



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

MIKROKONTROLÉR PRO INTELIGENTNÍ NÁKUP A PRODEJ ELEKTRICKÉ ENERGIE V DOMÁCNOSTI PODLE AKTUÁLNÍCH SPOTOVÝCH CEN

MICROCONTROLLER FOR INTELLIGENT PURCHASE AND SALE OF ELECTRICITY IN THE HOME
ACCORDING TO CURRENT SPOT PRICES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Vrzal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Appel, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Vojtěch Vrzal**
Studijní program: Mechatronika
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Martin Appel, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Mikrokontrolér pro inteligentní nákup a prodej elektrické energie v domácnosti podle aktuálních spotových cen

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době roste poptávka po efektivním využívání obnovitelných zdrojů energie v domácnostech a optimalizaci nákladů na elektrickou energii. Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh a implementaci mikrokontroléru, který bude řídit spotřebu elektrické energie v domácnosti, výrobu z fotovoltaických panelů a optimalizovat nákup a prodej elektřiny na základě aktuálních spotových cen. Součástí řešení bude také integrace bateriového úložiště pro efektivní ukládání energie. Práce bude zahrnovat vývoj softwaru pro řízení energetických toků a implementaci optimalizačního algoritmu, který minimalizuje náklady domácnosti na energii prostřednictvím inteligentního řízení výroby, spotřeby a ukládání energie.

Cíle diplomové práce:

1. Navrhnout a implementovat mikrokontrolér pro řízení energetických toků v domácnosti, který bude spravovat spotřebu elektrické energie, výrobu z fotovoltaických panelů a optimalizovat nákup a prodej elektřiny na základě aktuálních spotových cen. Zajistit funkčnost mikrokontroléru ve spojení s fotovoltaickým měničem a bateriovým úložištěm, včetně návrhu schématu zapojení a vytvoření desky plošných spojů (DPS).
2. Vyvinout software pro řízení využívání fotovoltaického měniče, nákupu a prodeje elektřiny a spotřeby energie v domácnosti, který bude zohledňovat aktuální spotové ceny a stav bateriového úložiště. Software by měl umožnit efektivní řízení energetických toků s cílem minimalizovat náklady na elektrickou energii.
3. Navrhnout a implementovat optimalizační algoritmus, který inteligentně rozhoduje o ukládání energie do baterie, využívání energie z baterie, nákupu nebo prodeji elektřiny na základě aktuálních podmínek a spotových cen. Algoritmus musí být schopen dynamicky reagovat na změny v energetické spotřebě a výrobě, aby minimalizoval celkové náklady domácnosti na energii.

Seznam doporučené literatury:

- [1] KOUBAA, A. Robot path planning and cooperation. New York: Springer, 2018.
- [2] W. Bolton. Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering. 7th edition. 2018. ISBN 978-1292250977.
- [3] CORKE, P. Robotics, vision and control: fundamental algorithms in MATLAB. Cham: Springer, 2017
- [4] SICILIANO, A. Robotics modelling, planning and control. London: Springer 2009

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací nízkonákladového systému pro inteligentní řízení energetických toků v domácnostech s fotovoltaickou elektrárnou a bateriovým úložištěm. Hlavním cílem je minimalizace nákladů na elektrickou energii pomocí optimalizace jejího nákupu a prodeje na základě spotových cen. Pro tyto účely byl vyvinut vlastní hardware s mikrokontrolérem STM32, který komunikuje s měničem přes sběrnici RS-485, a softwarová infrastruktura využívající distribuovanou architekturu Cloud-Edge.

Jádrem celého řešení je optimalizační algoritmus na bázi prediktivního řízení (MPC). Ten pro své rozhodování využívá umělou neuronovou síť pro predikci solární výroby a statistický model pro odhad spotřeby domácnosti. Na základě těchto dat systém řídí nabíjení a vybíjení baterie. Testování na datech z reálného provozu potvrdilo plnou funkčnost a spolehlivost navrženého zařízení. Zavedením inteligentní energetické arbitráže se podařilo prokazatelně snížit celkové provozní náklady. Díky velmi nízkým výrobním nákladům se návratnost počáteční investice do hardwaru pohybuje v horizontu jednoho až dvou let.

Summary

This thesis deals with the design and implementation of a low-cost system for the intelligent management of energy flows in households equipped with a photovoltaic power plant and battery storage. The main objective is to minimize electricity costs by optimizing its purchase and sale based on dynamic spot prices. For this purpose, custom hardware was developed using an STM32 microcontroller, which communicates with the inverter via an RS-485 bus, along with a software infrastructure utilizing a distributed Cloud-Edge architecture.

At the core of the entire solution is an optimization algorithm based on model predictive control (MPC). For its decision-making, it uses an artificial neural network to predict solar production and a statistical model to estimate household consumption. Based on this data, the system dynamically controls battery charging and discharging. Testing using real-world operational data confirmed the full functionality and reliability of the proposed system. The implementation of smart energy arbitrage has demonstrably reduced total operating costs. Thanks to very low production costs, the return on the initial hardware investment is achieved within two to three years.

Klíčová slova

spotové ceny elektřiny, energetický management, optimalizační algoritmus, bateriové úložiště

Keywords

spot electricity prices, energy management system, optimization algorithm, battery energy storage system

Bibliografická Citace

VRZAL, V. *Mikrokontrolér pro inteligentní nákup a prodej elektrické energie v domácnosti podle aktuálních spotových cen*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026. 131 s., Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Appel, PhD..

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce. Uvedl jsem všechny použité literární prameny a další informační zdroje, ze kterých jsem čerpal.

V souladu se zásadami a směrnicemi Vysokého učení technického v Brně o využívání generativní umělé inteligence dále prohlašuji, že jsem při zpracování této práce využil nástroj generativní AI Gemini (poskytovatel Google). Tento nástroj byl použit v omezeném rozsahu výhradně jako asistenční systém pro detekci syntaktických chyb a ladění zdrojového kódu a pro finální jazykovou či stylistickou korekturu vlastního autorského textu.

Nástroj nebyl využit k vytváření odborných tvrzení ani k nahrazení práce s primární literaturou. Veškeré navržené programové úseky byly mnou manuálně implementovány a plně otestovány na reálném hardwaru. Plnou odpovědnost za odevzdané dílo, funkčnost softwaru a správnost všech výsledků nesu výhradně já.

Vojtěch Vrzal

Brno

.

Na tomto místě bych chtěl upřímně poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Martinu Appelovi, Ph.D., za jeho konstruktivní přístup, cenné odborné připomínky a podporu při návrhu a realizaci řídicího systému. V neposlední řadě patří obrovské poděkování mé rodině za trpělivost, zázemí a všestrannou podporu, kterou mi během celého studia poskytovala.

Vojtěch Vrzal

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Seznam grafů	13
Seznam použitých zkratk	14
1 Úvod	16
2 Současný stav řešené problematiky	17
2.1 Trh s energiemi	17
2.1.1 Složky ceny nakupované elektrické energie	17
2.1.2 Distribuční sazby	19
2.1.3 Porovnání fixních a spotových cen	21
2.1.4 Tvorba a dynamika spotových cen	22
2.1.5 Složky ceny prodávané elektrické energie	24
2.1.6 Možnosti získání hodnoty spotových cen	25
2.1.7 Přehled trhu s inteligentním řízením nákupu a prodeje elektřiny . .	26
2.2 Bateriové systémy a modelování degradace	28
2.2.1 Typy bateriových článků v domácích úložištích	28
2.2.2 Porovnání vysokonapěťových a nízkonapěťových bateriových úložišť	29
2.2.3 Mechanismy degradace LFP akumulátorů	31
2.2.4 Cyklické a kalendářní stárnutí baterií	32
2.2.5 Zahrnutí opotřebení baterie do optimalizačního algoritmu	34
2.3 Algoritmy pro řízení energetických toků	35
2.3.1 Porovnání optimalizačních algoritmů	35

2.3.2	Teoretické principy a mechanismy MPC	37
2.3.3	Srovnání běhu optimalizace na serveru vs. MCU	39
2.3.4	Možnosti implementace MPC v Pythonu na serveru	41
2.3.5	Závěr volby	42
2.4	Predikční modely a předpověď výkonu FVE	42
2.4.1	Fyzikální modelování	42
2.4.2	Obyčejná neuronová síť	45
2.4.3	LSTM	46
2.4.4	Srovnání metod predikce výroby fotovoltaické elektrárny	46
2.4.5	Nástroje pro sběr dat	47
2.5	Serverová architektura a softwarové standardy	48
2.5.1	Softwarová architektura řídicího systému a framework FastAPI	48
2.5.2	Databázová vrstva a objektově-relační mapování s využitím SQL-Model	50
2.5.3	Plánování úloh a automatizace procesů (Job Scheduling)	51
2.5.4	Efektivita komunikačního rozhraní: JSON vs. binární formáty	53
2.5.5	Dlouhodobá archivace telemetrie pomocí formátu Parquet	54
2.5.6	Zabezpečení rozhraní	55
2.6	Hybridní měnič a komunikační rozhraní	55
2.6.1	Definice a rozdělení fotovoltaických měničů	55
2.6.2	Hybridní měnič jako akční člen	56
2.6.3	Komunikační rozhraní měniče SolaX	57
2.6.4	Limitace paměťových struktur EEPROM	59
3	Návrh a realizace systému	61
3.1	Popis a celková architektura systému	61
3.1.1	Celkový koncept a princip fungování	62
3.1.2	Tok dat a komunikační rozhraní	62
3.2	Hardwarový návrh řídicí jednotky	65
3.2.1	Specifikace periférií a blokové schéma systému	65
3.2.2	Výběr komponent	67
3.2.3	Systém napájení	69
3.2.4	Zapojení dalších komponent	72
3.2.5	Topologie a konstrukce DPS	75

