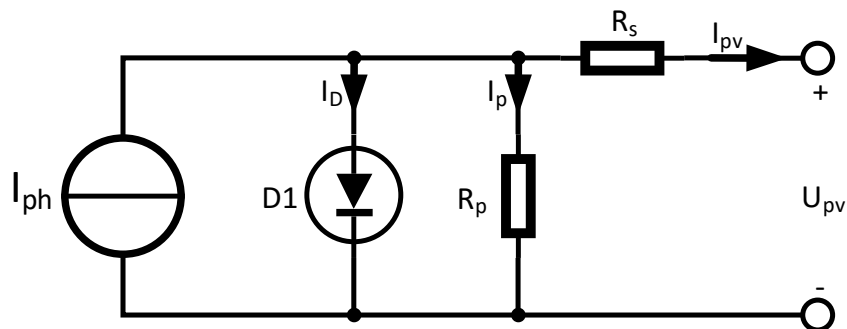
## 3.2 Modely fotovoltaického článku

Fotovoltaický článek (panel) tvoří stěžejní prvek celého FV systému. Bez něj, na rozdíl od jiných komponent, nelze sestavit ani jednoduchý FV systém. Stejně jako u akumulátorů, tak i pro FV článek existují různé modely, které jsou schopné modelovat jeho chování a vlastnosti při různých provozních podmínkách.

### 3.2.1 Model FV článku s jednou diodou

Model s jednou diodou na obrázku 3.2 je nejjednodušší model FV článku. Je založen na lineárním nezávislém proudovém zdroji  $I_{ph}$ , ke kterému je zapojena paralelně dioda  $D1$  charakterizující vztah mezi difúzním a driftovým proudem ve FV článku. Model je doplněn sériovým rezistorem  $R_s$  a paralelním rezistorem  $R_p$ , který je též nazýván jako svodový rezistor. Sériový rezistor charakterizuje vliv odporu materiálu a proudových sběrnic FV článku. Paralelní rezistor charakterizuje defekty krystalické mřížky, případně svodový proud na okrajích FV článku.[23]

Tento model je hojně používán díky své jednoduchosti. Dokáže celkem přesně modelovat fotovoltaický článek a pro běžné modelování je naprosto dostačující. Je velice přesný při modelování tenkovrstvých FV článků.[23]



Obrázek 3.2: Model FV článku s jednou diodou.[24]

Tento model zahrnuje pět neznámých parametrů, pomocí kterých lze po jejich stanovení zobrazit VA charakteristiku FV článku. Tyto parametry jsou variabilní a závisí na teplotě FV článku a na intenzitě záření. Jmenovitě se jedná o fotoelektrický proud  $I_{ph}$ , nasycený proud<sup>2</sup> diody (saturace) v závěrném směru  $I_0$ , sériový rezistor  $R_s$ , paralelní rezistor  $R_p$  a takzvaný součinitel ideálnosti diody  $n$  (závisí na výrobní technologii,  $1 \leq n \leq 2$ ). Výsledný

<sup>2</sup>Též nazývaný jako driftový proud minoritních nosičů.



proud vycházející z FV článku je vyjádřen pomocí rovnice (3.1). Proud  $I_D$  tekoucí diodou lze vyjádřit pomocí Shockleyho rovnice (3.2), kde  $U_t$  vyjadřuje teplotní napětí.[23][24]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (3.1)$$

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{U_{pv}}{n \cdot U_t}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

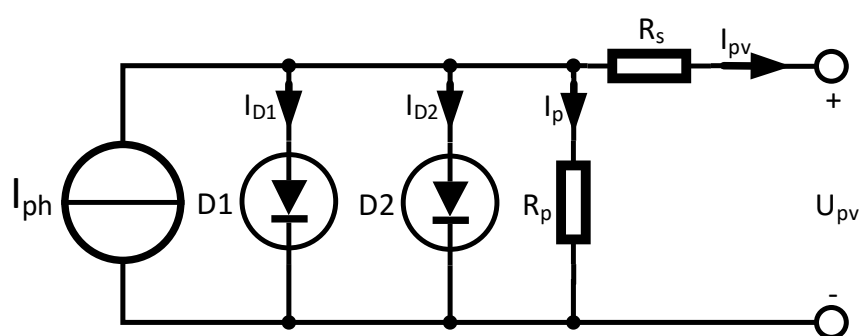
Tato rovnice je ale příliš strohá. Pro lepší matematické vyjádření je rovnice přepsána do rozvinutého tvaru charakterizující vztah mezi napětím a proudem FV článku, viz rovnice (3.3).[25]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{U_{pv} + I_{pv}R_s}{n \cdot U_t}\right) - 1 \right] - \left(\frac{U_{pv} + I_{pv}R_s}{R_p}\right) \quad (3.3)$$

Výhodou tohoto modelu je, že převážnou část parametrů nutné k určení VA charakteristiky FV článku lze vyčíst z katalogového listu výrobce. Zbývající parametry jako je sériový a paralelní odpor lze určit na základě matematiky (Newton-Raphsonova iterační metoda) založené na napětí nakrátko a zkratovém proudu nebo případně pomocí speciálních měření jako je flash test <sup>3</sup> a podobně.[26]

#### 3.2.2 Model FV článku s dvěma diodami

Model s dvěma diodami na obrázku 3.3 je v podstatě stejný jako předchozí model, který je navíc doplněn druhou diodou. Doplněním druhé diody do modelu se navýší přesnost modelování VA charakteristiky FV článku, zejména při nízkých úrovních záření. Tento model je ideální pro modelování polykrystalických a monokrystalických článků.[23][25]



Obrázek 3.3: Model FV článku s dvěma diodami.[23]

<sup>3</sup>Měření elektrických parametrů fotovoltaického panelu pomocí krátkého světelného impulsu definované délky, intenzity a spektra, díky kterému lze přesně určit VA charakteristiku panelu.

Důvodem přidání druhé diody je následující. Model s jednou diodou předpokládá, že nedochází k rekombinačním ztrátám ve vyprázdněné oblasti P-N přechodu a na povrchu materiálu. Avšak v reálném FV článku k těmto podstatným ztrátám dochází. Tyto ztráty nelze bohužel modelovat pomocí jedné diody a proto je do modelu přidána druhá dioda. Následkem rekombinačních ztrát je pokles výstupního proudu  $I_{pv}$  a napětí  $U_{pv}$  z FV článku.[23][25]

Nicméně přidáním druhé diody vede k navýšení počtu neznámých parametrů v modelu. Konkrétně se jedná o nasycený proud diody v závěrném směru  $I_{n2}$ , součinitel ideálnosti diody  $n_2$  ( $n_2 \geq 2$ ) a tím pádem vzrostla i jeho složitost. Navíc nelze získat všechny parametry FV článku z katalogových listů výrobce a je potřeba se uchýlit k experimentálním měřením, případně k různým matematickým výpočtům k zjištění všech potřebných parametrů.[23][25]

Matematické vyjádření výsledného proudu FV článku s dvěma diodami vyjadřuje rovnice (3.4).[23][25]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \left[ \exp \left( \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{n_1 \cdot U_{t1}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[ \exp \left( \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{n_2 \cdot U_{t2}} \right) - 1 \right] - \left( \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \right) \quad (3.4)$$

### 3.2.3 Model FV článku se třemi diodami

Tento specifický model je úzce zaměřený na modelování polykrystalických FV článků. Třetí dioda modeluje rekombinační ztráty na hranicích zrn v polykrystalickém křemíku.[27]

Přidáním další diody došlo k dalšímu navýšení počtu neznámých parametrů oproti předchozím modelům a tím značně vzrostla komplexnost tohoto modelu.[27] Ve většině případů modelování bohatě dostačuje použití modelu s jednou nebo dvěma diodami.

### 3.2.4 Modelování FV článku v prostředí Matlab/Simulink

Pro modelování FV článku v Simulinku byl vybrán model s jednou diodou pro svoji jednoduchost a dostačující přesnost.

Pro rekapitulaci vztahu mezi proudem a napětím FV článku v modelu s jednou diodou vyjadřuje rovnice (3.5). Tato rovnice je upravena o rozepsaný výraz pro teplotní napětí, viz rovnice (3.6).[26]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{n \cdot kT} \right) - 1 \right] - \left( \frac{U_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \right) \quad (3.5)$$

$$U_t = \frac{kT}{q} \quad (3.6)$$

Teplotní napětí je vyjádřeno Boltzmannovou konstantou  $k$  [ $1,3806503 \cdot 10^{-23}$  J/K], teplotou  $T$  [K] P-N přechodu a elektrickým nábojem  $q$  [ $1,60217646 \cdot 10^{-19}$  C].[26]

Parametry fotovoltaického panelu jako je napětí naprázdno ( $U_{oc}$ ), zkratový proud ( $I_{sc}$ ), maximální bod výkonu ( $P_{max}$ ), maximální proud a napětí v maximálním bodě výkonu ( $U_{mp}, I_{mp}$ ) se obvykle v katalogovém listu uvádí při standardních testovacích podmínkách<sup>4</sup> (STC).[26]

Pro úspěšné modelování je nutné přesně odhadnout VA charakteristiku FV článku ze zmíněných katalogových parametrů a při různých úrovních ozáření a různé okolní teploty. K přesnému odhadu slouží pět neznámých parametrů z modelu, které již byly zmíněny sekci 3.2.1. V následujících sekcích bude podrobněji popsán postup pro získání těchto pěti neznámých parametrů.[26]

#### 3.2.4.1 Určení hodnoty fotoelektrického proudu $I_{ph}$

Hodnotu fotoelektrického proudu  $I_{ph}$  lze jednoduše určit na základě dopadajícího záření na článek a jeho teploty, viz. rovnice (3.7).[26]

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - T_{STC})] \frac{G}{G_{STC}} \quad (3.7)$$

Kde  $I_{sc}$  je zkratový proud,  $k_i$  je teplotní koeficient zkratového proudu uváděný v katalogovém listě výrobce,  $T$  je pracovní teplota FV článku a  $G$  je intenzita záření [ $W/m^2$ ].[26]

Teplotní koeficient zkratového proudu je vždy uváděn v katalogovém listu jako kladná hodnota. Z toho vyplývá, že s rostoucí teplotou dochází k malému nárůstu výsledného fotoproudu.

#### 3.2.4.2 Určení saturačního proudu diody $I_0$ a faktoru ideálnosti diody $n$

Zpětný nasycený proud diody charakterizuje rovnice (3.8), která vyjadřuje závislost proudu na teplotních změnách FV článku.[26]

$$I_0 = I_{0,STC} \left( \frac{T}{T_{STC}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{nk} \left( \frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.8)$$

$E_g$  vyjadřuje šířku zakázaného pásu [eV]. Pro výpočet je potřeba znát nasycený proud v závěrném směru  $I_{0,STC}$  při standardních testovacích podmínkách. Tento parametr definuje rovnice (3.9).[26]

$$I_{0,STC} = \frac{I_{sc}}{\exp \left( \frac{U_{oc}}{nV_t,STC} \right) - 1} \quad (3.9)$$

Jelikož šířka zakázaného pásu polovodiče závisí na teplotě a na druhu materiálu, je potřeba šířku upravit pomocí rovnice (3.10).[24]

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha \left( \frac{T^2}{T + \beta} \right) \quad (3.10)$$

---

<sup>4</sup>Intenzita záření  $1000W/m^2$ , spektrum AM 1,5 a teplota FV panelu  $25^\circ C$ .

Kde  $E_g(0)$  vyjadřuje šířku zakázaného pásu při 0 Kelvinů,  $\alpha$  a  $\beta$  jsou parametry charakteristické pro daný materiál. Parametry pro další typy polovodičů jsou v tabulce 3.1.[24]

	<b>Germanium</b>	<b>Křemík</b>	<b>Arsenid Gália</b>
$E_g(0)$ [eV]	0,7437	1,166	1,519
$\alpha$ [eV/K]	$4,77 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$5,41 \cdot 10^{-4}$
$\beta$ [K]	235	636 (655 <sup>5</sup> )	204

Tabulka 3.1: Parametry pro identifikaci šířky zakázaného pásu pro vybrané materiály.[24]

Faktor ideálnosti diody je závislý na technologii FV článku. Hodnotu ideálnosti diody pro jednotlivé technologie zobrazuje tabulka 3.2.

<b>Technologie</b>	<b>Faktor ideálnosti [-]</b>
Si-mono	1,2
Si-poly	1,3
a-Si:H	1,8
a-Si:H tandem	3,3
a-Si:H tripple	5
CdTe	1,5
CIS	1,5
AsGa	1,3

Tabulka 3.2: Faktor ideálnosti diody podle FV technologie.[29]

### 3.2.4.3 Určení teploty FV článku pomocí jmenovité provozní teploty

V případě, že není k dispozici údaj o teplotě FV článku (porucha nebo absence teplotního čidla na FV panelu), je možné tuto hodnotu určit z jmenovité provozní teploty (NOCT)<sup>6</sup>. Vztah teploty článku a jmenovité teploty popisuje rovnice (3.11).

$$T_c = T_{ok} + \left( \frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right) \cdot G \quad (3.11)$$

Kde  $T_{ok}$  vyjadřuje okolní teplotu (vzduch),  $G$  je intenzita záření dopadající na FV panel a  $T_{NOCT}$  je jmenovitá provozní teplota panelu dostupná z katalogového listu výrobce.

<sup>5</sup>V některých publikacích uváděna tato hodnota.[28]

<sup>6</sup>Intenzita záření  $800W/m^2$ , rychlost větru  $\leq 1m/s$ , spektrum AM 1,5 a teplota okolí  $20^\circ C$ .

#### 3.2.4.4 Vliv teploty na napětí naprázdno $U_{oc}$

Stejně jako proud nakrátko tak i napětí naprázdno je ovlivněno teplotou FV článku. Vztah mezi napětím naprázdno a teplotou FV článku popisuje rovnice (3.12). U napětí naprázdno má vliv teploty pouze opačný efekt. S rostoucí teplotou lineárně klesá výsledné napětí naprázdno, neboť teplotní koeficient  $k_u$  má zápornou hodnotu.[24]

$$U_{oc} = U_{oc,STC} [1 + k_u(T - T_{STC})] \quad (3.12)$$

Závislost napětí na teplotě FV článku je v podstatě modelována pomocí rovnice pro určení šířky zakázaného pásu (3.10), která upravuje šířku pásu na základě teploty. Jinými slovy šířka zakázaného pásu určuje maximální dosažitelné napětí na FV článku. Lze tedy rovnici (3.8) nahradit rovnicí (3.13).[24]

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{U_{oc}[1+k_u(T-T_{STC})]}{nV_t}\right) - 1} \quad (3.13)$$

#### 3.2.4.5 Určení sériového rezistoru $R_s$ a paralelního rezistoru $R_p$

Získání sériového elektrického odporu a paralelního elektrického odporu, oproti předchozím parametrům, je trochu složitější, neboť se tyto hodnoty běžně neudávají v katalogových listech výrobců.[26]

Pro dosažení velké přesnosti modelu, je potřeba hodnoty těchto parametrů určit co nejpřesněji. Všeobecný předpoklad je, že paralelní elektrický odpor  $R_p$  je mnohem větší než sériový elektrický odpor  $R_s$  ( $R_p \gg R_s$ ).[26]

Existuje mnoho metod, jak získat parametry sériového a paralelního elektrického odporu. Například vytáhnutím z VA charakteristiky FV panelu uvedenou od výrobce v katalogovém listě, nebo pomocí výpočtů založených na iteracích, případně pomocí experimentálních měření, jako již dříve zmíněný flash test.[26]

Nicméně bohužel díky náročnějšímu určení těchto parametrů se stává model FV článku výpočetně složitější a s narůstající odchylkou těchto dvou parametrů se snižuje celková přesnost modelu.[26]

Přibližnou hodnotu elektrických odporů lze odhadnout pomocí aproximace. Tento způsob určení hodnot je velmi jednoduchý a poskytuje celkem přesné výsledky. Rovnice (3.14) vyjadřuje odhad pro paralelní elektrický odpor a rovnice (3.15) vyjadřuje odhad pro sériový elektrický odpor.[30]

$$R_p > 10 \frac{U_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.14)$$

$$R_s > 0,1 \frac{U_{oc}}{I_{sc}} \quad (3.15)$$

Paralelní odpor lze určit také z vlivu změny ozáření na jeho hodnotu. Tento vztah popisuje rovnice (3.16).[30]

$$\frac{R_p}{R_{p,STC}} = \frac{G}{G_{STC}} \quad (3.16)$$

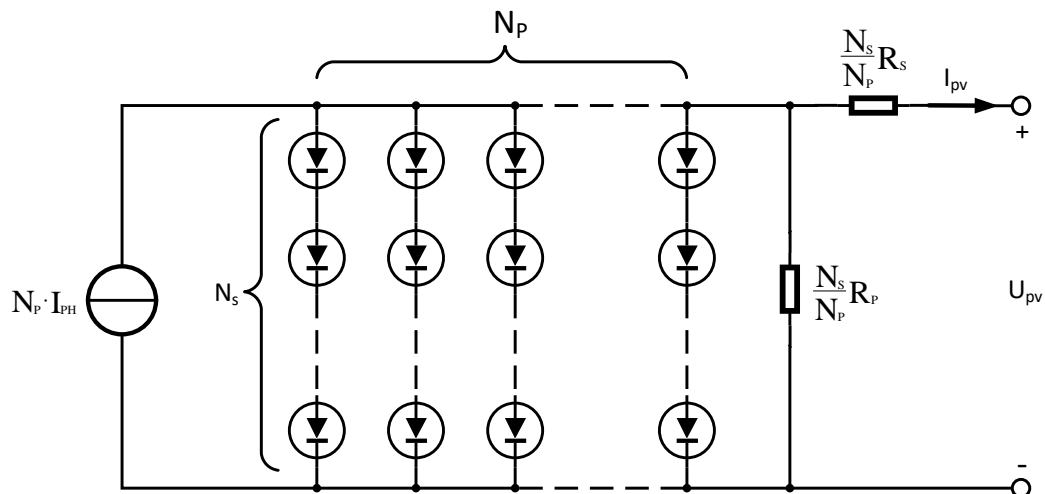
Předpokladem modelu FV článku s jednou diodou je nezávislost sériového elektrického odporu  $R_s$  na teplotě článku a na intenzitě záření.[30]