3.2.6	Možnosti dalšího rozvoje systému	76
3.3	Modelování výroby fotovoltaické elektrárny	77
3.3.1	Metodika sběru a přípravy dat pro predikční model	77
3.3.2	Návrh neuronové sítě	80
3.3.3	Trénink neuronové sítě	82
3.3.4	Vyhodnocení natrénované neuronové sítě	85
3.3.5	Prostory ke zlepšení	86
3.4	Statistické modelování spotřeby objektu	86
3.4.1	Dataset	86
3.4.2	Modelování spotřeby	88
3.4.3	Zhodnocení využitého modelu	91
3.5	Softwarová architektura serverové části	93
3.5.1	Celková architektura a datový model	93
3.5.2	Externí datové zdroje	96
3.5.3	Implementace predikcí a optimalizačního algoritmu	97
3.5.4	Automatizace a plánovač úloh (Scheduler)	99
3.5.5	Komunikace s mikrokontrolérem	100
3.5.6	Administrační webové rozhraní	102
3.5.7	Závěrečné zhodnocení a možnosti dalšího rozvoje	103
3.6	Návrh a formulace algoritmu prediktivního řízení (MPC)	104
3.6.1	Formulace matematického modelu v lineárním stavovém prostoru	104
3.6.2	Formulace účelové funkce a optimalizačního kritéria	107
3.6.3	Verifikace a vyhodnocení funkce optimalizačního algoritmu	110
3.7	Implementace řídicího firmwaru mikrokontroléru	112
3.7.1	Architektura a hierarchie programu	112
3.7.2	Komunikační rozhraní se serverem	113
3.7.3	Datová integrace a předzpracování	114
3.7.4	Komunikace s fotovoltaickým měničem	115
3.7.5	Algoritmus rychlé smyčky řízení baterie	116
3.7.6	Modularita a možnosti rozšíření systému	117

4 Dosažené výsledky a diskuze 119

4.1	Ověření funkčnosti hardwarového a softwarového řešení	119
-----	---	-----

4.1.1	Statická verifikace a oživení napájecí kaskády	119
4.1.2	Ověření integrity MCU	119
4.1.3	Verifikace komunikačních rozhraní	120
4.1.4	Test chování při výpadku komunikace	120
4.2	Analýza chování optimalizačního algoritmu v reálném provozu	120
4.3	Ekonomické zhodnocení a návratnost systému	121
4.3.1	Analýza úspor a vliv zimního období	123
4.3.2	Finanční přínos MPC algoritmu	123
4.3.3	Návratnost hardwarového řešení	124
4.4	Možnosti dalšího rozvoje systému	124
4.4.1	Hardwarová rozšíření a lokalizace výpočtů	124
4.4.2	Aktivní řízení výkonu FVE při záporných cenách	125
4.4.3	Zvýšení přesnosti predikčních modelů	125
5	Závěr	126
	Literatura	127

Seznam obrázků

2.1	Struktura konečné ceny elektrické energie pro odběratele.	17
2.2	Mapa distribučních území v České republice [1].	18
2.3	Grafické znázornění principu merit order na trhu s elektřinou. [12]	23
2.4	Mechanismy poškození bateriových článků	31
3.1	Celkové blokové schéma inteligentního řízení domácnosti	61
3.2	Vyrobená deska plošných spojů	65
3.3	Základní blokové schéma navržené desky plošných spojů s vyznačením vý- konové a komunikační části	67
3.4	Schéma zapojení napájecí části s PoE	70
3.5	Zapojení řadiče PD	71
3.6	Schéma zapojení snižovacího měniče	72
3.7	Zapojení externího krystalu MCU	73
3.8	Zapojení oscilátoru pro W5500	74
3.9	Schéma zapojení PWM výstupů	74
3.10	Návrh desky plošných spojů	76
3.11	Úhel dopadu slunečních paprsků na povrch fotovoltaických panelů	79
3.12	Schéma architektury navržené dopředné neuronové sítě	81
3.13	Blokové schéma architektury serveru a toků dat.	94
3.14	Diagram tříd databázového modelu.	95

Seznam tabulek

2.1	Přehled vybraných distribučních sazeb ČEZ pro domácnosti	20
2.2	Podmínky pro přiznání vybraných distribučních sazeb ČEZ	20
2.3	Srovnání fixních a spotových cen elektřiny	22
2.4	Souhrnné srovnání systémů pro řízení energetických toků	27
2.5	Srovnání vlastností akumulátorových článků pro stacionární úložiště	29
2.6	Srovnání parametrů nízkonapěťových a vysokonapěťových úložišť	30
2.7	Faktory ovlivňující degradaci LFP akumulátorů	33
2.8	Srovnání metod řízení a optimalizace pro systémy EnMS	37
2.9	Srovnání implementace řídicího algoritmu na MCU a serveru	41
2.10	Srovnání metod predikce výroby fotovoltaické elektrárny	47
2.11	Technické srovnání webových backendových frameworků	50
2.12	Srovnání databázových systémů pro energetický management	51
2.13	Technické srovnání systémů pro plánování úloh	52
2.14	Technické srovnání komunikačních formátů pro přenos dat	54
2.15	Klíčové parametry systému a jejich role v návrhu řídicího systému	57
2.16	Technické srovnání komunikačních standardů Modbus RTU and Modbus TCP	59
3.1	Matice komunikačních rozhraní a přenášených dat v systému	64
3.2	Souhrn vybraných klíčových hardwarových součástí pro řídicí jednotku .	69
3.3	Parametry pasivních prvků pro měniče	71
3.4	Denní harmonogram spouštění úloh plánovače	100

Seznam grafů

2.1	Ukázka výsledků 15minutových spotových cen pro den 23. 4. 2026.	23
2.2	Průměrný vývoj spotového trhu s elektřinou v průběhu roku.	24
3.1	Vývoj chybové funkce během procesu trénování	83
3.2	Vývoj chybové funkce během procesu dotrénování na data konkrétní FVE .	84
3.3	Srovnání predikce obecného a dotrénovaného modelu u instalace s omezením přetoků	85
3.4	Srovnání predikce obecného a dotrénovaného modelu u instalace bez omezení přetoků	86
3.5	Závislost spotřeby na venkovní teplotě v 01:00 (pracovní den)	89
3.6	Závislost spotřeby na venkovní teplotě v 10:00 (pracovní den)	90
3.7	Ukázka hodinového predikčního horizontu spotřeby na 24 hodin s aplikovanou relaxací počáteční odchylky	92
3.8	Simulace akčních zásahů MPC	111
4.1	Porovnání zásahů MPC a standardního řízení baterie v lednovém týdnu. .	122
4.2	Porovnání zásahů MPC a standardního řízení baterie v dubnovém týdnu. .	122
4.3	Porovnání vývoje kumulativních nákladů na elektrickou energii v průběhu simulace pro jednotlivé scénáře.	123

Seznam použitých zkratek

API	Application Programming Interface – aplikační programové rozhraní
BMS	Battery Management System – systém správy akumulátoru
COP	Coefficient of Performance – topný faktor tepelného čerpadla
CRC	Cyclic Redundancy Check – cyklický redundantní součet
CSV	Comma-Separated Values – textový formát pro tabulková data
ČEPS	Česká elektroenergetická přenosová soustava
DoD	Depth of Discharge – hloubka vybití akumulátoru
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – elektricky mazatelná paměť
EMS/EnMS	Energy Management System – systém pro management energií
ERÚ	Energetický regulační úřad
ESD	Electrostatic Discharge – elektrostatický výboj
FVE	Fotovoltaická elektrárna
GA	Genetic Algorithm – genetický algoritmus
GPIO	General-Purpose Input/Output – univerzální digitální vstup/výstup
HAL	Hardware Abstraction Layer – hardwarová abstrakční vrstva
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning – vytápění, ventilace a klimatizace
I/O	Input/Output – vstup/výstup
JSON	JavaScript Object Notation – textový datový formát pro výměnu dat
LAM	Loss of Active Material – ztráta aktivního materiálu elektrod
LFP	Lithium-železo-fosfát

LLI	Loss of Lithium Inventory – ztráta inventáře aktivního lithia
LSTM	Long Short-Term Memory – typ rekurentní neuronové sítě
MCU	Microcontroller Unit – mikrokontrolér / řídicí mikropočítač
MILP	Mixed-Integer Linear Programming – smíšené celočíselné lineární programování
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor – unipolární spínací tranzistor
MPC	Model Predictive Control – modelové prediktivní řízení
MPPT	Maximum Power Point Tracking – sledování bodu maximálního výkonu
NMC	Nikl-Mangan-Kobalt
NN	Neural Network – umělá neuronová síť
NT	Nízký tarif
ODE	Ordinary Differential Equation – obyčejná diferenciální rovnice
OTE	Operátor trhu s elektřinou
PHY	Physical Layer – fyzická vrstva síťového rozhraní
POZE	Podporované zdroje energie
PWM	Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace
QP	Quadratic Programming – kvadratické programování
REST API	Representational State Transfer Application Programming Interface
RTC	Real-Time Clock – obvod reálného času
SEI	Solid Electrolyte Interphase – pasivační vrstva na anodě
SoC	State of Charge – stav nabití akumulátoru
SSR	Solid State Relay – polovodičové výkonové relé
TUV	Teplá užitková voda
TVS	Transient Voltage Suppressor – ochranná dioda proti přepětí
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter – sériové komunikační rozhraní
VRFB	Vanadium Redox Flow Battery – vanadová redoxní průtočná baterie
VT	Vysoký tarif
XML	Extensible Markup Language – rozšiřitelný značkovací jazyk

1 Úvod

V posledních letech dochází k masivnímu rozvoji využívání obnovitelných zdrojů energie v rezidenčním sektoru, což je do značné míry podpořeno státními dotačními programy. Tyto iniciativy vedly k prudkému nárůstu počtu domácností vybavených fotovoltaickými elektrárnami (FVE) doplněnými o bateriová úložiště. I přes dostupnost těchto moderních technologií však domácnostem často chybí systém pro efektivní řízení spotřeby a výroby elektřiny. Běžně dostupné profesionální systémy pro energetický management (EnMS) často představují investici v řádu desítek tisíc korun. Z tohoto důvodu mnoho domácností provozuje své fotovoltaické systémy pouze v základních autonomních režimech, čímž dochází k výraznému nevyužití technického i ekonomického potenciálu bateriového úložiště.

Tento problém se stává ještě aktuálnější v kontextu přechodu od fixních cenových tarifů k dynamickým spotovým cenám. U standardních fixních tarifů odběratel platí stálou cenu, ve které je vždy započítána riziková přírážka obchodníka. Naopak spotové ceny odrážejí aktuální situaci na vnitrodenním trhu a mohou během dne výrazně kolísat, přičemž v obdobích s vysokou výrobou z obnovitelných zdrojů mohou dosahovat i záporných hodnot. Pro domácnosti vybavené baterií a systémem aktivního řízení představují spotové ceny významnou výhodu. Inteligentní systém totiž umožňuje přesouvat spotřebu a nákup energie do levných časových oken, a naopak prodávat uloženou energii v době cenových špiček. Bez sofistikovaného řízení, které by na tyto změny dokázalo reagovat, se však uživatelé vystavují rizikům nákupu v obdobích s vysokou cenou a prodejem za nízké ceny.

Tato diplomová práce proto přináší návrh a realizaci nízkonákladového, avšak vysoce spolehlivého systému pro inteligentní nákup a prodej elektrické energie. Řešení je založeno na mikrokontroléru, který díky své nízké pořizovací ceně činí pokročilý energetický management dostupným pro široké spektrum uživatelů, a to bez závislosti na drahých komerčních jednotkách.

K dosažení tohoto záměru je práce rozdělena do několika stěžejních cílů:

1. **Návrh a realizace hardwaru:** Navrhnout schéma zapojení a vyrobit desku plošných spojů (DPS) s mikrokontrolérem, která zajistí fyzické propojení a komunikaci mezi fotovoltaickým měničem, bateriovým úložištěm a domácností.
2. **Vývoj řídicího softwaru:** Vyvinout firmware pro mikrokontrolér, který na základě aktuálního stavu baterie a dat o spotových cenách aktivně řídí toky energií (nabíjení, vybíjení, nákup a prodej) s cílem snížit náklady.
3. **Návrh optimalizačního algoritmu:** Navrhnout a implementovat matematický algoritmus, který dynamicky reaguje na změny ve výrobě a spotřebě objektu a v reálném čase určuje ekonomicky nejvýhodnější strategii hospodaření s energií.

2 Současný stav řešené problematiky

2.1 Trh s energiemi

Tato kapitola popisuje současný stav energetického trhu v České republice. Text vysvětluje tvorbu cen elektřiny. Dále popisuje rozdíl mezi spotovým a fixním tarifem. Kapitola také objasňuje výpočet výsledné ceny pro koncového odběratele. Na závěr obsahuje zhodnocení způsobů, jak získávat spotové ceny pro účely této práce.

2.1.1 Složky ceny nakupované elektrické energie

Cena za elektřinu se skládá z regulované a neregulované složky. Neregulovanou část určuje dodavatel energie. S tímto dodavatelem uzavírá odběratel smlouvu. Regulovanou část stanovuje Energetický regulační úřad (ERÚ) [1].

Regulovaná složka	Neregulovaná složka	Daně
Distribuce	Silová elektřina	Daň z přidané hodnoty
Rezervovaný výkon	Měsíční plat	Daň z elektřiny
Systémové služby		
Nesít'ová infrastruktura		

Obr. 2.1: Struktura konečné ceny elektrické energie pro odběratele.

Jednotlivé části regulované i neregulované složky zajišťují různí účastníci trhu. Každá část má jiný vliv na výslednou cenu. Základní schéma rozdělení ceny ukazuje obrázek 2.1.

Distribuce

Největší podíl z regulované složky tvoří poplatek za distribuci a přenos elektřiny. Odběratel si nemůže vybrat svého distributora. Distributor je pevně dán podle územního umístění odběrného místa, jak ukazuje Obr. 2.2. Mezi hlavní distributory v ČR patří ČEZ Distribuce, a.s., EG.D, s.r.o. a PREdistribuce, a.s. Výše poplatku závisí na množství spotřebované elektřiny [2].

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY



Obr. 2.2: Mapa distribučních území v České republice [1].

Rezervovaný příkon

Platba za rezervovaný příkon se často označuje jako platba za jistič. Tento poplatek závisí na jmenovité hodnotě hlavního jističe v odběrném místě. Odběratel tímto poplatkem platí za kapacitu, kterou mu distributor v síti trvale rezervuje.

Systémové služby

Cena za systémové služby představuje poplatek pro společnost ČEPS, a.s. Tento státní podnik zajišťuje rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektřiny. Společnost tím udržuje stabilní síťovou frekvenci 50 Hz [3].

Nesíťová infrastruktura

Cena za provoz nesíťové infrastruktury zahrnuje poplatky pro Operátora trhu s elektřinou (OTE). Jedná se o stálý měsíční poplatek. Od 1. září 2025 činí tato částka 12,45 Kč bez DPH za jedno odběrné místo [4]. Tento poplatek tvoří pouze minimální část celkové ceny.

POZE

Složkou ceny byl dříve také příspěvek na podporované zdroje energie (POZE). Tento poplatek tvořil významnou část ceny. Od 1. ledna 2026 se však tento příspěvek plošně zrušil [5].

Neregulovaná složka

Neregulovaná složka ceny vzniká na základě tržního prostředí mezi dodavateli. Každý dodavatel nabízí jiné tarify a ceníky. Složení této části nelze popsat jednotně. Cenu určují obchodní podmínky konkrétního dodavatele.

Měření po fázích v ČR

Při návrhu řídicího systému je nutné zohlednit způsob měření elektřiny. V České republice se přítok a odtok energie počítá pro každou fázi samostatně. V zahraničí je běžné součtové

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

měření, ale tuzemské elektroměry využívají asymetrické fázové měření. Tento způsob je pro odběratele s nesymetrickou spotřebou nebo výrobou velmi nevýhodný.

Například domácnost má v daný okamžik na první fázi přebytek a prodává do sítě výkon 2 kW. Na druhé fázi má také přebytek a prodává výkon 1 kW. Na třetí fázi však zapne spotřebič a nakupuje ze sítě výkon 3 kW. Celková bilance domu je nulová ($2 + 1 - 3 = 0$ kW). Při součtovém měření by odběratel neplatil nic.

Český elektroměr však tento stav započítá jako současný nákup 3 kW a prodej 3 kW. Tento stav je finančně nevýhodný. Odběratel musí za nakoupené 3 kW zaplatit plnou cenu včetně regulované složky a distribuce. Cena za vykoupené 3 kW je přitom výrazně nižší. Tento fakt klade vysoké nároky na přesnost měření střídače a na rychlost lokálního mikrokontroléru. Systém musí aktivně vyrovnávat asymetrii mezi fázemi pomocí bateriového úložiště.

Daně

K uvedeným složkám se připočítává ekologická daň z elektřiny. Sazba této daně činí 28,30 Kč/MWh bez DPH [6]. Daň státu odvádějí přímo dodavatelé. Odběratel ji má již započítanou v konečné ceně. Na závěr se k celé částce připočítává daň z přidané hodnoty ve výši 21 % [7].

Rozdělení složek ceny elektřiny je poměrně složité. Pro účely této práce je však klíčové rozdělení na poplatky za odebranou energii a na fixní měsíční platby. Optimalizační algoritmus může ovlivnit pouze platby za skutečně odebrané množství energie v daném čase (MWh). Fixní poplatky nelze řízením nákupu a prodeje změnit.

2.1.2 Distribuční sazby

Kromě rozdělení složek ceny elektřiny je také potřeba počítat s různými distribučními sazbami. Cena za distribuci totiž může obsahovat nízký tarif (NT), někdy označovaný jako noční proud, a vysoký tarif (VT). Rozdělení do nízkého, respektive vysokého tarifu, je podle času. Čas nízkého tarifu určuje distributor [8].

Každý distributor nabízí různé distribuční sazby podle daných spotřebičů na odběrném místě, viz Tabulka 2.1. Pokud odběrné místo splňuje podmínky pro dvoutarifní sazbu, je možné směřovat vyšší spotřebu do oken s nízkým tarifem.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tabulka 2.1: Přehled vybraných distribučních sazeb ČEZ pro domácnosti

Sazba	Typ	Typické využití	Doba NT [h]
D02d	Jednotarifní	Standardní domácnost se střední spotřebou, která elektřinou netopí ani neohřívá vodu.	0
D25d	Dvoutarifní	Domácnosti s akumulacním ohřevem vody (bojler) nebo akumulacími kamny.	8
D27d	Dvoutarifní	Odběrná místa s doloženým vlastnictvím elektromobilu (nabíjení vozidla).	8
D57d	Dvoutarifní	Moderní vytápění pomocí tepelného čerpadla, elektrokotle nebo přímotopů.	20

Přiznání konkrétní distribuční sazby ze strany provozovatele distribuční soustavy je striktně podmíněno splněním technických a legislativních požadavků [8]. Obecně platí, že pro získání dvoutarifní sazby musí být na odběrném místě řádně instalován a evidován odpovídající elektrický spotřebič (např. akumulací ohřívač, systém elektrického vytápění či dobíjecí stanice pro elektromobily), což je nutné doložit revizní zprávou [9].

Zároveň je u sazeb s vysokým podílem nízkého tarifu (jako je D57d) vyžadováno splnění minimálního procentuálního podílu instalovaného příkonu topného systému vůči celkovému rezervovanému příkonu (hodnotě hlavního jističe) [10]. Technické podmínky a legislativní nároky pro přiznání jednotlivých sazeb jsou pro distribuční území ČEZ specifikovány v Tabulce 2.2 [8, 9].

Tabulka 2.2: Podmínky pro přiznání vybraných distribučních sazeb ČEZ

Sazba	Technické a kapacitní podmínky získání	Požadavek na blokování HDO
D02d	Bez specifických technologických požadavků. Standardní jednotarifní odběr.	Nerelevantní (VT trvale).
D25d	Řádně instalovaný a revidovaný akumulací spotřebič pro ohřev TUV (bojler) nebo vytápění.	Zajištěno blokování spotřebiče v době platnosti VT.
D27d	Doložení vlastnického práva nebo užívacího vztahu k elektromobilu. Nabíjecí zařízení (Wallbox/nabíječ) musí být pevně připojeno.	Blokování nabíjecího zařízení v době platnosti VT.
D57d	Instalace tepelného čerpadla, elektrokotle nebo přímotopů. Součtový příkon topných těles musí činit minimálně 40 % hodnoty hlavního jističe (u TČ není procentuální minimum striktní, hodnotí se vytápění objektu).	Povinné blokování topných soustav a ohřevu TUV v době platnosti VT.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Odběratel získává informaci o době nízkého tarifu díky hromadnému dálkovému ovládání (HDO). Jednotka HDO, kterou má spotřebitel v elektroměrovém rozváděči, v době nízkého tarifu spíná nulový vodič. Díky tomu je možné ovládat stykače, případně relé, které řídí spotřebu [9]. U dvoutarifních sazeb (D25d, D27d, D57d) je toto HDO zapojení přímou podmínkou pro přiznání tarifu, neboť distributor tímto způsobem v době vysokého tarifu silové spotřebiče blokuje, aby snížil špičkové zatížení distribuční sítě [9].