Kolísání respektive malá změna paralelního elektrického odporu  $R_p$  nemá zásadní vliv na celkový výkon FV článku. To znamená, že hodnotu paralelního elektrického odporu stačí přibližně odhadnout. Ve zjednodušených případech může být paralelní elektrický odpor dokonce považován za nekonečný.[29]

Kdežto malá změna u sériového elektrického odporu  $R_s$  má výrazný vliv na výstupní výkon FV článku. Proto je důležité co nejpřesněji určit hodnotu sériového elektrického odporu.[29]

Tento model je navržen pro modelování FV článku při homogenním ozáření, kdy FV článek není vystaven plnému ani částečnému zastínění. Znamená to tedy, že na celou plochu FV článku dopadá rovnoměrně stejná intenzita záření a po celé své ploše má stejnou teplotu.[26]

Transformace FV článku na FV modul je proveden vynásobením výstupního proudu počtem paralelních větví s FV články. Obdobně to je s napětím, kdy napětí je vynásobeno počtem FV článků v jedné větvi. Náhradní schéma FV panelu zobrazuje obrázek 3.4.[26]

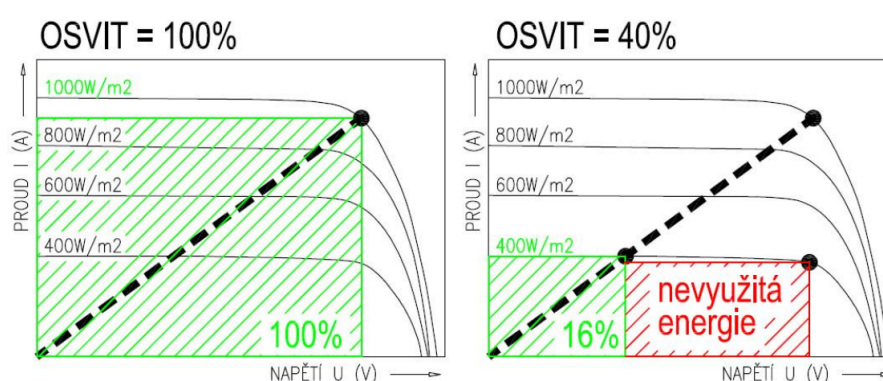


Obrázek 3.4: Náhradní schéma modelu FV panelu.[24]

U akumulátoru byla zpětná vazba v podobě dodatečné kalkulace proudu. U fotovoltaického panelu je to přesně naopak. FV modul dává jasně definovaný výstupní proud a dodatečně dopočítává napětí, které je zpětnou vazbou přivedeno zpět do FV modulu.

### 3.3 Modelování MPPT a měniče napětí

Produkce energie FV panelu je silně závislá na podmínkách daného prostředí, ve kterém je provozován. Jelikož dochází ke kolísání v množství energie dopadající na FV panel, mění se zásadně výstupní VA charakteristika panelu. Tato výstupní charakteristika má dost zásadní vliv na celkový výkon FV panelu, který je dodáváný do zátěže. Vzhledem k tomu, že se FV panel napěťově přizpůsobuje připojené zátěži, může docházet ke značnému výkonovému omezení FV panelu ze strany zátěže. Ve výsledku nebude plně využit výkonový potenciál FV panelu. Vliv zátěže na výkon FV panelu zobrazuje obrázek 3.5, kde černá přerušovaná čára charakterizuje lineární odporovou zátěž. Z obrázku je patrné, že MPPT má velký přínos při nízké intenzitě záření.



Obrázek 3.5: Výkonové omezení panelu bez MPPT.[31]

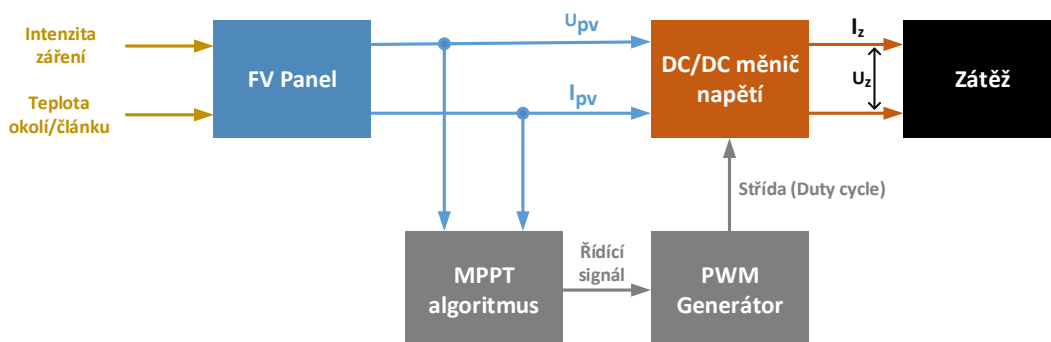
Kombinace FV panel a zátěž sice vytváří velice jednoduchý systém, avšak s nízkou mírou účinnosti. Navíc je problém impedančního přizpůsobení FV panelu jako zdroje el. energie a zátěže.

Na základě těchto negativních vlivů se vyvinul systém sledující maximální bod výkonu (MPPT) FV panelu. Jedná se v podstatě o vysokofrekvenční napěťový DC-DC měnič s algoritmem pro sledování maximálního výkonu. MPPT najde podle daného algoritmu maximální bod výkonu a poté nastaví napětí pomocí pulsně šířkové modulace (PWM) na vstupech napěťového měniče. Díky tomu se posune pracovní bod FV panelu na maximální bod výkonu a z FV panelu je odebírán maximální možný výkon vzhledem k daným podmínkám prostředí.

Tuto analogii je potřeba zavést do modelu FV systému. MPPT Systém se skládá z pěti hlavních částí. Jednotlivé části a jejich zapojení znázorňuje blokové schéma na obrázku 3.6

#### 3.3.1 MPPT algoritmus

Existuje velká řada algoritmů pro hledání maximálního bodu výkonu FV panelu. Jednotlivé algoritmy se mezi sebou liší rychlostí, přesností, složitostí a dalšími parametry.



Obrázek 3.6: Blokové schéma MPPT a měniče napětí.[31]

Každý algoritmus má jisté výhody a nevýhody a každý přináší jiné možnosti použití. Požadavky pro nalezení vhodného algoritmu za účelem modelování FV systému se trochu liší od požadavků pro nasazení ve střídačích a nabíječkách akumulátorů v reálném nasazení. Například se neřeší cena realizace, potřebné senzory atd. Pro modelování je zejména důležitá jednoduchost, přesnost a rychlost.

Vzhledem k tomu, že algoritmů je hodně, nemá smysl podrobněji popisovat všechny. Budou pouze zmíněny ty nejpoužívanější algoritmy, které se používají pro modelování FV systémů. Jedná se o tyto algoritmy:

1. Perturb & Observe
2. Incremental Conductance

### 3.3.1.1 Perturb & Observe

Tento algoritmus patří mezi nejvíce rozšířené metody pro hledání maximálního bodu výkonu díky své jednoduchosti (snadná implementace) a účinnosti. V překladu algoritmus znamená „odchýlení a vyhodnocení“. Princip algoritmu spočívá v porovnání výkonu před změnou a po změně pracovního napětí FV panelu. Poté určí další krok, buď dopředu zvýšením napětí, nebo snížením napětí pro krok níž.[31][32]

To znamená, je-li

$$\frac{dP}{dU} > 0 \quad (3.17)$$

dojde k další změně napětí ve stejném směru. Naopak je-li derivace

$$\frac{dP}{dU} < 0 \quad (3.18)$$



pak došlo ke vzdálení se od bodu maximálního výkonu a další změna bude opačným směrem.

Nicméně pevná velikost kroku způsobuje oscilaci kolem pracovního bodu a při rychlých změnách intenzity záření může docházet k chybám při posunu špatným směrem. Přesnost algoritmu dost závisí na zvolené velikosti kroku, avšak velikost nemůže být příliš malá, neboť rapidně klesá rychlost algoritmu.[31]

Existují různé modifikace tohoto algoritmu, které se snaží eliminovat zmíněné nevýhody. Jedná se například o průměrování několika vzorků nebo o proměnlivý krok nastavování pracovního napětí FV panelu. Při správné implementaci dosahuje algoritmus účinnosti přes 90%. [31][32]

#### 3.3.1.2 Incremental Conductance

Incremental Conductance algoritmus, v překladu přírůstková vodivost, je představován jako vylepšená verze P&O algoritmu. Algoritmus vychází z faktu, že směrnice výkonové charakteristiky FV článku je v maximálním bodě výkonu nulová, nalevo kladná a napravo záporná. Algoritmus tedy porovnává okamžitou hodnotu napětí a proudu FV panelu a jeho přírůstkovou vodivost. Matematický zápis vyjadřuje rovnice (3.19).[31][32]

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = U \frac{dI}{dU} + I \quad (3.19)$$

Díky rovnici (3.19) lze poté odvodit podmínky pro určení směru kroku:

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} = -\frac{I}{U} \quad v \text{ MPP} \quad (3.20)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} < -\frac{I}{U} \quad \textit{napravo od MPP} \quad (3.21)$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta U} > -\frac{I}{U} \quad \textit{nalevo od MPP} \quad (3.22)$$

Poloha MPP je potom vyhledána porovnáním okamžité a přírůstkové vodivosti:

$$G = \frac{I}{U} \Rightarrow \Delta G = \frac{\Delta I}{\Delta U} \quad (3.23)$$

Tento algoritmus je schopen určit vzdálenost bodu maximálního výkonu a po jeho dosažení zastavit další vychylování, respektive ukončit vyhledávací proces.[31]

Ačkoliv algoritmus pracuje s vyšší přesností oproti P&O, stále algoritmus trpí pomalým vyhledáváním při častých změnách intenzity záření. [31]

Z těchto dvou algoritmů byl vybrán Perturb & Observe díky své jednoduché implementaci.

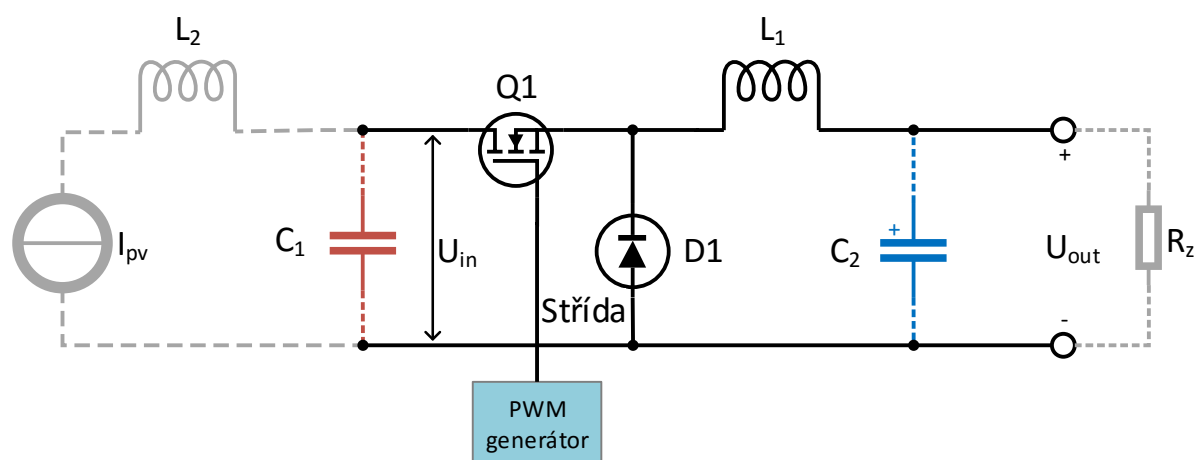
### 3.3.2 DC-DC měnič napětí

Hlavním úkolem DC-DC měniče napětí je impedanční přizpůsobení mezi PV panelem a zátěží. Jinými slovy zajišťuje pomocí MPPT co nejlepší přenos maximálního výkonu poskytovaný FV panelem. Měnič napětí je řízen pomocí PWM generátoru, který podle velikosti střídy určuje vstupní napětí měniče.[33]

Ve fotovoltaických systémech se nejčastěji používají tzv. buck konvertory (snižovač napětí) a boost konvertory (zvyšovač napětí), případně buck-boost konvertory (snižovač i zvyšovač napětí).[33]

U autonomních a hybridních FV systémů se používá převážně buck konvertor, neboť je potřeba snížit napětí FV panelů kvůli akumulátorům. Nejběžnější konfigurace akumulátorových bank je s napětím 12 V, 24 V a 48 V. Díky měniči napětí nedochází k tak velkému napěťovému omezení při konfiguraci zapojení FV panelů. Navíc se zvýší účinnost přenosu energie kvůli menším přenosovým ztrátám na přívodních vodičích. V důsledku to má dopad také na finance, kdy není potřeba drahých přívodních vodičů s velkým průřezem.[34]

Na obrázku 3.7 je schéma obvodu buck konvertoru. Nejjednodušší buck konvertor se skládá z cívky  $L_1$ , diody  $D1$ , kondenzátoru  $C_2$  a ze spínací prvku, většinou MOSFET tranzistoru.[34]



Obrázek 3.7: Schéma obvodu buck konvertoru neboli snižovače napětí.[34]

Vyhlazovací kondenzátor  $C_2$  slouží pro zmenšení zvlnění napětí způsobené spínáním obvodu, jinými slovy udržuje konstantní napětí. Vzhledem k tomu, že vybitý kondenzátor se chová na začátku svého nabíjení jako zkrat, může dojít k poškození spínacího prvku proudovými rázy vznikající při spínání. Aby k tomu nedocházelo, je do obvodu umístěna cívka  $L_1$ , která proudové rázy eliminuje a chrání tak spínaný prvek. Cívka také slouží jako

### 3. MODEL AUTONOMNÍHO/HYBRIDNÍHO FOTOVOLTAICKÉHO SYSTÉMU

zdroj konstantního proudu při rozepnutém stavu spínacího prvku. Dioda je určena pro usměrnění proudu do cívky v sepnutém stavu spínacího prvku nebo pro uzavření obvodu (proud z cívky do zátěže) v rozepnutém stavu. Spínání MOSFET tranzistoru je řízeno střídou z PWM generátoru, kde střída je určena pomocí vstupního napětí  $U_{in}$  násobené účinností měniče a požadovaného výstupního napětí  $U_{out}$ , viz. rovnice (3.24).[34]

$$D = \frac{U_{out}}{U_{in} \cdot \eta} \quad (3.24)$$

A zároveň platí:

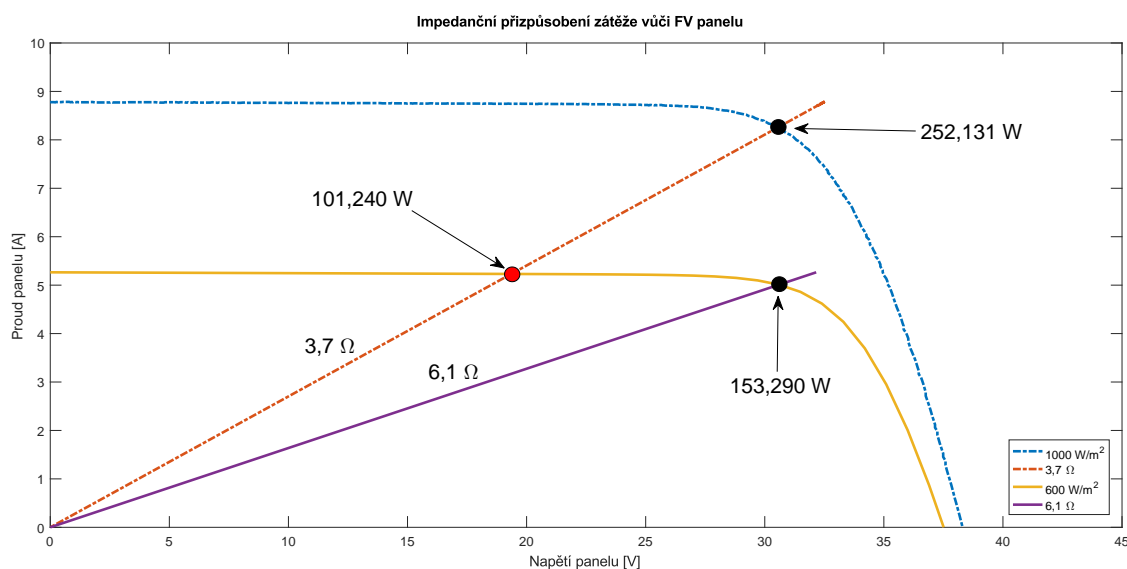
$$D = \frac{I_{in}}{I_{out}} \quad (3.25)$$

$$R_z = \frac{U_{out}}{I_{out}} \quad (3.26)$$

Díky těmto rovnicím lze odvodit, v čem spočívá impedanční přizpůsobení zátěže a zdroje elektrické energie. Základním principem je změna velikosti odporové zátěže z pohledu zdroje proudu, tuto změnu vyjadřuje rovnice (3.27).[34]

$$R_{ekviv} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = \frac{U_{out}}{I_{out} D \cdot \eta} = \frac{U_{out}}{I_{out} \cdot D^2 \cdot \eta} = \frac{R_z}{D^2 \cdot \eta} \quad (3.27)$$

Výsledkem tedy je, že buck konvertor zvětšuje pomocí střídavy velikost odporové zátěže. Díky tomu lze odebírat maximální výkon FV panelu. Impedanční přizpůsobení zátěže vůči FV panelu výstižně znázorňuje obrázek 3.8.[34]

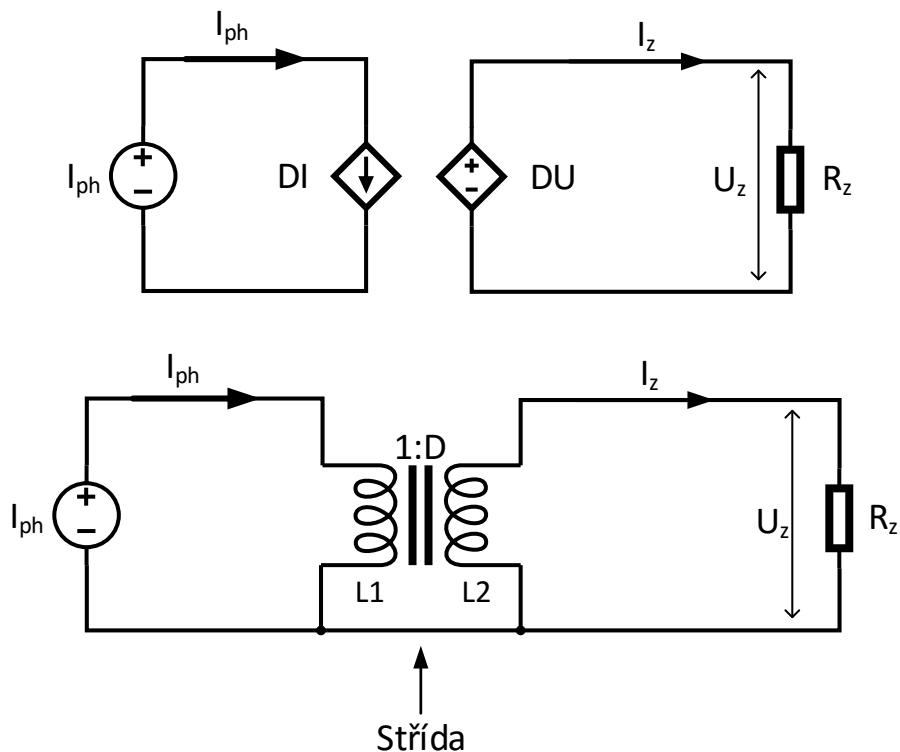


Obrázek 3.8: Impedanční přizpůsobení zátěže vůči FV panelu.[34]

Pro udržení FV panelu na maximálním bodu výkonu je potřeba zamezit zvlnění proudu při spínání a rozepínání spínacího tranzistoru na přívodné kabeláži od FV panelu (zdroj proudu  $I_{ph}$ ). Indukčnost přívodních kabelů v obvodovém schématu charakterizuje cívka  $L_2$ . Pro odstranění zvlnění proudu se před spínací tranzistor přidává paralelně zapojený kondenzátor  $C_1$ , který nejen zbavuje obvod proudového zvlnění, ale také vyhlazuje vstupní napětí (odstranění napěťových špiček).