Rozdíl v cenách za distribuci v době nízkého a vysokého tarifu může dosahovat až 90 %. Je tedy velmi výhodné spotřebovávat elektřinu v dobách nízkého tarifu. V případě inteligentního řízení nákupu a prodeje elektrické energie je nezbytné získat informaci o době nízkého tarifu přímým vyčítáním stavu HDO kontaktů, nebo statickým zapsáním do algoritmu.

Dvoutarifní sazba však obsahuje vyšší měsíční poplatek než jednotarifní. Je tedy třeba zvážit, jestli má daný odběratel dostatečnou spotřebu, aby se mu přechod na dvoutarifní sazbu vyplatil.

2.1.3 Porovnání fixních a spotových cen

Tato část popisuje rozdíly mezi fixním a spotovým tarifem. Zaměřuje se na výhody a nevýhody obou možností pro různé typy odběratelů.

Standardem pro domácnosti v České republice je fixní tarif. Tento tarif přináší neměnnou cenu za odebranou elektrickou energii. Hlavní výhodou pro zákazníka je vysoká jistota. Smlouva s pevnou cenou se totiž uzavírá na několik měsíců až let dopředu. Dodavatel však nese riziko, že se ceny na trhu zvýší. Z tohoto důvodu si k ceně přidává rizikovou přírážku. Jedinou proměnnou složkou tak zůstává dvoutarifní sazba. Řízení spotřeby v levnějším čase v tomto případě zajišťuje hromadné dálkové ovládání (HDO). Podrobnosti jsou uvedeny v části 2.1.2.

Druhou možností je přechod na spotový tarif. Spotové ceny ihned reagují na aktuální situaci na trhu. Riziko z pohybu cen přebírá sám odběratel. Díky tomu ale neplatí rizikovou přírážku dodavatele. Spotové ceny se mění v průběhu celého dne podle situace na denním trhu. Tyto rozdíly v cenách lze efektivně využít. Uživatel může směřovat spotřebu do levných hodin. Může také prodávat přebytky energie v době s vysokou cenou. Podrobný popis tvorby cen se nachází v části 2.1.4.

Spotové ceny jsou obecně výhodnější než ceny fixní. Tento předpoklad platí v případě, že trh neovlivní nečekaná globální krize. Spotový tarif je výhodný hlavně pro vlastníky fotovoltaické elektrárny (FVE) s baterií.

Uživatel však musí spotřebu v dobách nízkých cen alespoň minimálně optimalizovat. To přináší další náklady. Je nutné pořídit řídicí jednotky pro automatické ovládání spotřebičů. Tyto náklady včetně zapojení dosahují desítek tisíc Kč. Výhodnost spotových cen se proto vrátí pouze odběratelům s vyšší spotřebou.

V tabulce 2.3 se nachází přehledné srovnání obou typů tarifů.

Tabulka 2.3: Srovnání fixních a spotových cen elektřiny

Vlastnost	Fixní ceny	Spotové ceny
Předvídatelnost	Vysoká – cena je stejná po celou dobu smlouvy.	Nízká – mění se každou hodinu podle burzy.
Cena silové složky	Obsahuje rizikovou přírážku obchodníka.	Odpovídá aktuální ceně na trhu bez přírážek.
Vhodnost pro FVE	Méně výhodné – pevné výkupní ceny jsou nízké.	Ideální – systém může prodávat ve špičkách a nabíjet při nadbytku.
Náročnost na řízení	Minimální – není potřeba sledovat čas a ceny.	Vysoká – vyžaduje inteligentní řídicí jednotku.

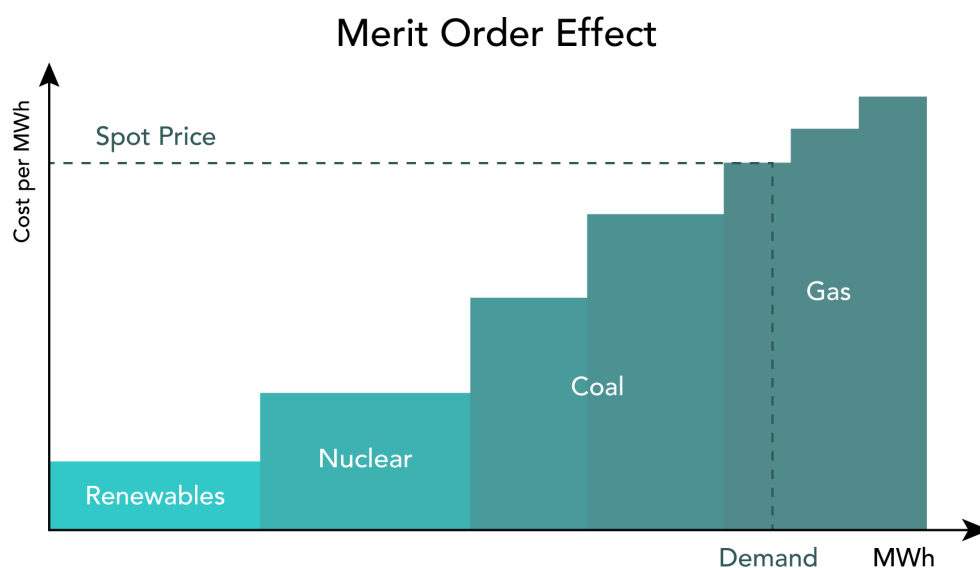
2.1.4 Tvorba a dynamika spotových cen

Tato podkapitola popisuje tvorbu spotových cen. Zaměřuje se také na mechanismy, které tyto ceny ovlivňují.

Ceny na trhu určuje mechanismus merit order [11]. V překladu tento pojem znamená „pořadí zásluh“. Princip tohoto mechanismu je jednoduchý. Jednotlivé zdroje elektřiny se řadí vzestupně podle svých mezních nákladů na výrobu 1 MWh. Do těchto nákladů patří především palivo a emisní povolenky. Náklady na stavbu samotné elektrárny se do této ceny nezapočítávají.

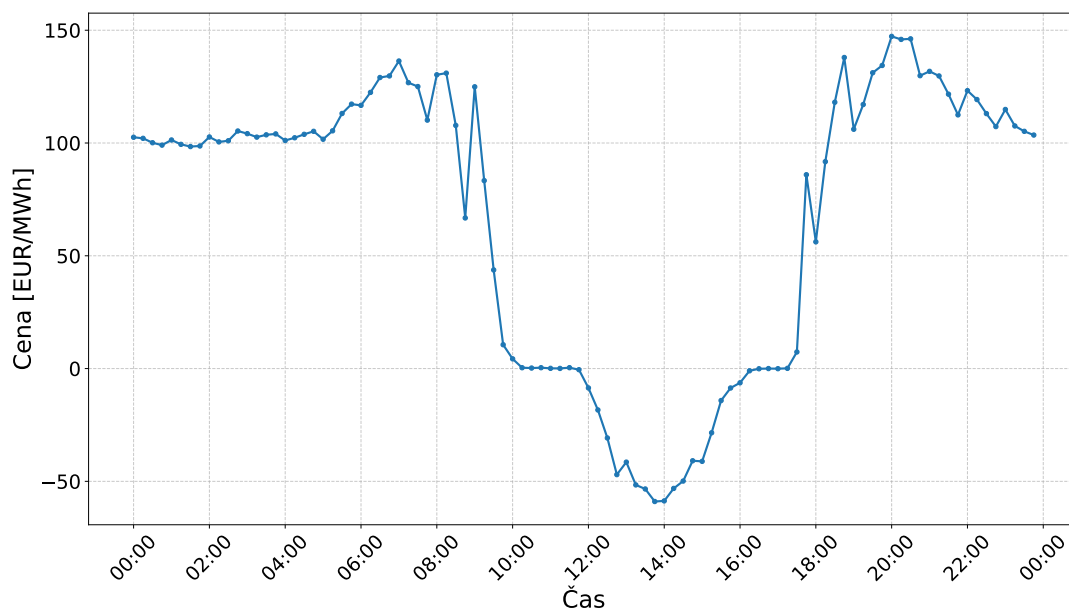
Po seřazení zdrojů se určí dodavatelé elektřiny. Výběr probíhá podle nákladů na výrobu. Nejprve dodávají energii obnovitelné zdroje. Ty mají náklady prakticky nulové. Následují jaderné elektrárny. Jako poslední dodávají energii drahé uhelné a plynové zdroje. Výslednou cenu pro danou hodinu pak určuje poslední nejdražší výrobce. Tento výrobce je nutný pro pokrytí aktuální poptávky. Na obrázku 2.3 je tento jev graficky znázorněn. Mechanismus zaručuje maximální využití levných zdrojů. Výrobcům zároveň dává jistotu, že neskončí ve ztrátě.

V době silného slunečního svitu nebo silného větru roste podíl fotovoltaických a větrných elektráren. Hlavním zdrojem elektřiny se pak stávají obnovitelné zdroje s nulovými náklady. Tento stav vytlačuje drahé fosilní výrobce. Cena elektřiny na trhu pak klesá k levnějším zdrojům.



Obr. 2.3: Grafické znázornění principu merit order na trhu s elektřinou. [12]

Cena elektřiny je kvůli tomuto jevu během dne velmi kolísavá. Volatilitu lze pozorovat především v letním období. Při silném slunečním svitu může cena klesnout i do záporných hodnot. Večer po západu slunce cena naopak výrazně roste. Je totiž nutné zapojit plynové elektrárny. Tyto zdroje vykrývají rychlý výpadek solárních elektráren. Tento průběh jasně ukazuje graf 2.1.



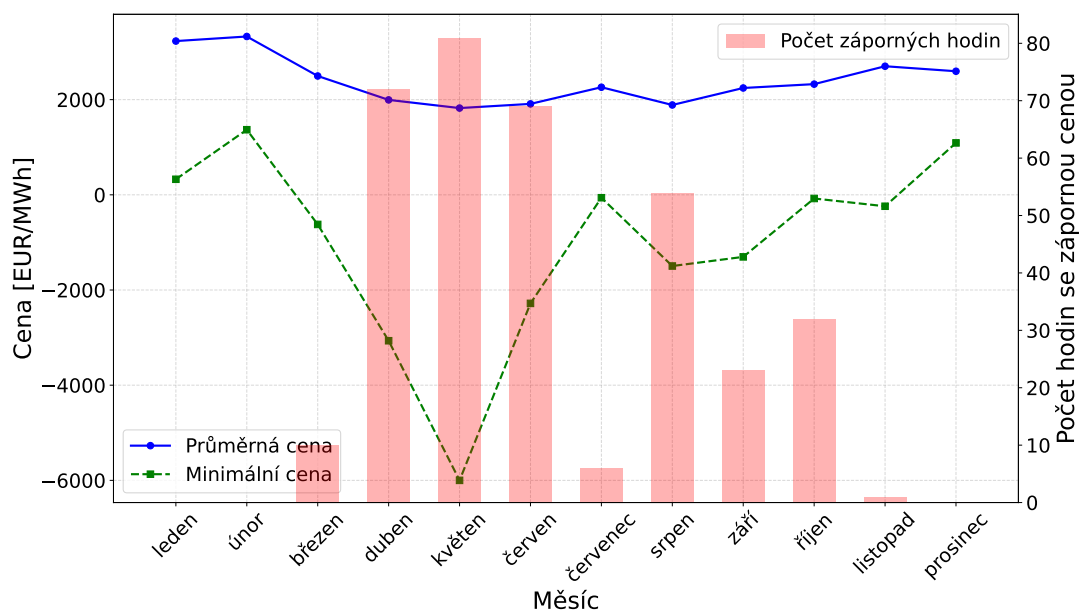
Graf 2.1: Ukázka výsledků 15minutových spotových cen pro den 23. 4. 2026.

Spotové ceny se pro malé odběratele nemění dynamicky přímo v reálném čase. Ceny jsou pevně stanoveny vždy na jeden den dopředu. Tyto hodnoty určuje operátor trhu OTE. Informace se uvolňují každý den po 12. hodině pro následující den [13]. V současnosti je cena definována pro 15minutové intervaly. Tento poznatek je pro návrh algoritmu klíčový. Cenu není nutné predikovat. Algoritmus ji může získat přímo ze serveru den dopředu.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Dalším důležitým jevem jsou záporné ceny elektřiny. Tento stav nastává hlavně ve dnech s vysokou solární výrobou. Velké množství běžících fotovoltaických elektráren vytváří v síti nadbytek energie. Řídicí mikrokontrolér musí v těchto časech zamezit nechtěnému prodeji energie. Naopak musí maximalizovat nákup z distribuční sítě a nabíjet bateriové úložiště.

Spotové ceny jsou v dlouhodobém průměru podobné jako ceny u fixních tarifů. Fixní tarify silové elektřiny se dnes pohybují okolo 4 000 Kč za 1 MWh. Průměrné spotové ceny v jednotlivých měsících ukazuje graf 2.2. Ceny na spotovém trhu jsou nejvyšší v zimních měsících. V tomto období fotovoltaické elektrárny nedosahují vysokých výkonů. Spotřeba domácností navíc roste kvůli potřebě vytápění.



Graf 2.2: Průměrný vývoj spotového trhu s elektřinou v průběhu roku.

Cílem inteligentního prediktivního řízení je snížit nákupní cenu pod tento tržní průměr. Úspěšná implementace algoritmu přinese uživateli výrazné finanční úspory za energii.

2.1.5 Složky ceny prodávané elektrické energie

Odběratel elektřiny může uzavřít s dodavatelem smlouvu o prodeji. Tato situace nastává v případě, že je odběratel zároveň vlastníkem fotovoltaické elektrárny (FVE). Prodávaná elektřina se vykupuje buď za fixní, nebo za spotové ceny. Distribuce prodávané energie je tedy obdobou nákupu.

Fixní výkupní ceny jsou obecně velmi nízké. Prodej za tyto ceny se majitelům FVE příliš nevyplácí. Spotové výkupní ceny jsou výhodnější, ale mohou dosahovat i záporných hodnot. Tento jev popisuje podkapitola 2.1.4. Řídicí mikrokontrolér proto musí proces prodeje neustále hlídat. Systém nesmí dodávat energii do sítě v době záporných cen.

Dodavatel si v obou případech účtuje stálý měsíční plat. U spotového tarifu však odběratel platí ještě dodatečný poplatek. Tento poplatek se účtuje za každou vykoupenou megawatthodinu. Částka se obvykle pohybuje okolo 500 Kč za 1 MWh. Tento poplatek posouvá hranici ziskovosti prodeje. Skutečná nulová hodnota výkupu je proto vyšší o tuto

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

marži obchodníka.

Při prodeji elektřiny se neplatí regulovaná složka ceny. To je hlavní rozdíl oproti nákupu elektřiny ze sítě.

Odběratel nemusí mít stejného dodavatele pro nákup a prodej. Může podepsat smlouvu se dvěma různými subjekty. Odběratel tak může kombinovat fixní a spotové tarify všemi způsoby. Před volbou je však nutné provést alespoň základní odhad výhodnosti dané kombinace.

2.1.6 Možnosti získání hodnoty spotových cen

Algoritmus inteligentního řízení potřebuje ke své funkci aktuální spotové ceny. Tato podkapitola popisuje a hodnotí dostupné zdroje těchto dat.

OTE

Operátor trhu v elektroenergetice (OTE) zveřejňuje ceny na svých internetových stránkách. Data jsou dostupná ke stažení ve formátu `.xlsx` [14]. Ceny v tomto souboru jsou uvedeny v eurech za jednu megawatthodinu. Český odběratel však platí v korunách. Server proto musí cenu přepočítat podle kurzovního lístku České národní banky. Kurzovní lístek je také ke stažení na stránkách OTE.

OTE provozuje vlastní datové rozhraní API. Toto rozhraní je však přístupné pouze pro smluvní partnery. Těmito partnery jsou hlavně velcí dodavatelé elektřiny. Běžný uživatel nemá k tomuto oficiálnímu API přístup.

Portál Spotovaelektrina.cz

Druhou možností je získávání dat přes specializovaný server. Příkladem je nezávislý portál Spotovaelektrina.cz [15]. Tento web nabízí data ve formátu JSON nebo XML. Ceny jsou zde již přepočítané na české koruny. Web nabízí i další funkce. Dokáže například seřadit hodiny podle ceny. Pro navrhovaný optimalizační algoritmus však stačí základní soubor s cenovými profily.

Zhodnocení ideálního zdroje pro tuto práci

Hlavní výhodou OTE je oficiální původ dat. Operátor trhu ceny přímo vytváří. Nevýhodou je nutnost stahovat soubor `.xlsx`. Mínusem je také nutnost dodatečného přepočtu měny.

Portál Spotovaelektrina.cz obě tyto nevýhody odstraňuje. Data poskytuje v příznivém formátu a v tuzemské měně. Jedinou nevýhodou je, že se nejedná o oficiální zdroj státního operátora. Z pohledu jednoduchosti implementace softwaru je však tento zdroj výhodnější. V této práci proto využíváme výhradně datové rozhraní API z portálu Spotovaelektrina.cz.

2.1.7 Přehled trhu s inteligentním řízením nákupu a prodeje elektřiny

Tato část popisuje vybraná komerční řešení na trhu. Text uvádí hlavní výhody a nevýhody různých přístupů. Následně tyto systémy porovnává s řešením, které vzniklo v rámci této diplomové práce.

Ceny elektřiny jsou v poslední době velmi proměnlivé. Na trhu proto vzniká velké množství systémů pro řízení domácí spotřeby.

Profesionální automatizační systémy

První možností je využití zavedených systémů pro chytrou domácnost. Mezi hlavní zástupce patří rakouský systém **Loxone**, český **Teco** nebo průmyslový standard **KNX**.

- **Výhody:** Vysoká spolehlivost. Systém běží na lokálním hardwaru. Nabízí možnost propojení s ostatními funkcemi domu.
- **Nevýhody:** Velmi vysoká pořizovací cena. Uživatel musí zaplatit drahý hardware i odbornou montáž.

Služby vázané na obchodníka

Druhým přístupem jsou služby od přímých dodavatelů elektřiny. Uživatel si zakoupí komunikační modul pro svůj střídač. Tento modul pak automaticky odesílá data obchodníkovi. Obchodník následně řídí nákup a prodej energie. Uživatel za tuto službu platí měsíční poplatek a nechává si celý zisk. Druhou možností je rozdělení zisku mezi uživatele a obchodníka.

Tento přístup umožňuje využít kapacitu baterie pro podporu elektrické sítě. Majitel baterie poskytuje službu výkonové rovnováhy. Za tuto pohotovost dostává pravidelné platby od společnosti ČEPS.

- **Výhody:** Snadný provoz pro uživatele. Přístup na pokročilé energetické trhy.
- **Nevýhody:** Silná závislost na jednom dodavateli. Při výpadku internetu nefunguje lokální řízení.

Modulární a IoT řešení

Třetí možností jsou jednoduché modulární systémy. Tento způsob je levnější než nákup velkých systémů pro automatizaci budov.

- **Výhody:** Nižší pořizovací cena hardwaru.
- **Nevýhody:** Slabá možnost propojení mezi přístroji od různých výrobců. Tyto systémy většinou nemají pokročilé algoritmy s předpověďmi. Pracují pouze na základě jednoduchých podmínek.

Open-source platformy

Poslední možností je využití otevřených platform. Nejznámější zástupci jsou **Home Assistant**, **Victron Energy** nebo **OpenEnergyMonitor**.

- **Výhody:** Nízká cena. Vysoká modularita a velká podpora komunity uživatelů.
- **Nevýhody:** Nutnost vysokých technických znalostí uživatele. Existuje zde riziko nestability u neoficiálních softwarových doplňků.