Při modelování měniče napětí pomocí reálných elektronických prvků je potřeba použít Simscape Power Systems knihovnu. Bohužel použití reálných prvků má za následek nárůst času simulace a roste složitost modelu. Hlavní problém je spínaný MOSFET tranzistor s frekvencí spínání v řádech kilohertzů. Solvery v Simulinku totiž přepočítávají každou změnu způsobenou sepnutím a rozepnutím, kde důsledkem je značný nárůst výpočetního času simulace.

Vzhledem k tomu, že není potřeba simulovat přechodové charakteristiky, ale pouze zachovat poměr vstupního a výstupního výkonu snížený o účinnost měniče, lze DC-DC měnič modelovat pomocí jednoduchého transformátoru. Tento transformátor je sestaven z napěťového zdroje řízeného proudem a ze zdroje proudu řízeného napětím. Oba zdroje mají mezi sebou vzájemnou vazbu. Střída určuje transformační poměr mezi vstupním a výstupním napětím. Zjednodušený model měniče zobrazuje obrázek 3.9.[35]



Obrázek 3.9: Zjednodušený měnič napětí (buck konvertor).[35]

Nahrazením reálného měniče se lze jednoduše vyhnout složitosti a simulační náročnosti obvodu s MOSFET tranzistorem, a určování hodnot pro kondenzátory a cívku.

#### **3.3.3 Střídač a nabíječ akumulátorů**

Modelovat podrobně střídač není nutné. Požadavkem není totiž sinusový průběh na výstupu, ale pouze modelovat energetický tok procházející střídačem. Proto střídač bude modelován jako jednoduchý blok s konstantou, která charakterizuje účinnost střídače. To stejné platí pro nabíječ akumulátorů.

## FV systém v laboratoři UCEEB

Pro ověření přesnosti a funkčnosti modelu byl použit FV systém instalovaný ve fotovoltaické laboratoři, která se nachází v komplexu Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradě (obrázek 4.1).



Obrázek 4.1: Univerzitní centrum v Buštěhradě.[uceeb.cz]

Celý FV systém kromě FV panelů je složen z komponent od firmy Victron Energy. Panely jsou od korejské firmy S-Energy. Konkrétně se skládá z 6 FV panelů S-Energy, MPPT a nabíječe akumulátorů BlueSolar charge controller, z akumulátorů  $LiFePO_4$  a střídače Quattro. FV systém je taky doplněn podpůrnými monitorovacími komponentami jako LCD zobrazovač Color control GX, akumulátorový sledovač BMV-702 a VE.Bus BMS. Kompletní seznam komponent FV systému jsou uvedeny v tabulce 4.2.

FV panely jsou umístěny na střeše pod úhlem  $35^\circ$  na jihovýchod. Každý FV panel disponuje minimálním garantovaným výkonem 250 W při STC. Zapojení panelů je do dvou větví, kde každá větev obsahuje tři panely zapojené do série. Samotný panel je postaven na polykrystalické technologii a obsahuje 60 FV článků zapojených do série.

Komponenty jsou umístěny v laboratoři, která je klimatizovaná v rozmezí  $22,5^\circ - 25^\circ C$ . Díky tomu je zamezeno vlivu teploty na výkon, respektive účinnost jednotlivých komponent.

#### 4. FV SYSTÉM V LABORATOŘI UCEEB

Počet	druh komponenty	Název a typ komponenty
6	FV panel	S-Energy SM-250PC8
1	Regulátor nabíjení + MPPT	Victron Energy BlueSolar MPPT 150/70
4	Akumulátor	Victron Energy LFP-BMS 12,8/200
1	BMS	Victron Energy VE.Bus BMS
1	Střídač + nabíječ akumulátorů	Victron Energy Quattro 48/5000/70-100/100-S
1	akumulátorový sledovač	Victron Energy BMV-702
1	Monitorovací a řídicí panel	Victron Energy Color Control GX

Tabulka 4.1: Seznam komponent instalovaných v laboratoři UCEEB.

Od panelů jsou vodiče zapojeny do BlueSolar charge controlleru. Jedná se v podstatě o MPP sledovač s buck konvertorem včetně nabíječky akumulátorů. BlueSolar je stavěn až na 150 V jmenovitého napětí na FV panelech, takže lze flexibilně nakonfigurovat FV panely tak, aby nedocházelo k velkým výkonovým ztrátám na vodičích. BlueSolar charge controller nabízí pro různé typy akumulátorů na míru přizpůsobené nabíjecí algoritmy pro co nejefektivnější ukládání vyrobené energie z panelů. BlueSolar podporuje akumulátorové banky a napětích 12 V, 24 V a 48 V.

Výstupní vodiče z BlueSolar charge controlleru jsou připojeny na svorky akumulátorové banky složené ze čtyř  $LiFePO_4$  akumulátorů zapojených do série. Každý akumulátor je složen ze čtyř článků s celkovou jmenovitou kapacitou 200 Ah a se svorkovým napětím 12,8 V. Součástí každého akumulátoru je load balancer<sup>1</sup> pro srovnání napětí na jednotlivých článcích. Akumulátor kromě výstupních svorek obsahuje také dva konektory pro připojení BMS.

Z akumulátorové banky jsou vyvedeny vodiče do střídače Quattro. Mezi akumulátorovou bankou a střídačem je na minusový pól umístěn bočník akumulátorového sledovače BMV-702. Jedná se v podstatě o lepší multimetr se schopností měřit a logovat základní elektrické veličiny, teplotu a různé stavy akumulátoru, jako například nízký stav nabití, přebíjení atd.

Poslední hlavní komponentou FV systému je hybridní střídač Quattro. Tento střídač kombinuje více funkcí. Samozřejmostí je transformace napětí z akumulátorů na 230 V a přeměna stejnosměrného napětí respektive proudu na střídavý proud s čistým sinusovým průběhem.

Další funkcí Quattro je možnost nabíjet akumulátory. Quattro obsahuje dva nezávislé vstupy s detekcí pro střídavé napětí, které slouží pro připojení generátoru nebo distribuční sítě. V případě nedostatku uchované energie v akumulátorech a bez dostatečné intenzity záření lze tedy akumulátory nabít pomocí Quattro.

Quattro obsahuje také dva výstupy, kde jeden výstup je opatřen programovatelným relé. Toto relé lze nakonfigurovat tak, aby v případě nedostatečné energie poskytované FV panely nebo generátorem, odpojil spotřebiče připojené na tento výstup, aby nedocházelo k rychlému vybíjení akumulátorů.

<sup>1</sup>Zařízení pro vyvažování zátěže.

Zobrazovač Color control GX slouží k monitorování a logování celého FV systému. Jedná se o ovládací a řídicí panel, který sbírá a ukládá data ze všech komponent FV systému. Nasbíraná data vyhodnocuje a poté zobrazuje na LCD displeji v reálném čase. CCGX poskytuje webové rozhraní, přes které lze systém ovládat vzdáleně. Další funkcí je ukládání naměřených dat na servery společnosti Victron. Tyto data jsou přístupná také přes webové rozhraní, které vyhodnocuje a zobrazuje data do uživatelsky přívětivých grafů.

## 4.1 Extrakce parametrů a validace modelu

Aby bylo možné zajistit správné fungování celého FV modelu, je nejprve nutné ověřit jednotlivé komponenty modelu. Ze všeho nejdřív je nutné extrahovat potřebné parametry z katalogových listů výrobce a poté otestovat funkčnost a přesnost modelu s danými parametry. Model akumulátoru je již ověřen v kapitole 2, včetně extrakce parametrů.

## 4.2 FV panel

Pro FV panel jsou k dispozici parametry ze dvou zdrojů. Jednak z katalogového listu výrobce a také z flash testu. Pro porovnání budou uvedeny oba zdroje. V modelu budou použity pouze parametry z flash testu, které jsou přesnější a určují vlastnosti konkrétního FV panelu umístěného na střeše univerzitního centra.

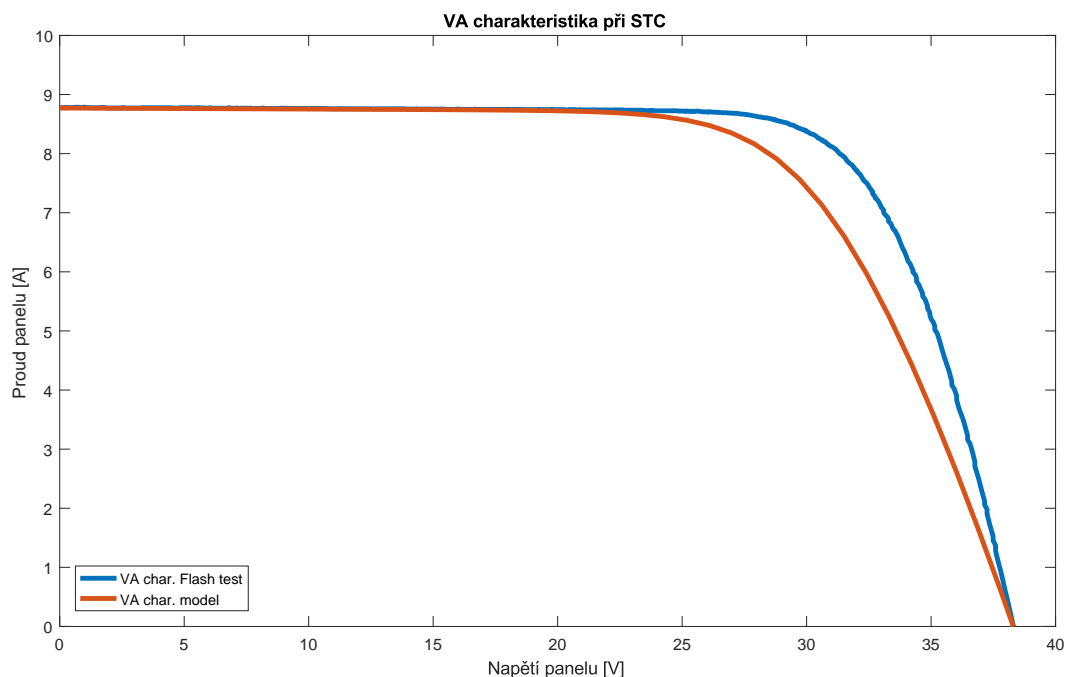
Elektrické vlastnosti při STC	Katalogový list	Flash test
Jmenovitý výkon $P_{max}$ [W]	250	252,131
Napětí při max. výkonu $U_{mp}$ [V]	30,8	30,557
Proud při max. výkonu $I_{mp}$ [A]	8,14	8,251
Zkratový proud $I_{sc}$ [A]	8,67	8,781
Napětí nakrátko $U_{oc}$ [V]	37,5	38,318
Účinnost panelu $[\eta]$ [%]	15,03	15,16
Sériový odpor $R_s$ [ $\Omega$ ]	neuveďeno	0,6
Paralelní odpor $R_p$ [ $\Omega$ ]	neuveďeno	569,7
Teplotní koeficient pro $I_{sc}$ [%/ $^{\circ}C$ ]	0,052	neuveďeno
NOCT teplota [ $^{\circ}C$ ]	$45 \pm 3$	neuveďeno

Tabulka 4.2: Parametry FV panelu z katalogového listu a z flash testu.[36]

Validace modelu byla provedena srovnáním dat z flash testu a ze simulace. Výsledek zobrazuje obrázek 4.2.

Na obrázku jde vidět, že model neodpovídá naměřeným datům z flash testu. Problém je v nízké „strmosti“ VA charakteristiky modelu. Tato vlastnost závisí na proudu diody v závěrném směru  $I_0$ . V tomto proudu jsou pouze dvě veličiny, které lze prakticky změnit.





Obrázek 4.2: Srovnání VA charakteristiky modelu a flash testu.

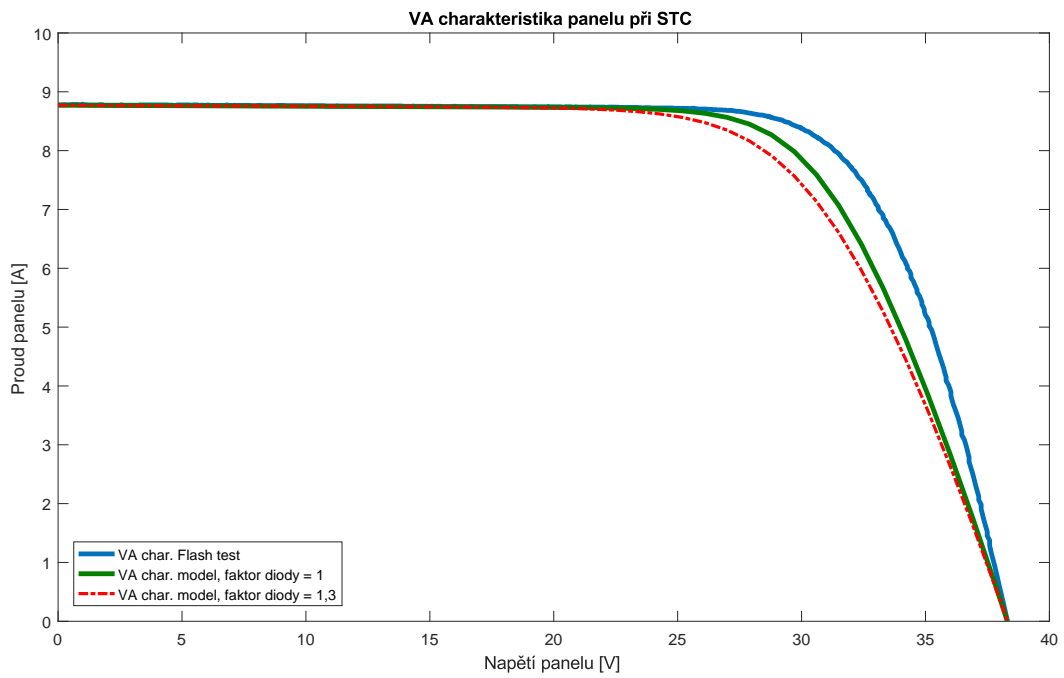
Jedná se o faktor ideálnosti diody  $n$  a sériový odpor  $R_s$ . Jelikož sériový odpor  $R_s$  byl změřen pomocí flash testu, zbývá pouze snížení faktoru diody z 1,3 na 1 (rozsah hodnoty se pohybuje mezi 1 až 2). Výsledek VA charakteristiky po úpravě zobrazuje obrázek 4.3.

Z obrázku je evidentní, že úprava faktoru diody nepomohla. Podařilo se zvětšit strmost VA charakteristiky, avšak stále to neodpovídá naměřeným datům z flash testu. Nezbývá nic jiného než zkusit změnit sériový odpor  $R_s$ . Po změně sériového odporu  $R_s$  z hodnoty  $0,6 \Omega$  na  $0,38 \Omega$  odpovídá VA charakteristika modelu s velmi dobrou přesností naměřeným datům z flash testu.