Srovnání s navrženým systémem na bázi STM32

Navržený systém s mikrokontrolérem STM32 kombinuje výhody popsaných řešení. Zároveň odstraňuje jejich hlavní nevýhody. Proti běžným komerčním systémům nabízí tato vylepšení:

- **Pokročilá predikce:** Systém nespolehá na jednoduchá pravidla. Využívá umělou neuronovou síť. Tato síť se dotrénuje na přesné podmínky konkrétní fotovoltaické elektrárny.
- **Optimalizace v 15minutovém rozlišení:** V roce 2026 přejde vnitrodenní trh v ČR plně na čtvrt hodinové intervaly. Systém je na tento standard připraven. Většina běžných systémů tuto rychlou změnu zatím nepodporuje.
- **Nízké náklady při zachování autonomie:** Cena hardwaru je nízká. Je srovnatelná s běžnými IoT moduly. Mikrokontrolér přesto nabízí dostatečný výkon pro prediktivní řízení na bázi modelů (MPC). To je jinak výsadou drahých průmyslových počítačů PLC.

Tabulka 2.4: Souhrnné srovnání systémů pro řízení energetických toků

Parametr	PLC (Loxone)	Služby agregátorů	Open- source	Navržený systém
Pořizovací cena	Vysoká	Nízká	Velmi nízká	Nízká
Závislost na cloudu	Ne (Lokální)	Ano	Volitelně	Částečně
Predikce pomocí NN	Ne	Ano (Cloud)	Omezeně	Ano
Složitost nastavení	Střední	Nízká	Vysoká	Střední
Optimalizace (15 min)	Omezeně	Ano	Omezeně	Plná podpora

2.2 Bateriové systémy a modelování degradace

Hlavním cílem práce je maximalizovat zisky z aktivního inteligentního řízení toků energií v domácnosti. K tomu je nutné co nejvíce využívat bateriové úložiště. Tato kapitola popisuje současný stav bateriových úložišť pro domácnosti. Zaměřuje se na zhodnocení různých typů článků a především na mechanismy stárnutí baterií. Následně porovnává modely stárnutí, které lze využít v optimalizačním algoritmu.

2.2.1 Typy bateriových článků v domácích úložištích

S nárůstem využívání elektrické energie v posledních letech roste tlak na vývoj bateriových úložišť pro akumulaci energie. Požadavky na akumulátory se pro různé scénáře liší. Zatímco pro elektromobilitu je stěžejní poměr uchovávané energie vůči objemu a hmotnosti, tzv. energetická hustota, pro statická úložiště je na prvním místě ekonomická návratnost.

Olověné baterie

Jde o starší typ dříve hojně využívaných baterií. Jejich výhodou je velmi nízká pořizovací cena. Mají však nedostatky v hloubce vybíjení (DOD), která by neměla překračovat 50–70 %. Dalšími nevýhodami jsou nízký počet cyklů, které vydrží, a nutnost specifických nabíjecích algoritmů [16].

Lithium-železo-fosfát (LFP)

LFP baterie zaujímají v roce 2025/2026 dominantní postavení v domácích úložištích. Tento typ vyniká především velkým počtem cyklů při vysoké DOD [17]. Dále jde o bezpečnou baterii s malým rizikem tepelného úniku s následným vzplanutím. To je dáno vysokou termodynamickou stabilitou materiálu katody [18, 19].

Nikl-Mangan-Kobalt (NMC)

Stejně jako u LFP se jedná o lithium-iontové baterie. Rozdíl oproti předchozímu typu je ve vyšší energetické hustotě. Zbývající vlastnosti jsou však horší, včetně ceny. Jde tedy o typ baterií vhodný především pro elektromobilitu [16].

Vanadové redoxní průtočné baterie (VRFB)

Baterie postavené na principu redukčně-oxidačního průtoku v elektrolytu na bázi vanadu mají téměř dokonalé vlastnosti z hlediska životnosti. Počet cyklů přesahuje 15 000, vybíjení může být provozováno v rozmezí 0–100 % bez degradace aktivního materiálu. Účinnost baterií je však mírně nižší než u předchozích dvou typů. Zásadním nedostatkem je cena, která je za kWh výrazně vyšší než u LFP [16].

Sodíkovo-iontové baterie (Na-ion)

Nastupující technologií je sodíkovo-iontový princip akumulátoru. Obrovskou výhodou je vynechání lithia, které je na Zemi vzácné a tím drahé. Dalším plusem je, že baterie vydrží velmi nízké okolní teploty okolo $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je tedy možné využití venkovních prostorů pro umístění úložiště bez plýtvání energií na ohřev článků. Sodík je ovšem na vzduchu vysoce hořlavý a nebezpečný materiál [16].

Tabulka 2.5: Srovnání vlastností akumulátorových článků pro stacionární úložiště

Typ baterie	Životnost	DOD	Hlavní výhody	Hlavní nevýhody
Olověné	Nízká	50–70 %	Velmi nízká cena.	Krátká životnost, náročné nabíjení.
LFP	Vysoká	Vysoká	Bezpečnost, stabilita, počet cyklů.	Nižší hustota energie než NMC.
NMC	Střední / Vysoká	Vysoká	Vysoká energetická hustota.	Vyšší cena, nižší bezpečnost.
VRFB	Velmi vysoká	0–100 %	Extrémní životnost, plné vybíjení.	Vysoká cena, nižší účinnost.
Na-ion	Střední	Vysoká	Nízká cena, provoz v mrazu ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$).	Hořlavost sodíku, nová technologie.

2.2.2 Porovnání vysokonapěťových a nízkonapěťových bateriových úložišť

Akumulátory lze srovnat podle nominálního napětí. Moderní úložiště využívají vysoké napětí přesahující 150 V. Existují ale i baterie s napětím 48 V.

Nízkonapěťové baterie

Pracují s napětím 48 V. Jde o historicky rozšířený standard.

Výhody:

- **Bezpečnost:** Napětí do 120 V DC je považováno za bezpečné. Manipulace a instalace jsou snazší [9].
- **Cena:** Tyto baterie jsou velmi rozšířené. Proto je jejich cena obvykle nižší.

Nevýhody:

- **Vysoké proudy:** Při zachování výkonu je potřeba vyšší proud ($P = UI$). To vyžaduje vodiče s větším průřezem. Náklady na kabeláž jsou proto vyšší.
- **Ztráty:** Vyšší proud vede k větším ztrátám energie přeměněné na teplo ($P = RI^2$) [16].

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- **Účinnost měniče:** Fotovoltaické panely pracují při vyšším napětí než nízkonapěťové baterie. Měnič musí překonávat velký napěťový rozdíl. To snižuje účinnost systému.

Vysokonapěťové baterie

Úložiště obvykle pracují v rozmezí 150 V až 600 V+ DC [20].

Výhody:

- **Vysoká účinnost:** Napětí akumulátoru je blízké napětí z panelů. Transformace probíhá s vyšší účinností, často přes 97 % [20].
- **Nízké proudy:** Jde o opačnou situaci než u nízkého napětí. Nižší proudy znamenají menší ztráty a levnější kabeláž.
- **Rychlost reakce:** Vysokonapěťové systémy lépe zvládají špičky při zapínání náročných spotřebičů. Měnič je dynamičtější.

Nevýhody:

- **Cena:** Technologie je komplexnější. Vyžaduje pokročilé řízení BMS pro balancování mnoha článků v sérii [16].
- **Bezpečnost:** Práce s napětím stovek voltů je nebezpečná. Vyžaduje odbornou instalaci podle přísných norem [9].

Tabulka 2.6: Srovnání parametrů nízkonapěťových a vysokonapěťových úložišť

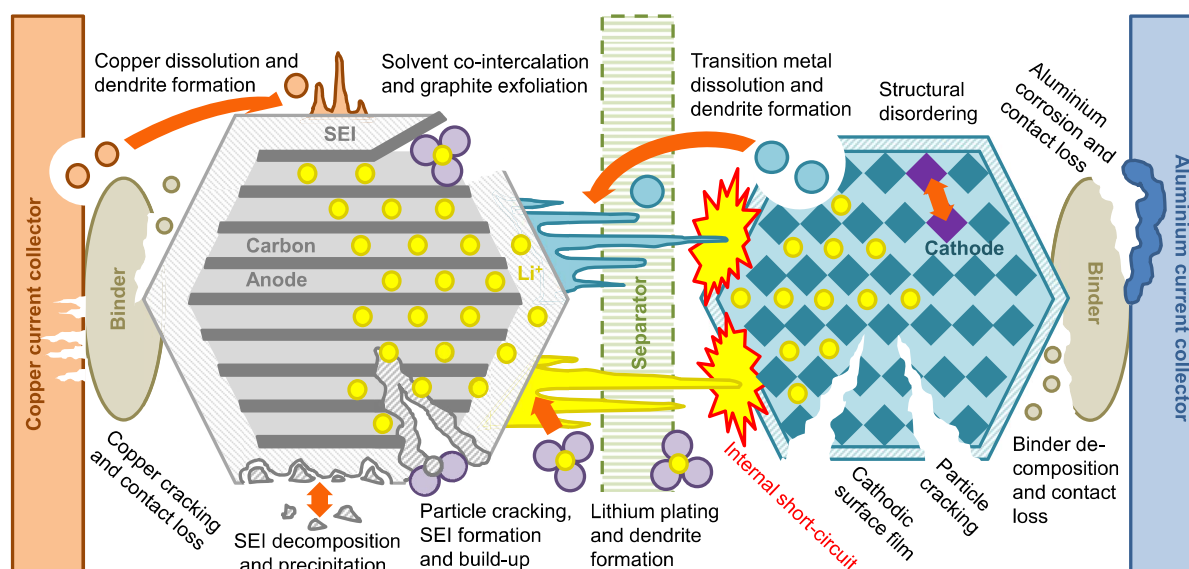
Parametr	Nízkonapěťové (LV)	Vysokonapěťové (HV)
Typické napětí	44 V – 58 V	150 V – 600 V+
Proud při 5 kW	cca 100 A	cca 10 – 25 A
Ztráty ve vedení	Vyšší	Velmi nízké
Náročnost na kabeláž	Průřezy 35 – 70 mm ²	Průřezy 4 – 6 mm ²
Účinnost cyklu	Nižší	Velmi vysoká
Vhodné pro	Chaty, menší domy	Moderní RD

Vysokonapěťová baterie je kvůli vyšší účinnosti vhodnější pro většinu uživatelů. Nízkonapěťová úložiště mají smysl pouze pro uživatele, kteří chtějí ušetřit a zvládnou si systém zapojit sami.

2.2.3 Mechanismy degradace LFP akumulátorů

Tato část popisuje příčiny úbytku kapacity a výkonu baterií. Zaměřuje se pouze na typ LFP. Tento typ je totiž v domácích úložiscích nejčastější.

Obrázek 2.4 ukazuje mechanismy, které způsobují degradaci kapacity a výkonu baterie. Detaily popisuje následující text.



Obr. 2.4: Mechanismy poškození bateriových článků

Ztráta inventáře lithia (LLI)

LLI je hlavní příčinou poklesu kapacity. Ionty lithia se spotřebují v parazitních reakcích. Přestanou být dostupné pro vratnou reakci mezi katodou a anodou. Klíčovým mechanismem je růst vrstvy SEI na grafitové anodě [19, 18]. Tato vrstva je nutná pro stabilitu článku, protože brání rozkladu elektrolytu. Její neustálé tloušťnutí však spotřebovává aktivní lithium.

Růst SEI zrychluje vysoký stav nabití (SoC) a vysoká teplota [19]. Proto by baterie neměla být dlouhodobě udržována na 100 % SoC. Dalším závažným mechanismem je tzv. lithium plating. K tomu dochází při nabíjení vysokými proudy nebo za nízkých teplot [19, 17]. Ionty lithia nestíhají proniknout do struktury grafitu. Místo toho vytvářejí metalický povlak na povrchu anody.

Tento proces je většinou nevratný. Může vést k růstu dendritů, které mohou způsobit vnitřní zkrat separátoru.

Ztráta aktivního materiálu (LAM)

LAM představuje degradaci samotné struktury elektrod. V LFP člancích k tomu dochází několika způsoby:

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- **Rozpouštění železa:** Při zvýšených teplotách se ionty železa z LFP katody rozpouštějí do elektrolytu. Tyto ionty migrují k anodě, kde se redukují. Tím poškozují strukturu SEI vrstvy a spouštějí další parazitní reakce.
- **Mechanické pnutí a praskání částic:** Během cyklování dochází k objemovým změnám krystalové mřížky (u LFP cca 6,77 %). Toto opakované namáhání vede k mikropřasklinám v částicích aktivního materiálu. Částice následně ztrácejí elektrický kontakt s kolektorem proudu.
- **Strukturní nehomogenita:** Nerovnoměrné rozložení proudu v článku vede k lokálnímu přebíjení nebo hlubokému vybíjení částic. To urychluje jejich strukturní rozpad a vede k nárůstu vnitřního odporu.

Jevy spojené s převisem anody (Anode Overhang Effect)

U komerčních článků je anoda fyzicky větší než katoda. Tím se zabrání usazování lithia na hranách. Tato oblast převisu funguje jako rezervoár. Ionty lithia se sem pomalu přesouvají v závislosti na SoC. Při dlouhodobém skladování na vysokém SoC se tento rezervoár zaplní. Při měření se to jeví jako ztráta kapacity. Část této ztráty je však vratná po několika plných cyklech nebo skladování na nízkém SoC. Tento jev může ovlivnit přesnost diagnostických algoritmů o 2,2 až 3,6 % [19].

2.2.4 Cyklické a kalendářní stárnutí baterií

Degradaci baterií dělíme na cyklickou a kalendářní. Majitelé úložišť se často obávají cyklování, protože způsobuje degradaci. Baterie však stárne i bez nabíjení a vybíjení. Tento proces je často výraznější než degradace způsobená cyklováním. Stárnutí závisí na mnoha podmínkách. Ovlivňuje ho nabíjecí proud, stav nabití (SoC) i teplota článků.

Kalendářní stárnutí

Kalendářní stárnutí probíhá neustále. Děje se tak i v době, kdy baterie nepracuje. U domácích úložišť jde o hlavní faktor degradace. Na úbytek kapacity a výkonu mají vliv tyto faktory:

- **Teplota:** Vyšší teplota zrychluje růst vrstvy SEI. Proces se řídí Arrheniovým zákonem [19, 16]. Zvýšení teploty z 15 °C na 45 °C stárnutí baterie drasticky zrychluje. Například článek o kapacitě 8 Ah ztratil při 30 °C za 8 měsíců 1 % kapacity. Při 45 °C to bylo až 7 % [18].
- **Stav nabití (SoC):** Vysoký stav nabití udržuje anodu na nižším potenciálu vůči lithiu. To zrychluje rozklad elektrolytu a růst SEI. Tento jev je nejvýraznější při skladování energie nad 90 % SoC [19].
- **Čas:** Úbytek kapacity odpovídá druhé odmocnině času [19, 17]. Odpovídá to difuzně limitovanému růstu vrstev na elektrodách [19].

Cyklické stárnutí

Cyklické stárnutí způsobuje průtok proudu při nabíjení a vybíjení. Závisí na počtu cyklů a dalších vlivech.

- **Hloubka vybíjení (DoD):** Hloubka cyklu zásadně ovlivňuje pokles kapacity. Velký rozdíl mezi nabitým a vybitým stavem mechanicky namáhá mřížku [21, 18]. Je vhodnější využít více plytkých cyklů než jeden hluboký.
- **Nabíjecí proud (C-rate):** Vysoký proud zvyšuje vnitřní ohřev. Způsobuje to Jouleovo teplo a mechanické pnutí [18]. Pro domácí systémy je vhodné omezit proudy na 0,5 až 1 C.
- **Ampérhodinová propustnost:** Úbytek kapacity lze měřit podle náboje, který prošel článkem. Pro LFP články se pokles kapacity modeluje mocninnou funkcí s exponentem kolem 0,55 [17].

Tabulka 2.7: Faktory ovlivňující degradaci LFP akumulátorů

Faktor	Kalendářní	Cyklické	Důležitost
Teplota	Ano (Arrhenius)	Ano (teplo)	Kritická
SoC	Ano (vysoké škodí)	Ne	Střední
DoD	Ne	Ano	Vysoká
C-rate	Ne	Ano	Kritická při nabíjení
Čas	Ano ($\sqrt{t}$)	Ano (nepřímo)	Vysoká

Reálné podmínky pro baterii

Pro modelování opotřebení musíme znát reálné podmínky. Největším problémem je vysoká teplota. Úložiště jsou ale často uvnitř budov, kde teplota nepřesáhne 25 °C. Teplota článků se tak 100 % času pohybuje mezi 12 °C a 32 °C. Vliv teploty lze proto v modelu zanedbat.

Nabíjecí proudy určuje BMS. Chrání tím baterii před poškozením. Z dat vyplývá, že nabíjení a vybíjení proudem nad 1 C probíhá pouze 0,01 % času. Tento vliv tedy zanedbáme. Do optimalizačního algoritmu pouze přidáme tvrdé omezení proudu.

Musíme také hlídat rozbalancování článků. Pokud jeden článek ztratí kapacitu, zbytek baterie se mu podřídí. BMS balancuje články až při nabití na 100 %. Rozdíly mezi články v okně mezi 10 % a 95 % SoC bývají pod rozlišovací schopností BMS [20, 21]. Baterie se proto musí občas nabít na 100 % a vydržet v tomto stavu několik desítek minut. Tuto podmínku vložíme nad hlavní optimalizační smyčku [20, 21].

2.2.5 Zahrnutí opotřebení baterie do optimalizačního algoritmu

Pro správnou funkci optimalizace musíme vyjádřit finanční náklady na používání baterie. Tyto náklady závisí na provozních podmínkách, které jsme popsali v podkapitole 2.2.4.

Účelovou funkci J minimalizujeme. Náklady na degradaci baterie (L_{deg}) musíme převést na stejné jednotky, jako používá zbytek funkce (např. na eura). Jak jsme uvedli dříve, teplota a výkon jsou u nás většinou v ideální oblasti. Proto tyto vlivy v modelu zanedbáme.

Faktory DoD a počet cyklů přepočítáme na celkovou energii, která proteče baterií za dobu její životnosti:

$$E_{total} = \frac{DoD}{100} E_{cap} N_{cyc} \quad (2.1)$$

Kde:

- E_{total} je celková energie protečená baterií [kWh].
- DoD je hloubka vybíjení v procentech.
- E_{cap} je nominální kapacita baterie [kWh].
- N_{cyc} je celkový počet cyklů.

Náklady na jednu nabitou 1 kWh (C_{wear}) vypočítáme jako podíl ceny baterie a celkové protečené energie:

$$C_{wear} = \frac{C_{bat}}{E_{total}} \quad (2.2)$$

Kde:

- C_{bat} je cena baterie včetně instalace [EUR].

Tento vzorec je zjednodušený. Předpokládá lineární opotřebení, které závisí pouze na protečené energii, nikoliv na hloubce vybíjení.

Dále musíme penalizovat udržování baterie na nevhodném stavu nabití (SoC). Jednoduchou možností je penalizace kvadrátem odchylky od ideálního stavu nabití (např. 50 %):

$$C_{SoC} = w_{SoC} (SoC - SoC_{ideal})^2 \quad (2.3)$$

Kde:

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- C_{SoC} jsou náklady za nevhodný stav nabití.
- w_{SoC} je váhový koeficient penalizace.
- SoC_{ideal} je stav nabití, který baterii nejméně zatěžuje.

Tento model je lineární a jednoduchý. Problémem je, že ideální SoC neexistuje. Baterii nejvíce vyhovuje rozmezí 10 % až 90 % SoC. V tomto rozmezí by penalizace měla být nulová. Při překročení 90 % by měla být penalizace mírná. Při poklesu pod 10 % by měla být penalizace velmi vysoká, nebo by měl být tento stav přímo zakázán. Vhodnější model tedy je:

$$C_{SoC} = w_{high}[\max(0, SoC - SoC_{90})]^2 \quad (2.4)$$

Spodní limit (10 %) nastavíme přímo jako tvrdé omezení v algoritmu. Tato nelineární funkce lépe popisuje degradaci baterie, ale je výpočetně náročnější. To může být problém pro běh algoritmu na mikrokontroléru.

2.3 Algoritmy pro řízení energetických toků

Ceny elektřiny na spotovém trhu podléhají častým změnám. V kombinaci s vlastní fotovoltaickou elektrárnou je proto nezbytné, aby byl celý systém řízen inteligentně. Tímto způsobem je usilováno o dosažení co nejnižších provozních nákladů. V současnosti již není považováno za dostačující pouhé aplikování jednoduchých pravidel, kterými jsou spotřebiče pouze zapínány a vypínány.