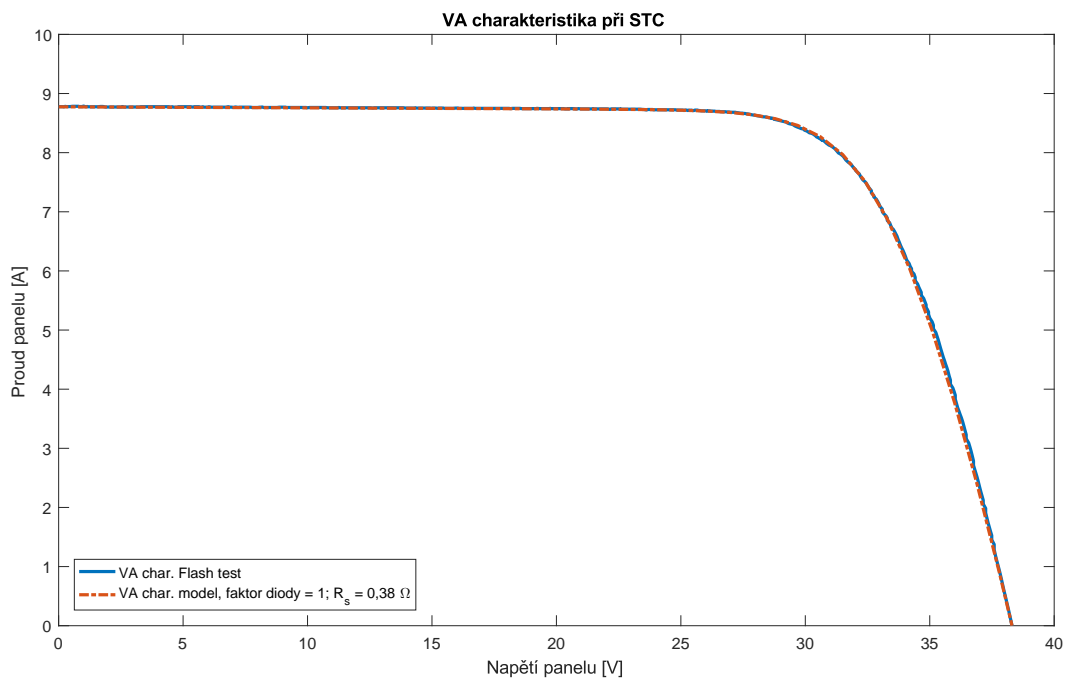
Ted' už zbývá pouze ověřit schopnost FV modelu zohlednit závislost výkonu FV panelu na intenzitě záření a na teplotě článku. Tyto VA charakteristiky zobrazují obrázky 4.5 a 4.6.

Na obrázcích je jasně zřetelné, že model zohledňuje vliv teploty a vliv intenzity záření na VA charakteristiku FV panelu.

Tímto bylo ověřeno správné fungování modelu FV panelu. Model FV panelu vytvořený v Simulinku je zobrazen v příloze B. V příloze F jsou PV charakteristiky modelu FV panelu.

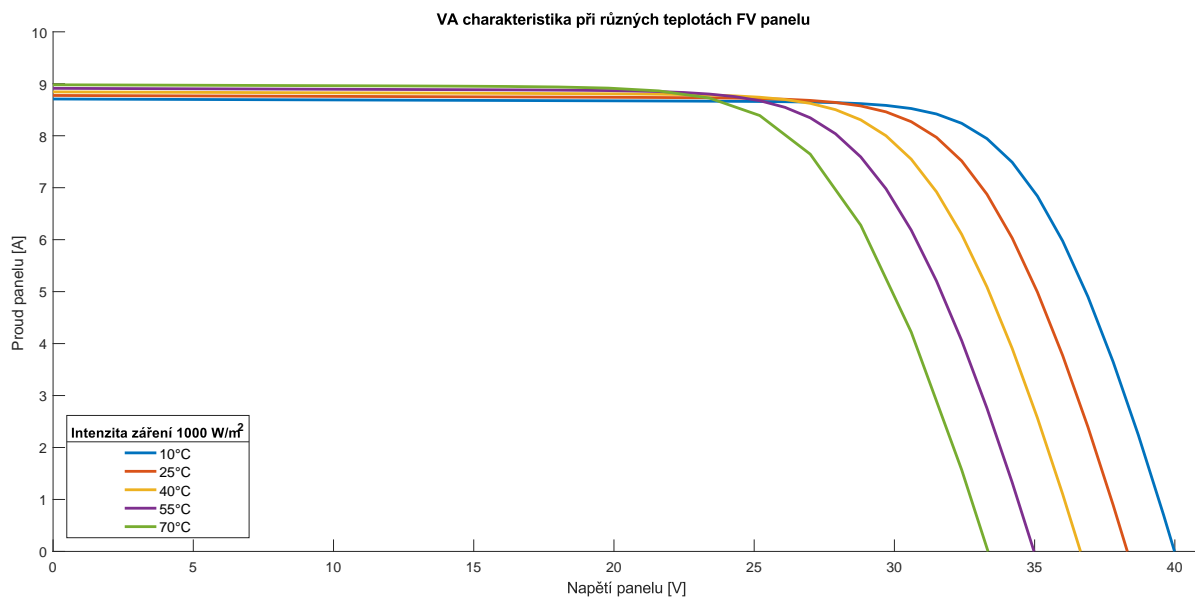


Obrázek 4.3: Srovnání VA charakteristiky modelu a flash testu po úpravě  $n$ .

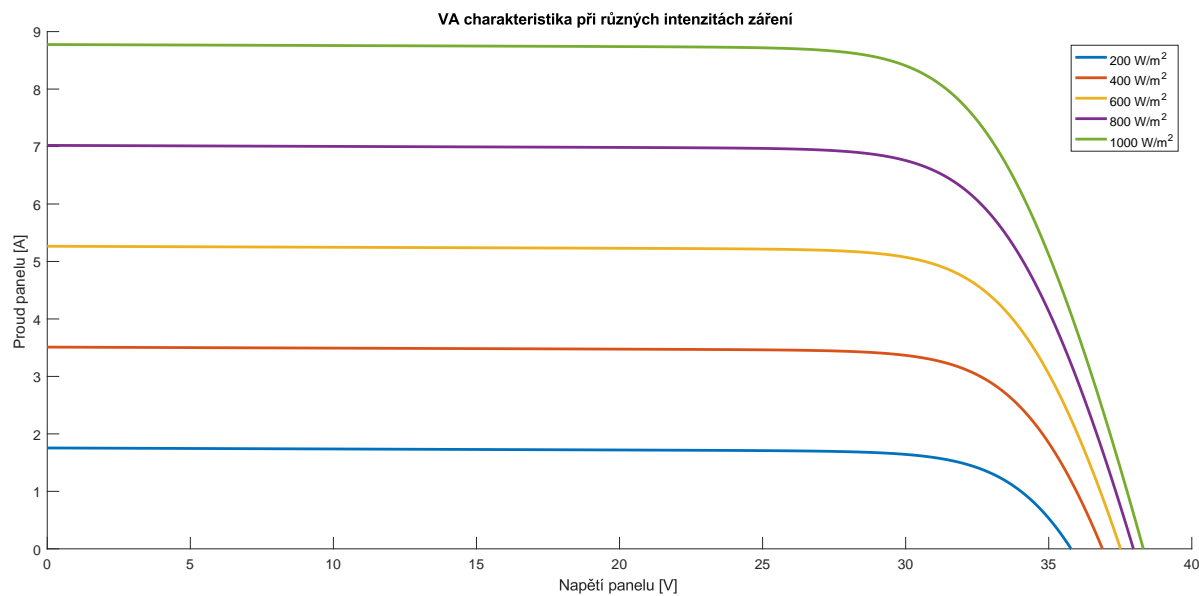


Obrázek 4.4: Srovnání VA charakteristiky modelu a flash testu po úpravě  $n$  a  $R_s$ .

#### 4. FV SYSTÉM V LABORATOŘI UCEEB



Obrázek 4.5: VA charakteristiky modelu při různých teplotách FV panelu.



Obrázek 4.6: VA charakteristiky modelu při různých intenzitách záření.

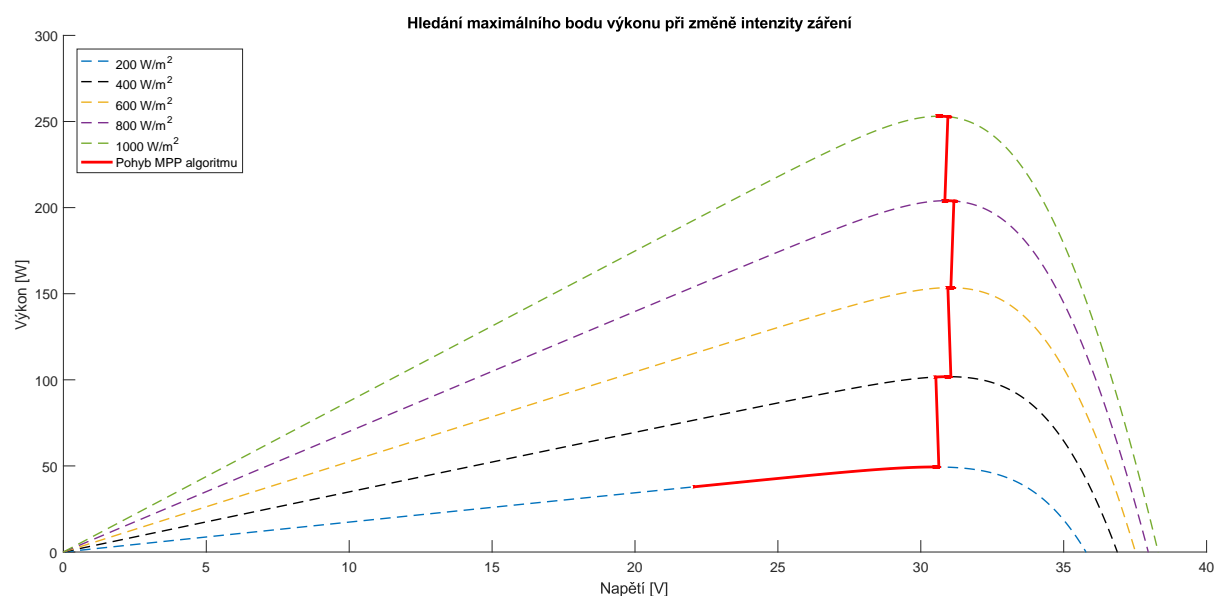
### 4.3 MPPT, měnič napětí a regulátor nabíjení

U MPPT regulátoru nabíjení je potřeba znát z katalogového listu výrobce pouze účinnost podle napětí akumulátorů a spotřebu samotného regulátoru. Jelikož došlo ke značnému zjednodušení modelu, není potřeba více parametrů z katalogového listu výrobce.

Účinnost MPPT regulátoru se pohybuje v katalogovém listu mezi 95% až 97,5%, dle napětí na akumulátorech. Pro napětí 48 V činí účinnost při plném zatížení 97,5 % a vlastní spotřeba 1 W. Vzhledem k tomu, že regulátor nepojede vždy na maximální výkon (s nižším výkonem klesá také účinnost), byla do modelu vzata nižší hodnota. Vlastní spotřeba regulátoru bude přičtena k požadovanému výkonu pro zátěž na výstupu střídače.[37]

Jelikož není technicky možné přímo porovnat model MPPT regulátoru s reálným regulátorem, bude ověřena pouze principiální funkčnost modelu. Důvodem je odstranění elektrických prvků, kde se model chová navenek jako napěťový transformátor s danou účinností.

Nejprve byl ověřen samotný algoritmus pro hledání maximálního bodu výkonu. V průběhu simulace byla zvyšována intenzita záření dopadající na FV panel z  $200 \text{ W/m}^2$  na  $1000 \text{ W/m}^2$  při stálé teplotě  $25^\circ\text{C}$ . Na obrázku 4.7 je zobrazen záznam pohybu algoritmu po jednotlivých PV charakteristikách FV panelu.



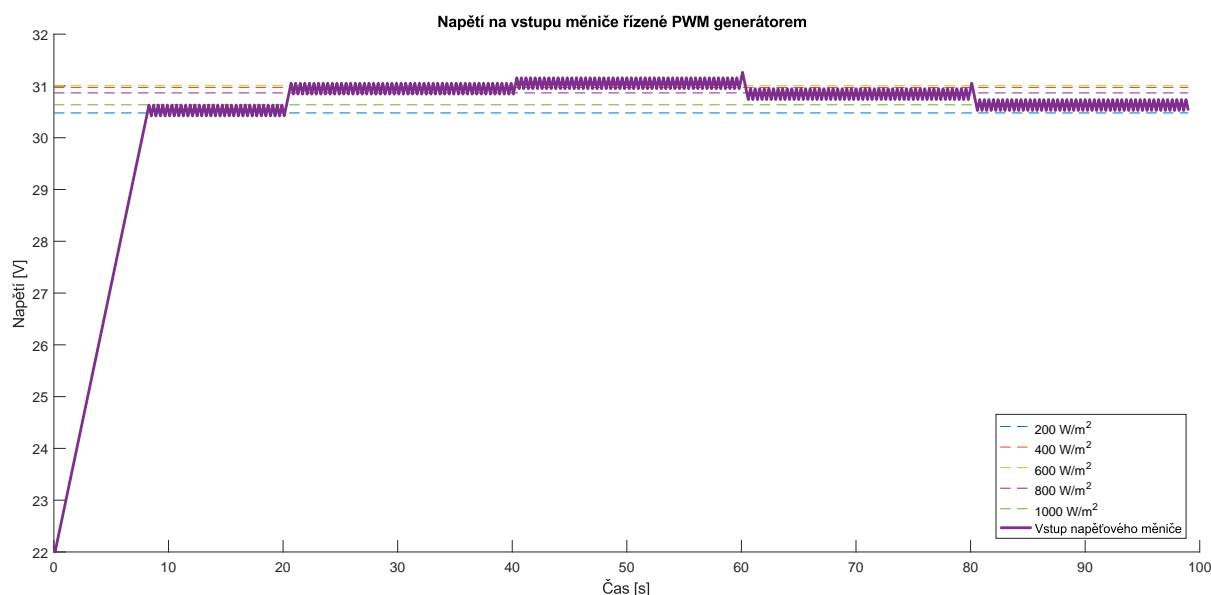
Obrázek 4.7: Hledání maximálního bodu výkonu při změně intenzity záření.

Z obrázku je zřetelná správná funkčnost MPP algoritmu. Na začátku trvá déle, než algoritmus najde maximální bod výkonu, ale po počáteční inicializaci je rychlost vyhledávání vysoká. Na výkonových křivkách lze vidět pohyb algoritmu jak doleva tak doprava po výkonové křivce. To potvrzuje správnost algoritmu, kdy algoritmus v případě zjištění

## 4. FV SYSTÉM V LABORATOŘI UCEEB

menšího výkonu než v předchozím kroku změni směr dalšího kroku. Model MPPT algoritmu v Simulinku je zobrazen v příloze C.

V další fázi byla ověřena činnost PWM generátoru a napěťového měniče. Ověření spočívá v porovnání napětí maximálního bodu výkonu při dané intenzitě ozáření a vstupního napětí na napěťovém měniči. Výsledek porovnání zobrazuje obrázek 4.8.



Obrázek 4.8: Napětí na vstupu měniče řízené PWM generátorem při různých intenzitách záření.

Na obrázku je viditelná oscilace hodnoty napětí. Toto kmitání je způsobené podstatou fungování P&O algoritmu viz 3.3.1.1, kde velikost kmitání závisí na velikosti kroku. Z obrázku lze jednoznačně usoudit, že napěťový měnič spolu s MPP algoritmem funguje velmi dobře. Model měniče napětí včetně MPPT a FV panelu je zobrazen v příloze D.

### 4.4 Střídač

Jak už bylo řečeno, střídač je modelován pouze jako blok s konstantou účinností. Stejně tak jako u MPPT regulátoru tak i u střídače byla zjištěna jeho účinnost a vlastní spotřeba. Účinnost střídače při napětí akumulátorů 48 V činí 95% a vlastní spotřeba činí 35 W, která bude přičtena k požadovanému výkonu zátěže.[38]

## Porovnání instalovaného FV systému a modelu

Po extrakci parametrů pro jednotlivé modely komponent zbývá ověřit funkčnost celého modelu FV systému. Pro ověření byla použita data z monitorovacího panelu CCGX a ze záznamového zařízení složené z PLC<sup>1</sup> firmy TECO a z křemíkového čidla firmy Mencke & Tegtmeyer měřící intenzitu záření a teplotu článku. Čidlo je nainstalováno na střeše ve stejném úhlu jako jsou FV panely, tudíž není potřeba hodnoty přepočítávat pro správný úhel. To stejné platí pro čidlo teploty, které je přímo umístěné pod FV článkem. Pro ověření modelu byla použita naměřená data v časovém rozpětí čtyř hodin. V den měření byla velká oblačnost, kde se skokově měnila intenzita záření a teplota článku. To mohlo mít značný vliv na výkonové rozdíly modelu a reálného FV systému.

Při nastavování bohužel nebylo možné přesně synchronizovat oba záznamové systémy na shodný čas a na stejný časový interval mezi jednotlivými záznamy měřených veličin. U CCGX nejnižší možný časový interval je 1 minuta, což bylo při rychle se měnící intenzitě záření poměrně dlouhá doba. U záznamového zařízení pro intenzitu a teplotu byl nastaven časový interval na 5 sekund. Ve výsledku to znamená, že změna intenzity záření se projeví v datech z CCGX v nejlepším případě ihned a v nejhorším případě až za 59 sekund.

Průběh experimentálního měření byl následující. Ze začátku byl na zátěžích nastaven požadovaný výkon 1327 W. Poté po 169 minutách byl požadovaný výkon zátěží zvýšen na 2638 W. Ke konci experimentálního měření (217 minut od začátku) byly zátěže vypnuty a probíhalo pouze nabíjení akumulátorů z FV panelů. Shrnutí výsledků je v následujících odstavcích.

Na obrázku 5.1, v prvním grafu je zobrazena naměřená intenzita záření dopadající na FV panely. Ve druhém grafu je porovnání výstupního proudu z panelů modelu a reálných FV panelů. Je evidentní, že průběh proudu má stejný tvar jako intenzita záření. To znamená, že mezi intenzitou a výstupním proudem je lineární závislost. Na jednotlivých grafech lze vidět nepřesnost dat z CCGX, které jsou způsobené velkým časovým intervalem mezi jednotlivými naměřenými vzorky. U modelu a experimentálního měření jsou jednot-

<sup>1</sup>Programovatelný průmyslový počítač používaný v automatizaci.

livé body (vzorky) dané veličiny propojeny pomocí lineární interpolace. Na třetím grafu je porovnání výstupního napětí z FV panelu a modelu. Z grafu lze vyčíst větší kmitání výstupního napětí v modelu. Tyto změny jsou způsobeny rychlými změnami teploty článků, kde teplota článku závisí na velikosti intenzity záření dopadající na FV panel. Poslední graf zobrazuje celkový výstupní výkon z FV panelů modelu a reálných FV panelů. Z grafu lze vyčíst, že model dává oproti reálným FV panelům větší výstupní výkon. Je to z důvodu absence zohlednění vlivu zastínění FV panelů. V den měření byla velká oblačnost, kde s největší pravděpodobností na FV nedopadala stejná intenzita záření. To potvrzuje i graf zobrazující výstupní proud, kde v modelu je oproti reálným FV panelům větší.

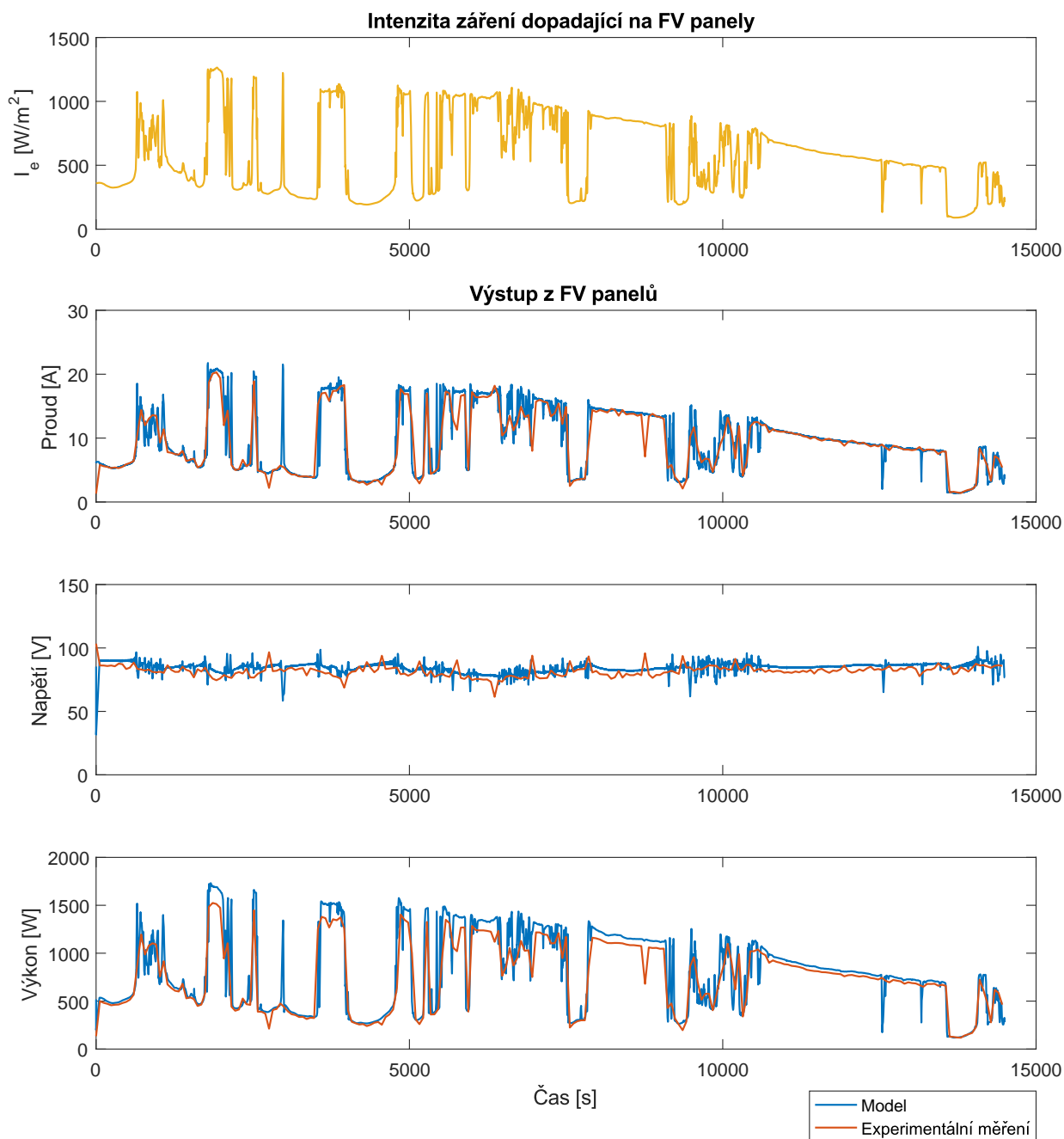
V další fázi je porovnání výstupu reálného MPPT regulátoru a modelu. Obrázek 5.2 zobrazuje výstupní proud, napětí a výkon z MPPT regulátoru. Vzhledem k tomu, že FV panely v modelu dávají větší výstupní výkon, zákonitě se to projeví také na výstupu MPPT regulátoru. V druhém grafu, představující napětí, lze vidět na počátku simulace větší rozdíl mezi modelem a reálným MPPT regulátorem. Příčinou bylo rozdílné počáteční svorkové napětí modelu akumulátoru a reálného akumulátoru. I když akumulátorový snímač zobrazoval stav nabití reálných akumulátorů 100%, napětí tomu neodpovídalo. V průběhu simulace se tento rozdíl postupně snížil.

Další komponentou pro porovnání jsou akumulátory. Grafické srovnání zobrazuje obrázek 5.3. První graf vyjadřuje vybíjecí (záporný) nebo nabíjecí (kladný) proud tekoucí skrz akumulátory. Druhý graf, vyjadřující napětí na akumulátorech, je stejný jako u MPPT regulátoru, neboť výstup z regulátoru je připojen přímo na svorky akumulátorů. Důležitý je poslední graf, který vyjadřuje stav nabití akumulátorů. Na grafu je evidentní, že na začátku experimentálního měření model přesně kopíruje reálný stav. Avšak v pozdější fázi vybíjení se model akumulátoru vybíjí pomaleji. Důvodem je vyšší výstupní proud z modelu FV panelů, který je dodáván do FV systému. Tudíž v modelu stačí pro pokrytí požadovaného výkonu zátěžemi menší proud.

Posledním porovnáním, respektive pouze ověřením správnosti modelu, je vstup do střídače, viz obrázek 5.4. Na prvním grafu je proud tekoucí do střídače, kde bohužel nelze díky měřítku zřetelně vidět rozdíl mezi vstupním proudem modelu, a reálným vstupem střídače. V modelu je nižší vstupní proud z důvodu vyššího vstupního napětí (druhý graf) oproti reálným vstupům střídače. Třetí graf potvrzuje, že požadovaný výkon v modelu odpovídá požadovanému výkonu na vstupu reálného střídače.

Podle grafů lze jednoznačně říci, že model je velmi přesný a je adekvátně schopen simulovat reálný FV systém. Dalším velmi dobrým výsledkem je průměrný čas simulace, který činí 2 minuty a 22 vteřin při simulaci čtyř reálných hodin. Samozřejmě tento čas je závislý na použitém solveru v Simulinku. Simulaci lze výrazně urychlit zvolením solveru s variabilním krokem místo pevného kroku na úkor přesnosti.

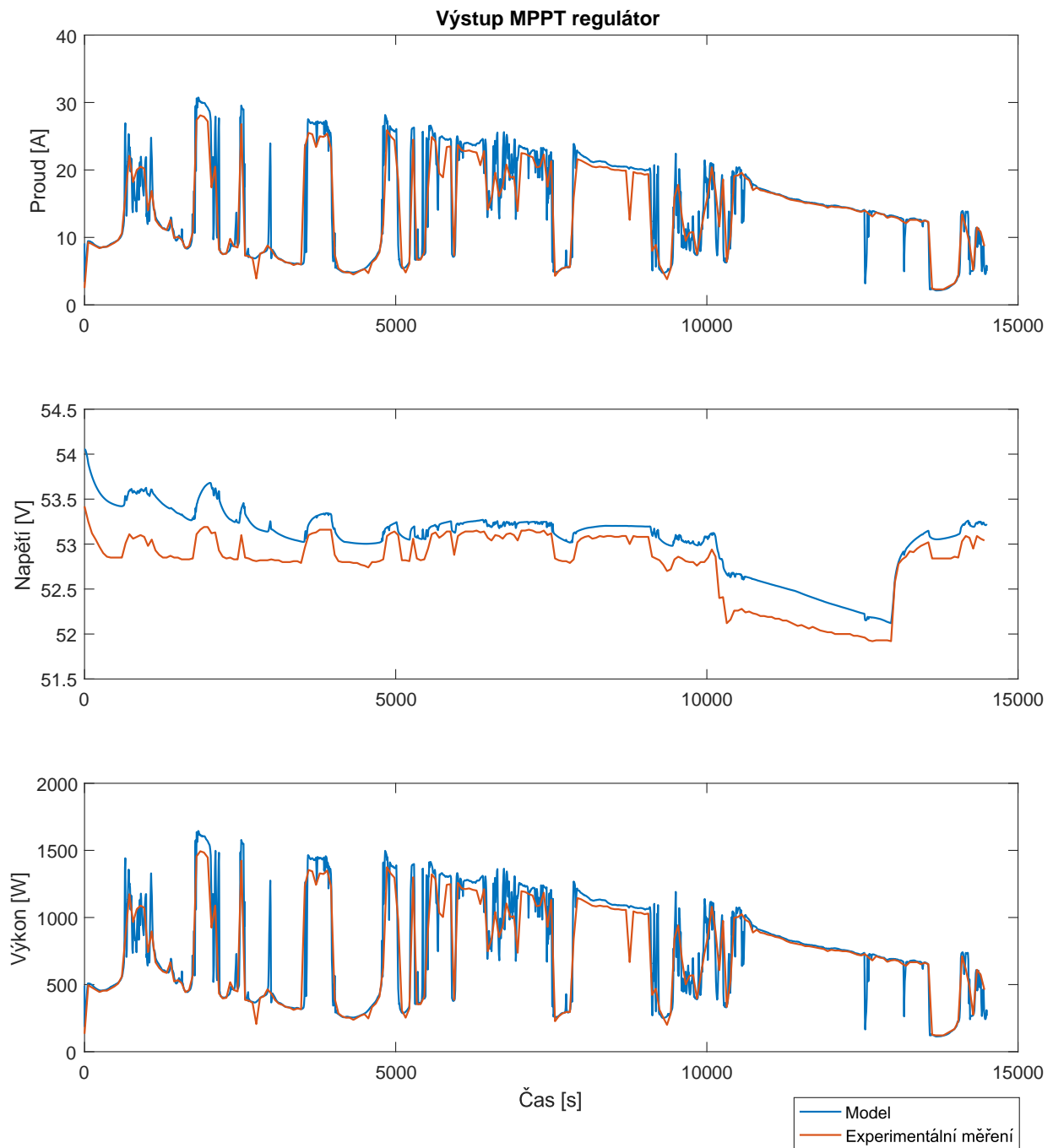
Výpočty statistických ukazatelů pro stanovení chyb nebyly provedeny z důvodu odlišného časového intervalu při záznamu dat. Hodnoty by byly značně zkreslené a neodpovídaly by tak realitě. Simulink model celého FV systému je zobrazen v příloze E.



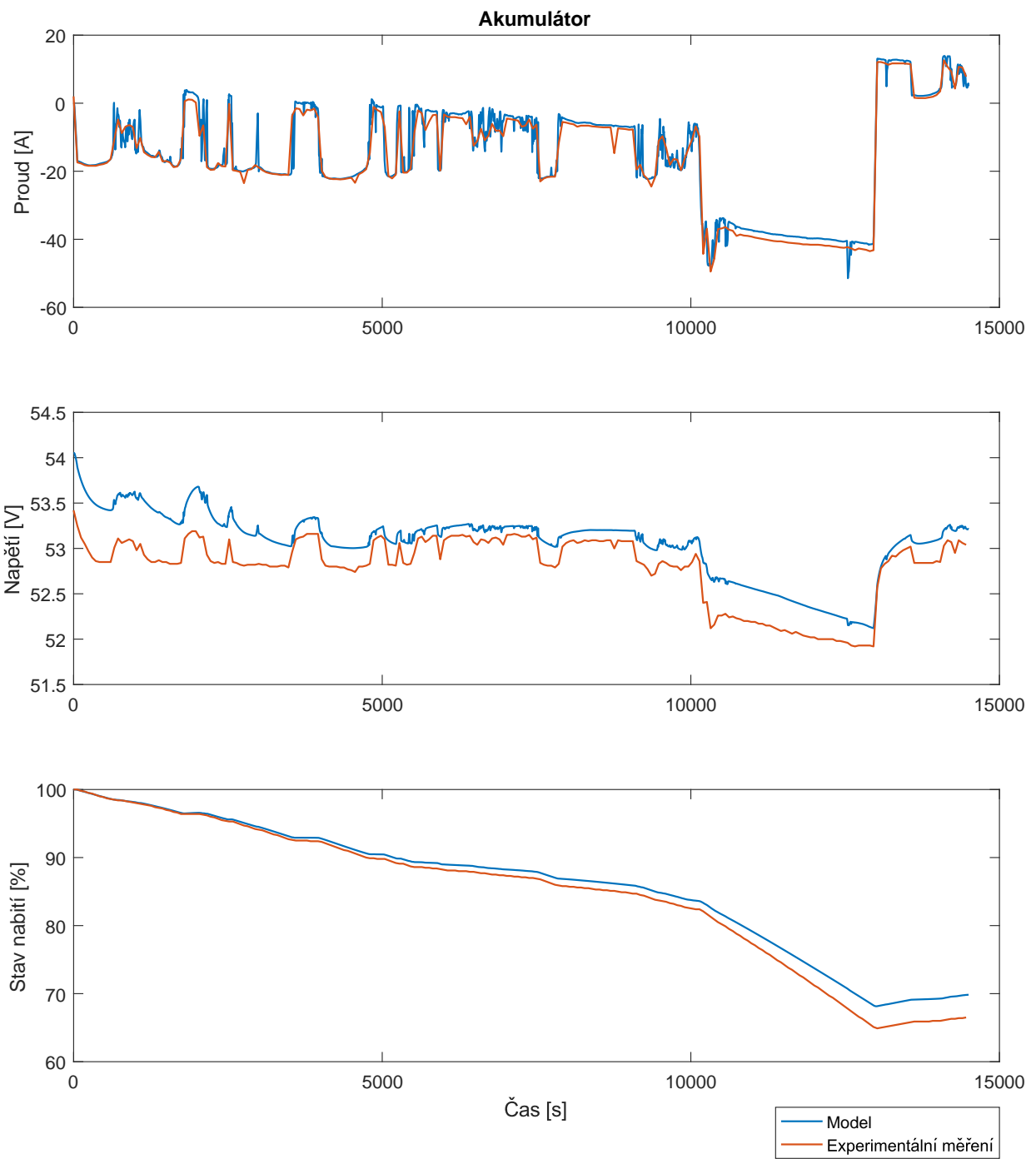
Obrázek 5.1: Porovnání výstupu reálných FV panelů a modelu.



## 5. POROVNÁNÍ INSTALOVANÉHO FV SYSTÉMU A MODELU

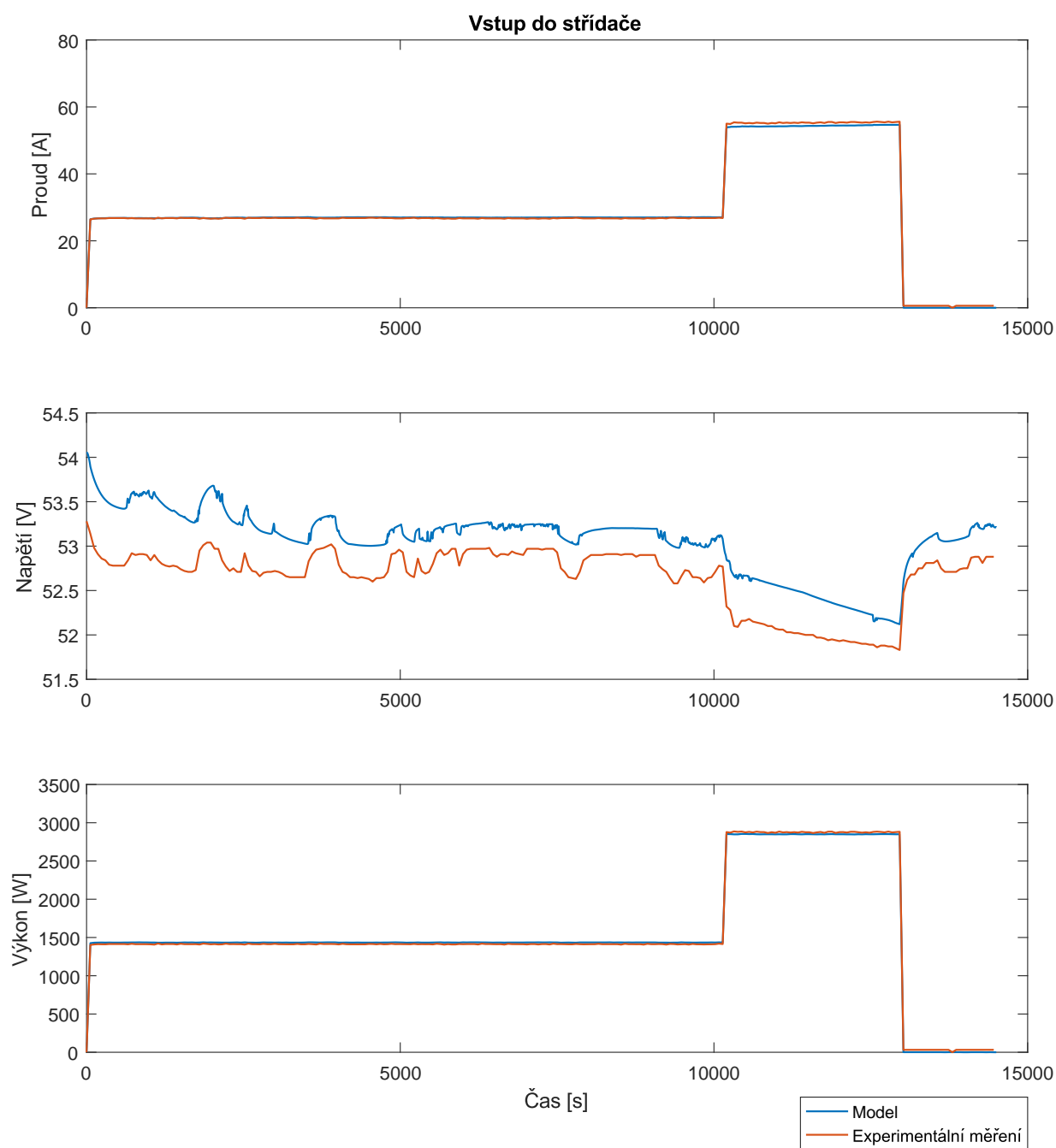


Obrázek 5.2: Porovnání výstupu reálného MPPT regulátoru a modelu.



Obrázek 5.3: Porovnání výstupu reálného akumulátoru a modelu.

## 5. POROVNÁNÍ INSTALOVANÉHO FV SYSTÉMU A MODELU



Obrázek 5.4: Porovnání vstupu reálného střídače a modelu.

## Variabilita vytvořeného FV systému

Na variabilitu vytvořeného FV systému lze pohlížet ze dvou úhlů. Prvním z nich je schopnost FV modelu simulovat i jiné autonomní nebo hybridní FV systémy, než použitý referenční FV systém instalovaný na univerzitním centru v Buštěhradě. Vzhledem k tomu, že pro úspěšnou simulaci je potřeba extrakce parametrů z běžně dostupných katalogových listů výrobců komponent, lze celkem s jistotou říct, že model je variabilní. Dokonce lze model po menší úpravě použít pro simulaci FV systémů připojených do gridu.

Jediný zádrhel může nastat u modelu akumulátorů. Jelikož pro simulaci akumulátorů je potřeba konkrétní akumulátor experimentálně změřit, nastává otázka co v případě modelování navrhovaného FV systému, který ještě není nainstalován a zprovozněn. Naštěstí i pro tento případ existuje řešení. V Simulinku je již implementovaný generický model akumulátoru (viz. sekce 2.2.12), který lze použít místo původního modelu akumulátoru. Potřebné parametry pro tento generický model jsou běžně dostupné z katalogového listu výrobce. Díky tomu je zaručena univerzálnost modelu FV systému i pro navrhované FV systémy.

Druhým úhlem pohledu je porovnání modelu vůči jiným aplikacím zabývající se simulacemi FV systémů. Jelikož trh s FV systémy stále roste, objevuje se více aplikací zabývající se fotovoltaikou a obecně obnovitelnými zdroji energie. Jednou z mnoha je například aplikace Homer. Tato hojně používaná aplikace je založena na anizotropním modelu pro modelování FV systémů. Je zejména určena pro vyhodnocení ekonomické a technické proveditelnosti FV systému, kde navíc zohledňuje například dostupnost energetický zdrojů, cenu komponent, atd. Výstupem simulace je například konfigurace různých FV systémů včetně aktuálních nákladů na jednotlivé konfigurace. Součástí výstupu jsou také grafy, které slouží pro přehledné srovnání konfigurací z ekonomického a technického hlediska. Bohužel i tato aplikace trpí jistými nedostatky. Například nezohledňuje stav nabití akumulátoru respektive stupeň vybití, což hraje velkou roli při optimalizaci hybridního nebo autonomního FV systému. Déle pak nezohledňuje změny intenzity záření v jednotlivých hodinách během dne. Navíc Homer neřeší měnící se napětí na vstupech a výstupech jednotlivých komponent.[39]

Ve srovnání vytvořeného modelu s aplikací Homer je evidentní, že model těmito nedostatky nedisponuje. Vzhledem k tomu, že aplikace byla vyvinuta v roce 1993, disponuje

mnohem větší funkcionalitou oproti vytvořenému modelu. Tím, že model byl vytvořen v Simulinku, lze spoustu funkcí dodatečně implementovat. Výhodou Simulinku je jeho univerzálnost a přizpůsobitelnost čemukoliv. Vyvíjené aplikace jako Homer jsou sice robustní, ale velmi uzavřené a pokud potřebná funkce není dodána výrobcem, uživatel nemá možnost implementovat si funkci sám.

Další aplikací je například RETScreen. Zajímavostí je, že aplikace má k dispozici data z více než 6000 pozemních meteorologických stanic. Dále pak obsahuje mapy energetických zdrojů, produktová data FV panelů, výkonové křivky větrných turbín atd. Pomocí aplikace RETScreen lze například určit životnost a ekonomickou rentabilitu systému z obnovitelných zdrojích energie. Samozřejmě i tato aplikace má určité limity. Asi nejzásadnější je absence vlivu teploty na výkon FV panelu, což vytvořený model zohledňuje.[39]

Samozřejmě existuje spousta dalších kvalitních aplikací pro FV systémy jako PVsyst, PVsol, Insel, Ares atd. Bohužel bližší seznámení s těmito aplikacemi je již nad rámec této diplomové práce. Vytvořený model zdaleka neobsahuje tolik funkcí jako zmíněné aplikace, avšak pro základní simulace je model díky své jednoduchosti a přijatelné přesnosti naprosto dostačující.

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření modelu pro simulace hybridních a autonomních FV systémů. Na začátku diplomové práce v kapitole 2 je proveden teoretický rozbor modelů pro akumulátor a následný výběr nejvhodnějšího typu. Z kapitoly je zřejmé, že modelování akumulátorů je velmi složité právě díky přeměně elektrické energie na energii chemickou. V této části také najdeme způsob extrakce parametrů z přechodových charakteristik pro modelované akumulátory a následné ověření funkčnosti modelu. Z výsledků je zřejmé, že model akumulátorů je velice přesný a splňuje všechny požadavky pro modelování akumulátoru. Konkrétně směrodatná odchylka modelu akumulátoru od skutečného je 90 mV pro vybíjecí proud 30 A a 124 mV pro vybíjecí proud 90 A.

Další kapitola byla věnována modelování zbývajících komponent FV systému. Cílem bylo vybrat co nejjednodušší a dostatečně přesné modely tak, aby splňovali požadovaná kritéria. Velkým přínosem v této kapitole je značné zjednodušení měniče napětí, což mělo velmi pozitivní vliv na výpočetní čas simulace. Kapitola také poukazuje na fakt, že není nutné modelovat přesně všechny komponenty jako například střídač nebo nabíječ akumulátorů.

Kapitola 4 je velmi důležitou, neboť je zde provedeno ověření správnosti jednotlivých modelů daných komponent. Model FV panelu ukázal, že je někdy potřeba upravit parametry z katalogových listů, nebo z experimentálního měření pro docílení větší přesnosti. Ověření funkčnosti jednotlivých komponent proběhlo v pořádku a potvrdilo se, že jednotlivé modely komponent jsou správně navrhnuté a sestaveny.

Za stěžejní a kritickou část považuji kapitolu 5, ve které byla provedena simulace vůči reálnému FV systému instalovaném na univerzitním centru energeticky efektivních budov v Buštěhradě. Simulace se povedla v podstatě na první pokus bez větších zásahů do modelu a pouze potvrdila kvalitu a správnost vytvořeného modelu FV systému. Bohužel vzhledem k rozdílnému času systémů záznamových zařízení a rozdílnému časovému intervalu mezi jednotlivými vzorky měřených veličin, byla velice náročná práce s naměřenými daty. Musely být provedeny rozsáhlé korekce dat a časů pro zajištění konzistentnosti experimentálních dat mezi sebou. Díky tomu nelze správně určit směrodatnou odchylku a další statistické ukazatele, neboť výsledky by byly značně zkreslené. V den měření byla velká

oblačnost, kvůli které se jednotlivé měřené veličiny rychle měnily v závislosti na intenzitě záření dopadající na FV panely. Jinými slovy, některé změny, které proběhly v modelu, nebyly zaznamenány na reálném FV systému kvůli příliš velkému časovému intervalu mezi jednotlivými vzorky monitorovacího panelu CCGX. Nicméně podle grafů ze simulací a experimentálních měření lze jednoznačně říct, že model pracuje správně a dokáže s velmi dobrou přesností modelovat reálný FV systém.

V poslední kapitole je nastíněna variabilita vytvořeného modelu a okrajově provedené srovnání s jinými aplikacemi pro modelování FV systémů.

Přínos v modelování a simulacích FV systémů je nepopiratelný. Modely značně ulehčují jejich vývoj, optimalizaci a provoz. Modely mohou sloužit také pro hledání kritických stavů, aniž by došlo k poškození reálných komponent nebo k hledání příčiny při selhání FV systému. Tyto fakta se samozřejmě promítají i do ekonomického hlediska, což je v dnešní společnosti velmi důležitý faktor. Cílem modelování je co nejefektivněji, nejlevněji a nejrychleji vytvořit, ověřit a prodat nebo zprovoznit modelovaný systém a to modely splňují.

Pro mě osobně tato práce byla velkým přínosem. Jednak jsem nabral velké množství zkušeností a znalostí v oblasti fotovoltaiky, a jednak získal zkušenosti s prací v programu Matlab a jeho prostředí Simulink. Měl jsem možnost porovnat model s reálným FV systémem a díky tomu se mi naskytla příležitost ověřit v praxi všechny nabitě teoretické znalosti. Při samotném psaní diplomové práce jsem narazil na mnoho úskalí, kde mnohdy najít řešení trvalo týdny, avšak nakonec v časovém vypětí se vše podařilo splnit a dokončit.

---

## Literatura

- [1] Švach, T. Vhodné akumulátory pro zálohování elektrické energie z fotovoltaického systému. 2015, Projekt 1.
- [2] Kropp, R. Solar Expected to Maintain its Status as the World's Fastest-Growing Energy Technology. 2009. Dostupné z: <http://www.socialfunds.com/news/article.cgi/2639.html>
- [3] Ayre, J. Solar Cell Efficiency World Record Broken-New Record Is 44.7%. 2013. Dostupné z: <http://solarlove.org/solar-cell-efficiency-world-record-broken-new-record-44-7>
- [4] Světový rekord – solární článek s 44,7% účinností. 2013. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/novinky/svetovy-rekord-%E2%80%93-solarni-clanek-s-44-7-ucinnost-50472.html>
- [5] Matthias Dürr, Andrew Cruden, Sinclair Gair, J.R. McDonald. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. *Journal of Power Sources*, 2006: str. 1400–1411, ISSN 0378-7753.
- [6] Francisco M. González-Longhatt. Circuit Based Battery Models: A Review. 2006. Dostupné z: [http://cs.marlboro.edu/courses/spring2009/tutorials/alec/April\\_15.attachments/A2006-14-1.pdf](http://cs.marlboro.edu/courses/spring2009/tutorials/alec/April_15.attachments/A2006-14-1.pdf)
- [7] S.M. Mousavi G., M. Nikdel. Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svazek 32, 2014: str. 477 – 485, ISSN 1364-0321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000598>
- [8] Makovička, J. *Záporná elektroda lithných sekundárních článků*. Dizertační práce, FEKT VUT Brno, 2008.

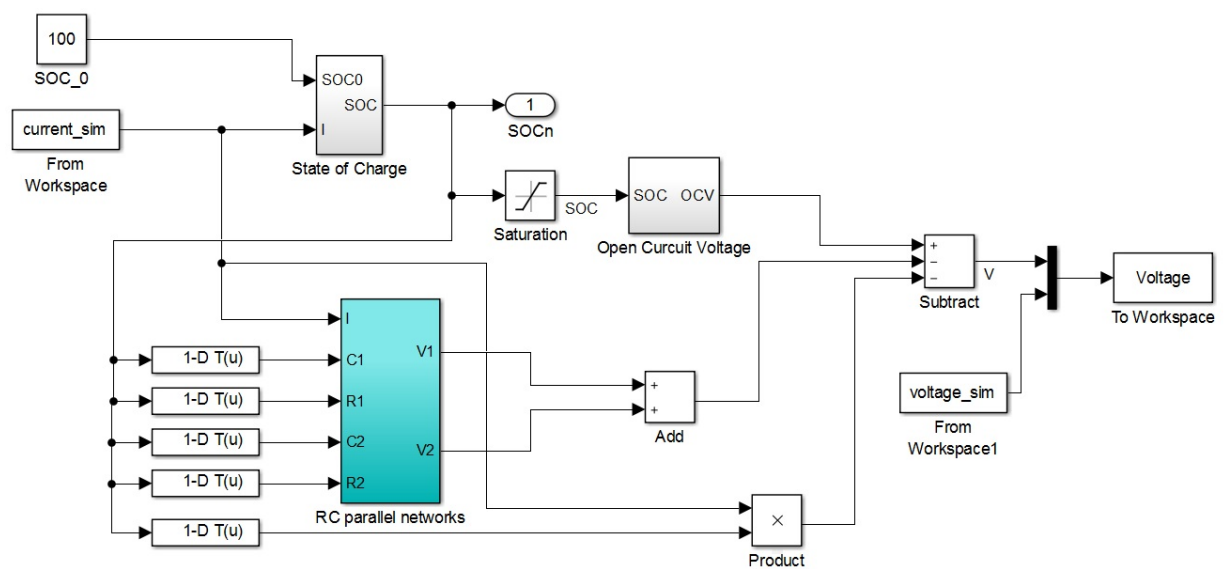


- [9] Robyn A. Jackey. A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection. *The MathWorks*, 2007: str. 1–9. Dostupné z: [http://www.mathworks.com/tagteam/40542\\_SAE-2007-01-0778-Battery-Modeling-Process.pdf](http://www.mathworks.com/tagteam/40542_SAE-2007-01-0778-Battery-Modeling-Process.pdf)
- [10] Robyn Jackey, Michael Saginaw, Pravesh Sanghvi, Javier Gazzarri. Battery model parameter estimation using layered technique an example using a lithium iron phosphate cell. *The MathWorks*, 2013: str. 1–14.
- [11] Tatarkovič, M.; Broncová, G.; Krond'ák, M. Elektroimpedanční spektroskopie a její využití v elektrochemické analýze. 2012. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012\\_11\\_1067-1074.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_11_1067-1074.pdf)
- [12] Min Chen, G. A. Rincón-Mora. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006: str. 504–511.
- [13] Shijie Tong, Matthew P.Klein, Jae Wan Park. *Comprehensive battery equivalent circuit based model for battery management application*. Annual dynamic systems and control conference, 2013, 8 str.
- [14] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, Abdel-Allah Dekkiche. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. *2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007: str. 284–289.
- [15] Olivier Tremblay, Louis-A.Dessaint. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application. *World electric vehicle journal vol.3*, svazek 3, 2009: str. 1–9, ISSN 2032-6653. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/262687337\\_Experimental\\_Validation\\_of\\_a\\_Battery\\_Dynamic\\_Model\\_for\\_EV\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/262687337_Experimental_Validation_of_a_Battery_Dynamic_Model_for_EV_Applications)
- [16] Low Wen Yao, Pui Yee Kong, J.A. Aziz, N.R.N. Idris. Modeling of Lithium-Ion battery using MATLAB/simulink. *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, 2013: str. 1721–1734.
- [17] Suleiman Abu-Sharkh, Dennis Doerffel. Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources 130*, svazek 130, 2004: str. 266–274, ISSN 0378-7753. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775303011455>
- [18] Liao Chenglin, Li Huiju, Wang Lifang. A dynamic equivalent circuit model of LiFePO4 cathode material for Lithium Ion batteries on hybrid electric vehicles. *IEEE*, 2009: str. 1662–1665. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5289681>
- [19] Bernhard Schweighofer, Klaus M. Raab, Georg Brasseur. Modeling of high power automotive batteries by the use of an automated test system. *IEEE Transaction on*

- instrumentation and measurement*, svazek 52, 2003: str. 1087–1091. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1232350>
- [20] *Katalogový list multimetr Agilent 34410A, Keysight*. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-3738EN.pdf?id=737854>
- [21] *Katalogový list akumulátorový snímač BMV-702, Victron Energy*. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/upload/documents/Datasheet-BMV-700-series-EN.pdf>
- [22] Niebur, D.; Singh, P.; Kwatny, H.; ad. Simulink model of a Lithium-Ion battery for the hybrid power system testbed. In *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2007, str. 421–427, doi:10.1109/ESTS.2007.372120.
- [23] Ishaque, K.; Salam, Z.; Syafaruddin. A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model. *Solar Energy*, svazek 85, čís. 9, 2011: str. 2217 – 2227, ISSN 0038-092X, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.008>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11002118>
- [24] Stefan, D. Matlab/Simulink solar cell model based on electrical parameters at only one operating condition. In *System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2014 18th International Conference*, 2014, str. 709–714, doi:10.1109/ICSTCC.2014.6982501.
- [25] Ishaque, K.; Salam, Z.; Taheri, H. Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, svazek 95, čís. 2, 2011: str. 586 – 594, ISSN 0927-0248, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.09.023>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024810005477>
- [26] M. Jazayeri, K. J., S. Uysal. A simple MATLAB/Simulink simulation for PV modules based on one-diode model. In *2013 High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, 2013, ISSN 1949-4092, str. 44–50.
- [27] Nishioka, K.; Sakitani, N.; Uraoka, Y.; ad. Analysis of multicrystalline silicon solar cells by modified 3-diode equivalent circuit model taking leakage current through periphery into consideration. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, svazek 91, čís. 13, 2007: str. 1222 – 1227, ISSN 0927-0248. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024807001493>
- [28] Sze, S.; Ng, K. K. *Physics and Properties of Semiconductors—A Review*. John Wiley & Sons, Inc., 2006, ISBN 9780470068328, str. 5–75, doi:10.1002/9780470068328.ch1. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470068328.ch1>
- [29] Tsai, H.-L. Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink. *Solar Energy*, svazek 84, čís. 7, 2010: str. 1318 – 1326, ISSN 0038-092X, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.04.012>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1000160X>

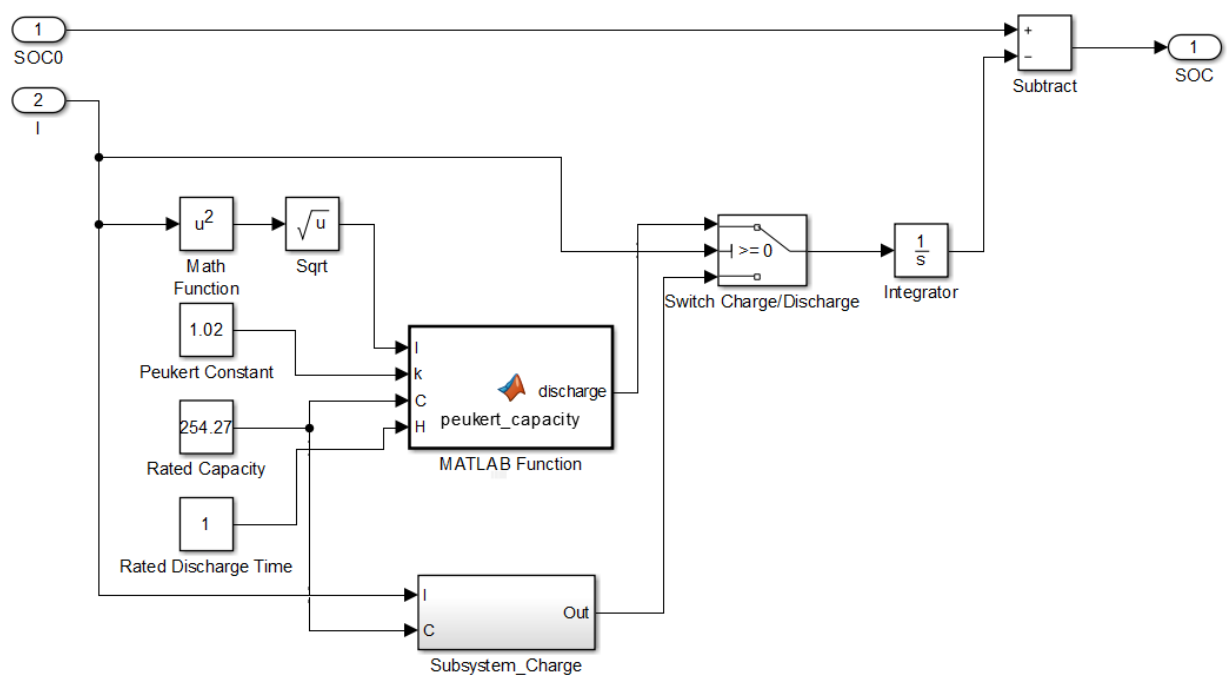
- [30] Tian, H.; Mancilla-David, F.; Ellis, K.; ad. A Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems. *Solar Energy Journal*, svazek 91, čís. 13, 2012: str. 1222–1227, ISSN 0927-0248. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54601.pdf>
- [31] Jazayeri, M.; Uysal, S.; Jazayeri, K. Evaluation of Maximum Power Point Tracking Techniques in PV Systems Using MATLAB/Simulink. In *2014 Sixth Annual IEEE Green Technologies Conference*, April 2014, ISSN 2166-546X, str. 54–60, doi:10.1109/GREENTECH.2014.21.
- [32] Tomášek, L. *Solární nabíječ Li-Ion článků se sledováním bodu maximálního výkonu solárního článku*. Diplomová práce, FEL ČVUT Praha, 2008.
- [33] Chermitti, A.; Boukli-Hacene, O.; Meghebbar, A.; ad. Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink. *Physics Procedia*, svazek 55, 2014: str. 199 – 206, ISSN 1875-3892, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2014.07.029>, 8th International Conference on Material Sciences, CSM8-ISM5. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389214000911>
- [34] Kwasinski, A. DC-DC buck converter. Dostupné z: [http://users.ece.utexas.edu/~kwasinski/\\_6\\_EE462L\\_DC\\_DC\\_Buck\\_PPT.ppt](http://users.ece.utexas.edu/~kwasinski/_6_EE462L_DC_DC_Buck_PPT.ppt)
- [35] Fundamentals of Power Electronics, Steady-State Equivalent Circuit Modeling, Losses, and Efficiency. Dostupné z: <http://ecee.colorado.edu/copec/book/slides/Ch3slide.pdf>
- [36] *Katalogový list polykrystalický FV panel SM-250PC8, S-Energy*. Dostupné z: [http://s-energy.designq.kr/image/SE-Datesheet\\_260PC8\\_3BB\\_60\\_2014\\_EN\\_V05.pdf](http://s-energy.designq.kr/image/SE-Datesheet_260PC8_3BB_60_2014_EN_V05.pdf)
- [37] *Katalogový list BlueSolar Charge Controller, Victron Energy*. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/upload/documents/Datasheet-Blue-Solar-Charge-Controller-MPPT-150-70-&-150-85-EN.pdf>
- [38] *Katalogový list Quattro 48/5000/70-100/100, Victron Energy*. Dostupné z: <https://www.victronenergy.cz/upload/documents/Datasheet-Quattro-3kVA-10kVA-EN.pdf>
- [39] Sinha, S.; Chandel, S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svazek 32, 2014: str. 192 – 205, ISSN 1364-0321, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.035>, 8th International Conference on Material Sciences, CSM8-ISM5. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400046X>

## Simulink model akumulátoru



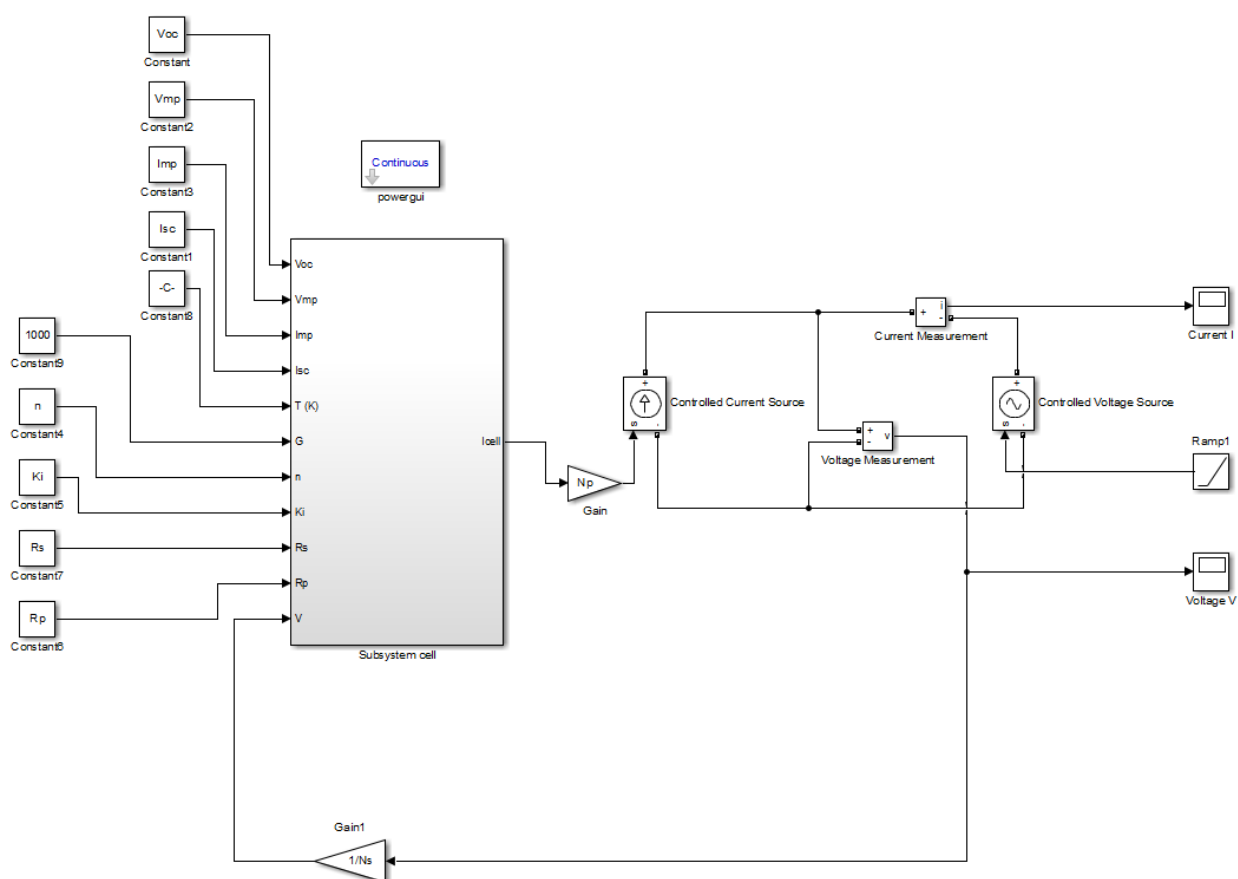
Obrázek A.1: Model akumulátoru v prostředí Simulink.

## A. SIMULINK MODEL AKUMULÁTORU



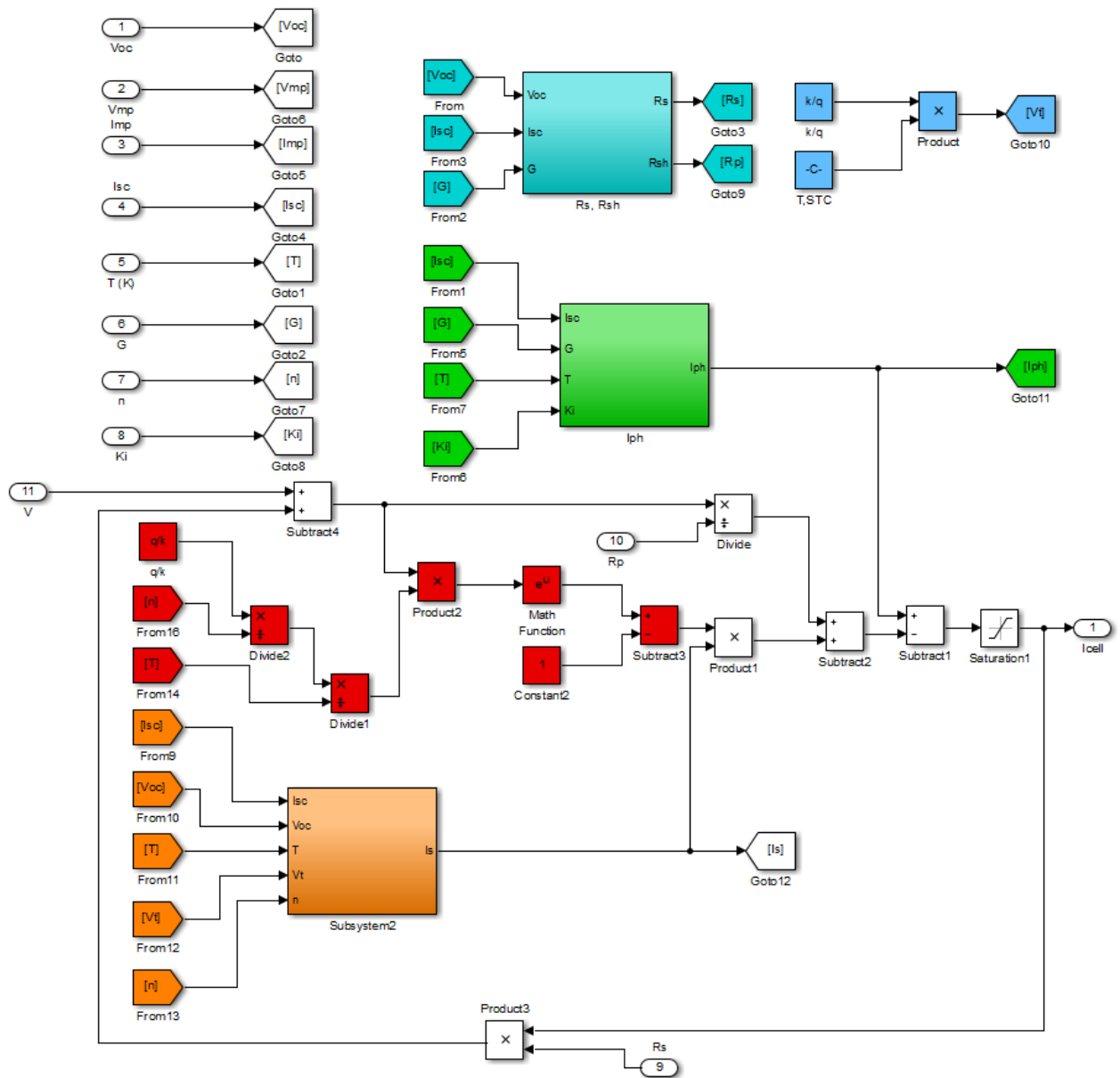
Obrázek A.2: Subsystém pro kalkulaci stavu nabití v prostředí Simulink.

## Simulink model FV panelu

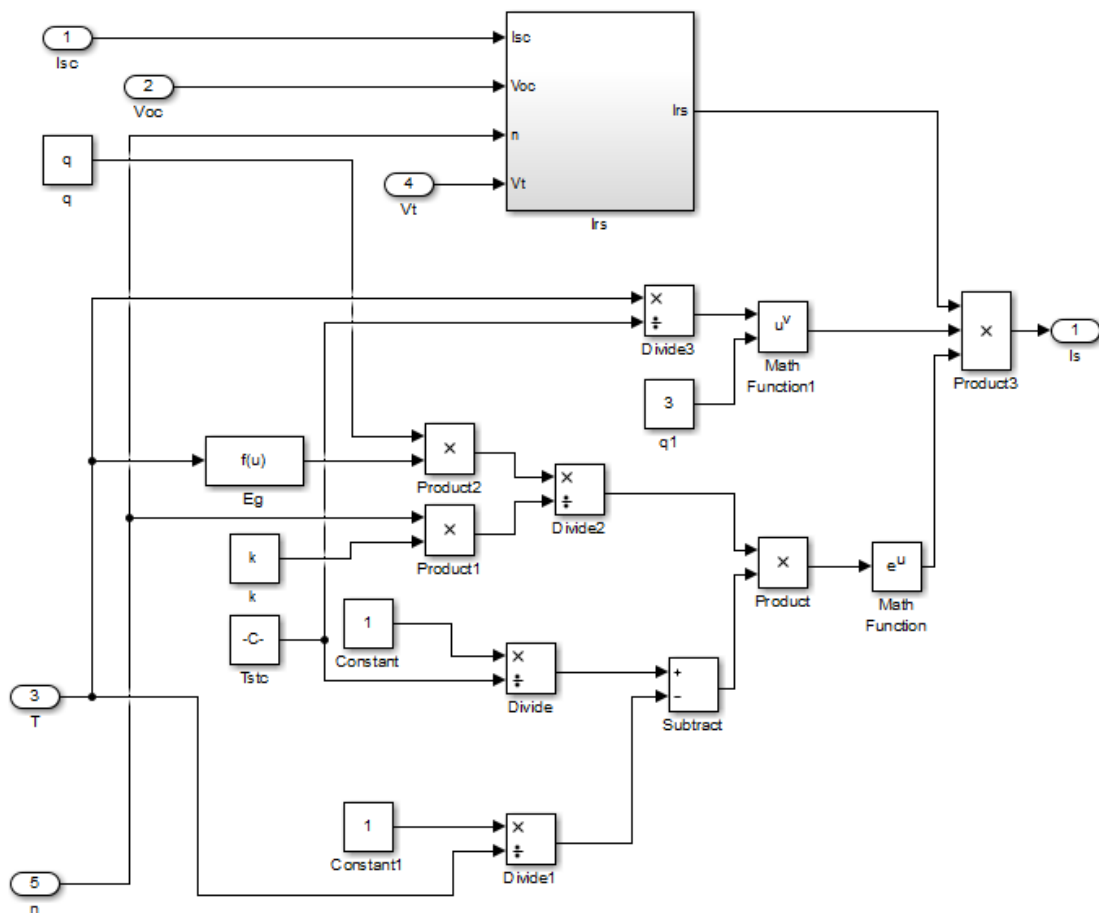


Obrázek B.1: Model FV panelu v prostředí Simulink.

## B. SIMULINK MODEL FV PANELU



Obrázek B.2: Subsystem FV panelu v prostředí Simulink.

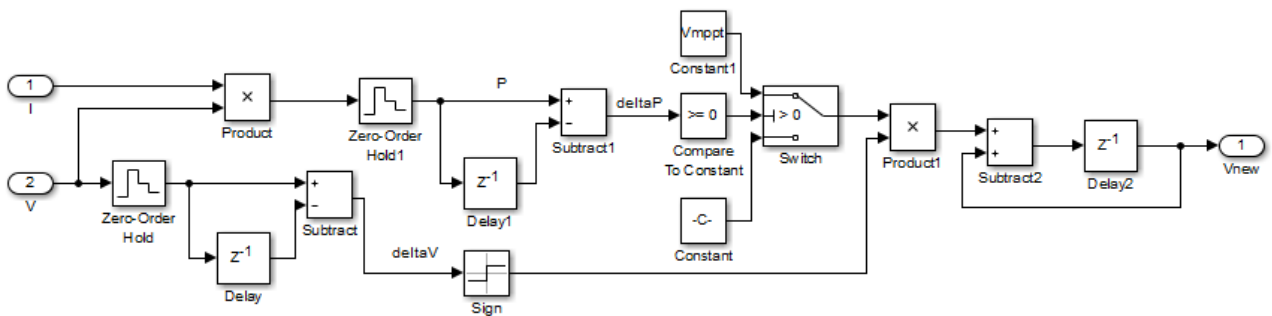


Obrázek B.3: Subsystem FV panelu pro kalkulaci saturačního proudu diody v závěrném směru v prostředí Simulink.





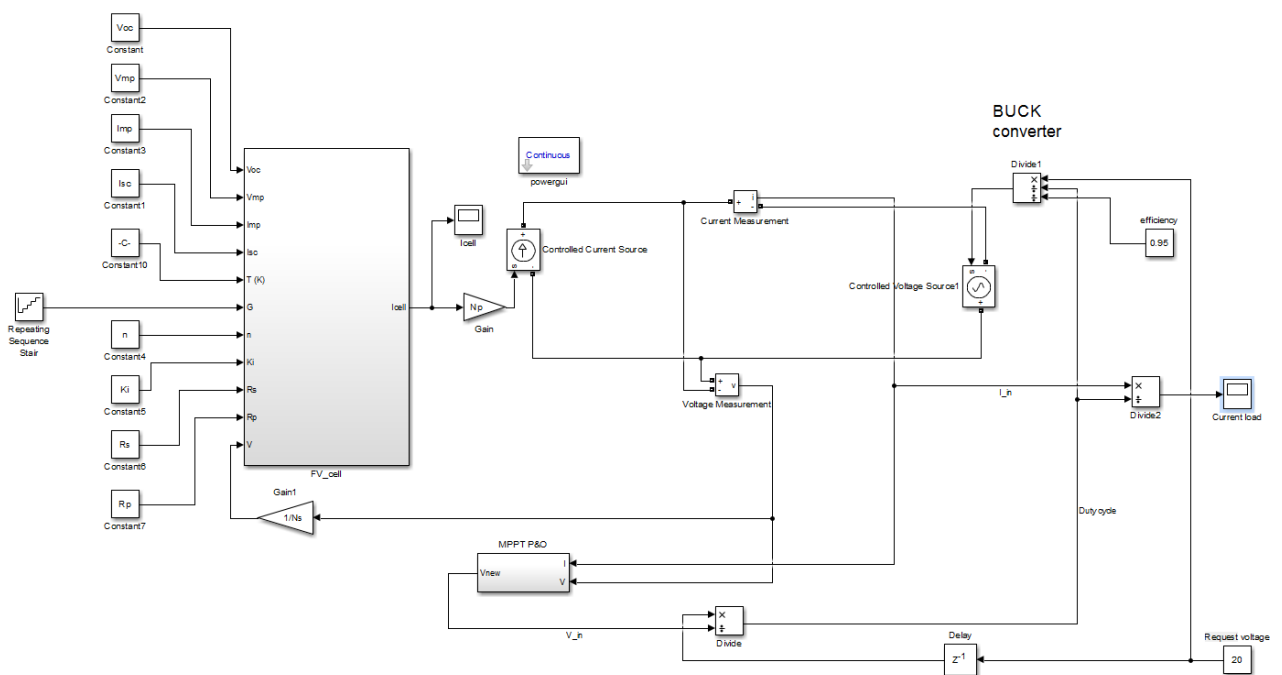
## Simulink model MPPT



Obrázek C.1: Model MPPT algoritmu v prostředí Simulink.



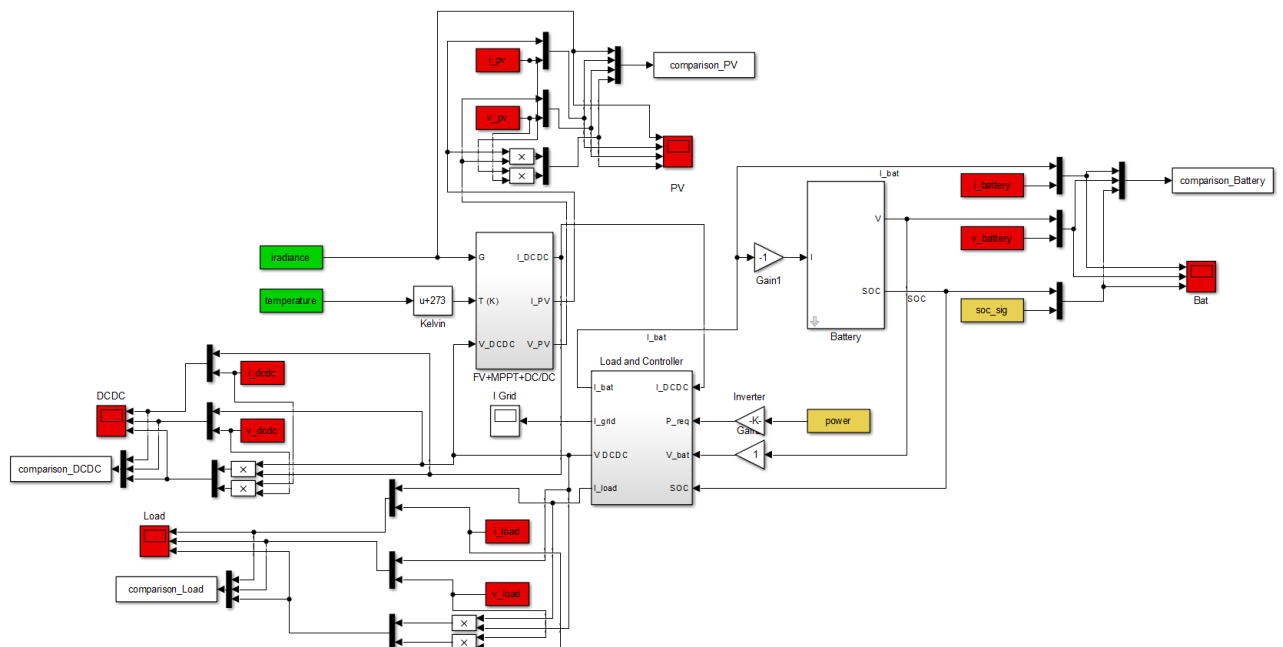
# Simulink model měniče napětí, MPPT a FV panelu



Obrázek D.1: Model buck konvertoru včetně MPPT a FV panelu v prostředí Simulink.



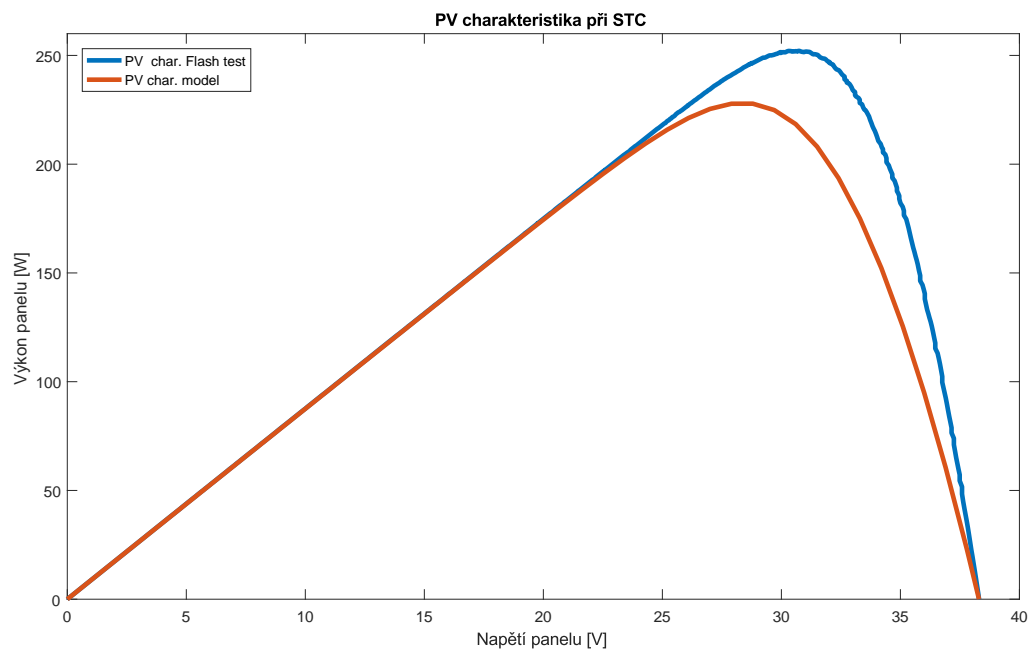
## Simulink model celého FV systému



Obrázek E.1: Celý model FV systému v prostředí Simulink.



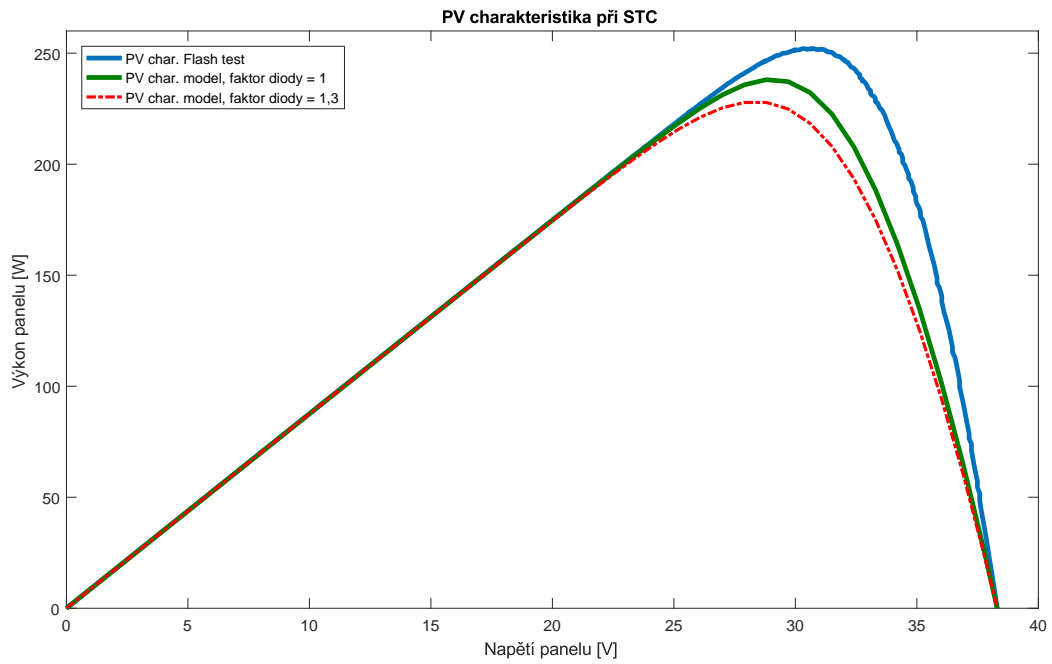
## PV charakteristiky FV panelu



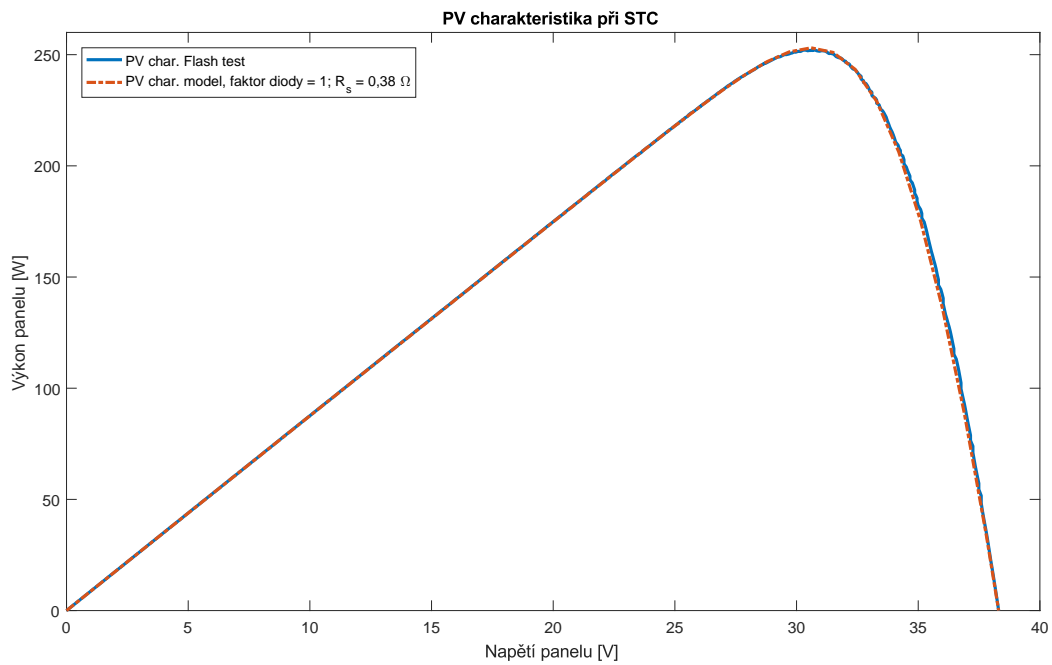
Obrázek F.1: Srovnání PV charakteristiky modelu a flash testu.



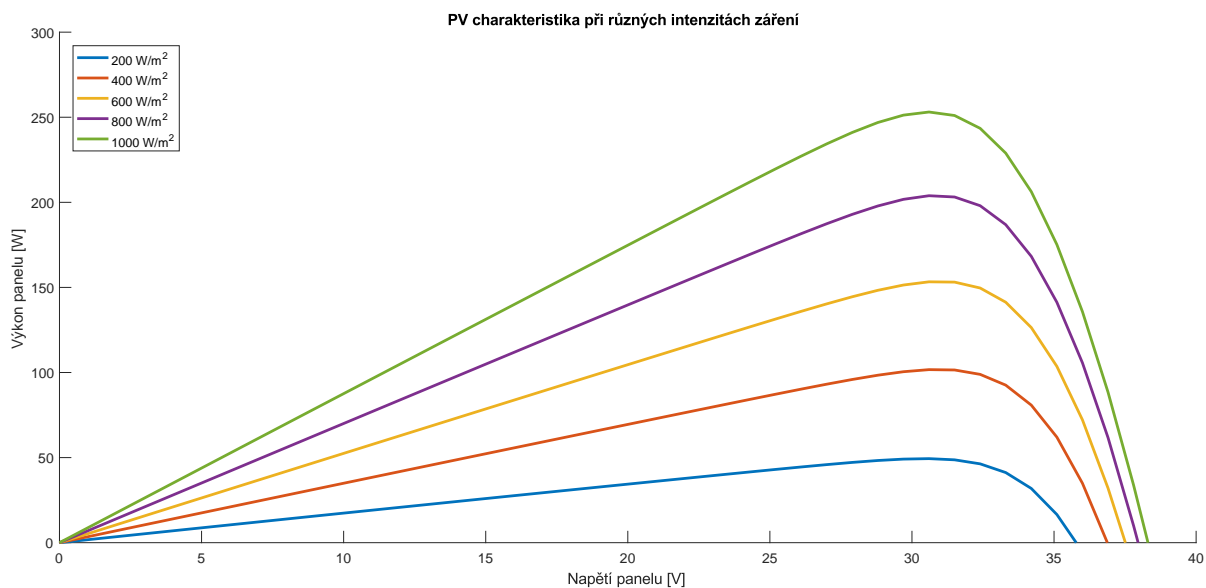
## F. PV CHARAKTERISTIKY FV PANELU



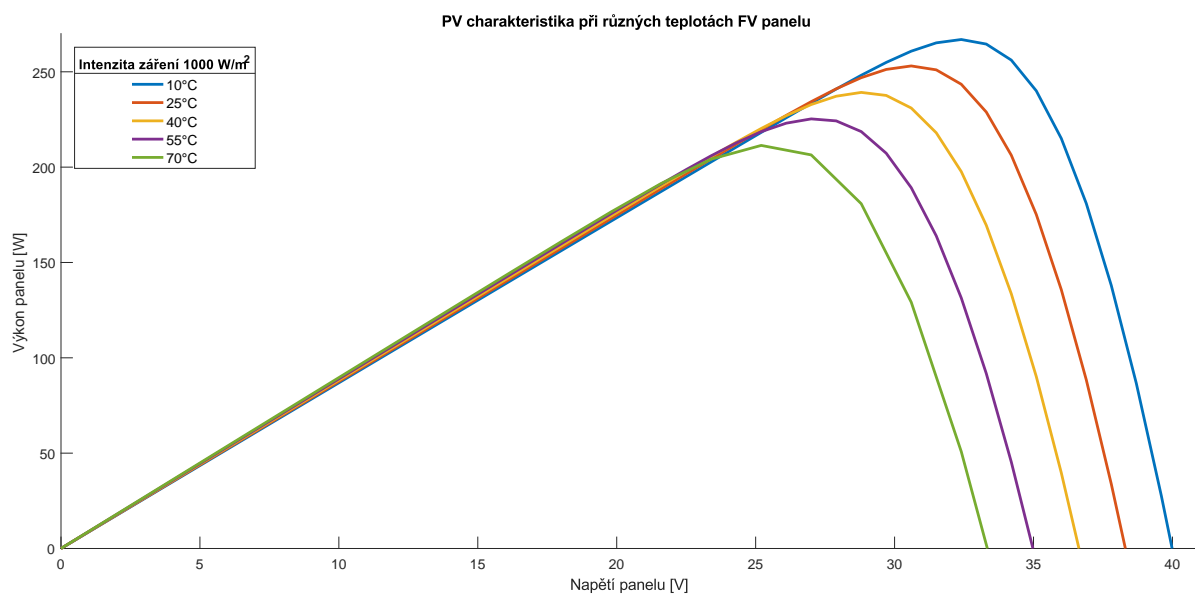
Obrázek F.2: Srovnání PV charakteristiky modelu a flash testu po úpravě  $n$ .



Obrázek F.3: Srovnání PV charakteristiky modelu a flash testu po úpravě  $n$  a  $R_s$ .



Obrázek F.4: PV charakteristiky modelu při různých intenzitách záření.



Obrázek F.5: PV charakteristiky modelu při různých teplotách FV panelu.