Systémy pro řízení energie (EnMS – Energy Management System) musí být navrhovány jako komplexnější celky. V reálném čase jsou systémem zohledňovány proměnlivé ceny, tepelná setrvačnost objektu, provozní omezení akumulátorové baterie i aktuální produkce výroby elektrické energie.

V první části této kapitoly je provedeno porovnání neuronových sítí (NN), genetických algoritmů (GA) a prediktivního řízení na bázi modelů (MPC). Následně je podrobný zřetel věnován zvolenému algoritmu MPC. Popsán je princip jeho fungování, matematická formulace a způsob, jakým jsou definována systémová omezení. Dále jsou analyzovány dvě možnosti implementace MPC: buď na vzdáleném serveru, nebo přímo na lokálním mikrokontroléru (MCU). V závěru kapitoly je pozornost věnována praktické realizaci MPC v prostředí serveru.

2.3.1 Porovnání optimalizačních algoritmů

Volba konkrétního algoritmu je závislá na definované cílové funkci a na omezeních daného systému. Optimalizace nákupu a prodeje elektrické energie na spotovém trhu je charakterizována vysokou složitostí, neboť spotřebiče se často nacházejí v diskrétních stavech (zapnuto/vypnuto), čímž je celá úloha činěna silně nelineární [22].

Neuronové sítě

Neuronové sítě (NN) jsou díky neustále se zvyšujícímu výkonu výpočetní techniky využívány ve stále větší míře. Za jejich hlavní výhodu je považována skutečnost, že řízený systém nemusí být složitě matematicky modelován. Optimální strategie je sítí osvojována autonomně na základě maximalizace funkce odměny (např. finanční úspory) v rámci zpětnovazebního učení [23]. Pomocí NN jsou identifikovány i komplexní vazby, které jsou analyticky popsitelné jen s velkými obtížemi. V odborných studiích je uváděno, že oproti běžným pravidlovým systémům může být pomocí neuronových sítí dosaženo úspory nákladů až o 30 % [24].

Jako hlavní nevýhoda je označován fakt, že se jedná o tzv. „black-box“ systém. Vnitřní mechanismus rozhodování sítě není transparentní. Nelze tedy garantovat, že ze strany NN nebude navržena akce, kterou by mohl být poškozen hardware (např. z důvodu překročení maximálního povoleného nabíjecího proudu baterie). Pro účely této práce je navíc tento přístup vyhodnocen jako nerealizovatelný, neboť je vyžadováno obrovské množství trénovacích dat a dlouhý čas vyhrazený pro proces učení.

Genetické algoritmy

Genetické algoritmy (GA) jsou metodologicky založeny na principech biologické evoluce. Globální minimum nákladové funkce je vyhledáváno systematickým prohledáváním stavového prostoru možných profilů spotřeby a ukládání energie [25].

Za výhodu GA je považována jejich schopnost efektivně pracovat s nekonvexními a nespojitými funkcemi. Na rozdíl od gradientních metod není vyžadován výpočet derivací, díky čemuž jsou genetické algoritmy vhodné pro nelineární modely obsahující logické podmínky. GA jsou rovněž přirozeně strukturovány jako multikriteriální, což umožňuje simultánní minimalizaci finančních nákladů a maximalizaci životnosti bateriového úložiště. V kombinaci s umělými neuronovými sítěmi (ANN-GA) jsou tyto postupy velmi efektivně využívány pro optimální plánování provozu domácích spotřebičů [26].

Model Predictive Control (MPC)

Prediktivní řízení na bázi modelů (MPC) je v současné době pro inteligentní řízení toků energie vnímáno jako nejvhodnější technologie. V rámci MPC je kombinována matematická optimalizace s konceptem zpětné vazby. V každém diskrétním časovém kroku jsou minimalizovány náklady na energii na zvoleném predikčním horizontu [27].

Mezi klíčové výhody MPC pro účely této práce jsou řazeny:

- **Explicitní vyjádření omezení:** Fyzikální omezení (např. maximální kapacita a výkon baterie) i uživatelské požadavky (např. komfortní teplota v interiéru) jsou vkládány přímo do struktury matematického modelu.
- **Ekonomická optimalizace:** Účelová funkce je definována přímo ve finančních jednotkách, čímž je přirozeným způsobem integrován nákup i prodej energie.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- **White-box systém:** Algoritmus je zcela čitelný. Kauzální vazby rozhodovacího procesu jsou jasně definovány a zpětně analyzovatelné.

Shrnutí výběru algoritmu

Tabulka 2.8: Srovnání metod řízení a optimalizace pro systémy EnMS

Vlastnost	Neuronové sítě	Genetické algoritmy	MPC
Znalost fyziky	Není vyžadována	Není vyžadována	Kriticky důležitá
Interpreovatelnost	Velmi nízká	Střední	Velmi vysoká
Garantovaná stabilita	Obtížně dosažitelná	Není garantována	Teoreticky podložena
Omezení	Skrze penalizace	Skrze penalizace	Explicitně v modelu
Rychlost výpočtu	Extrémní (inference)	Nízká (evoluce)	Střední (optimalizace)

Pro tuto práci je zvoleno MPC. Metody s NN jsou sice populární, ale pro tuto práci je nedostatek dat. GA jsou možné, ale kladou vysoké nároky na výpočetní výkon, což by ztížilo implementaci na lokální MCU. Hlavním důvodem pro MPC je tedy princip "white-box". Umožňuje nám přímo nahlédnout do výpočtů a přesně zjistit, která část funkce způsobila nákup energie v daný okamžik.

2.3.2 Teoretické principy a mechanismy MPC

V této části jsou popsány základní teoretické principy a vnitřní mechanismy prediktivního řízení na bázi modelů (MPC), aby mohly být v rámci této práce správně využity pro účely optimalizace energetických toků.

Architektura ustupujícího horizontu

Základem MPC je princip ustupujícího horizontu, kterým je statická optimalizační úloha transformována na dynamický proces řízení v uzavřené smyčce [27].

Na rozdíl od řízení s otevřenou smyčkou, kde je optimální akční plán vypočítán jednorázově na celý uvažovaný horizont (například 24 h) a následně bezvazebně aplikován, pracuje MPC v sekvenčních cyklech [28]. V každém diskrétním časovém kroku t je realizován následující postup:

1. Je změřen (nebo pomocí estimátoru odhadnut) aktuální stav systému $x(t)$, což v kontextu EnMS představuje typicky stav nabití akumulátoru (SoC) a vnitřní teplotu objektu.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

2. Je definována optimalizační úloha na konečném predikčním horizontu N (např. 96 kroků při periodě vzorkování 15 min) s integrací aktuálních predikcí cen, osvitů a spotřeby.
3. Je vyřešena minimalizace účelové funkce na tomto horizontu N , čímž je získána optimální sekvence budoucích akčních zásahů u^* .
4. Do reálného systému je aplikován pouze první krok $u^*(t)$ z této vypočítané sekvence.
5. V následujícím časovém kroku $t + 1$ je celý predikční horizont posunut o jeden krok vpřed a celý proces je opakován s nově aktualizovanými daty.

Tímto zpětnovazebním přístupem je zajištěna vysoká odolnost celého systému vůči chybám v předpovědích počasí a spotřeby a vůči dalším procesním šumům [27].

Matematická formulace stavového prostoru

Pro modelování energetických systémů v rámci budov je standardně využíván diskrétní lineární stavový model 2.5. Tento přístup vyniká nízkou výpočetní náročností, což umožňuje transformovat optimalizační úlohu na úlohu kvadratického programování (QP), pro kterou existují efektivní a rychlé numerické řešiče [22].

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k \quad (2.5)$$

Význam jednotlivých matematických symbolů je následující:

- x_k představuje stavový vektor systému, který typicky obsahuje informaci o množství akumulované energie v baterii, tepelném stavu budovy nebo stavu akumulátoru teplé užitkové vody (TUV).
- u_k značí vektor řídicích (akčních) proměnných, do něhož jsou řazeny regulovatelné výkony nabíjení/vybíjení baterie a výkony spínaných či modulovaných spotřebičů.
- w_k je vektor neměřených či měřených poruch, mezi které je klasifikována predikovaná výroba z fotovoltaické elektrárny (FVE), nekontrolovaná spotřeba domácnosti či fluktuace venkovní teploty vzduchu.
- A je matice systému popisující inherentní dynamiku objektu.
- B je matice vstupů modifikující vliv akčních zásahů na stavy systému.
- G je matice poruch vyjadřující vazbu vnějších vlivů na stavový vektor.

Následně je definována účelová (nákladová) funkce J , která je minimalizována na predikčním horizontu N . Tato funkce je pro potřeby EnMS koncipována ze čtyř základních složek:

- finanční náklady na nákup elektrické energie z distribuční sítě,

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- finanční výnosy generované prodejem přebytků elektrické energie zpět do sítě,
- matematické vyjádření ceny za degradaci (opotřebení) akumulátorové baterie,
- penalizační členy, jimiž je postihováno nežádoucí chování (např. hluboké vybití baterie pod kritickou mez nebo porušení definovaného teplotního komfortu uživatele).

Účelová funkce je formálně zapsána ve tvaru:

$$J = \min_u \sum_{k=0}^{N-1} \left(\text{price}_{\text{buy},k} P_{\text{in},k} - \text{price}_{\text{sell},k} P_{\text{out},k} + \text{Cost}_{\text{deg}}(u_k) + \text{Penalty}(x_k) \right) \quad (2.6)$$

Tato matematická funkce je minimalizována v každém kroku pomocí vhodného numerického řešiče. Jak již bylo specifikováno v rámci principu ustupujícího horizontu, do reálného akčního členu je z celé trajektorie odeslán vždy pouze první vypočtený akční zásah $u^*(t)$ [27].

2.3.3 Srovnání běhu optimalizace na serveru vs. MCU

Při návrhu řízení je nezbytné rozhodnout, na jaké hardwarové platformě bude algoritmus MPC vykonáván. V úvahu jsou brány dvě základní varianty: buď realizace přímo na lokálním mikrokontroléru (MCU), nebo na vzdáleném serveru. Obě varianty jsou charakterizovány specifickými výhodami a nevýhodami.

Implementace na mikrokontroléru (MCU)

Tímto řešením je reprezentován přístup označovaný jako „edge computing“. Celý systém je v tomto případě koncipován jako maximálně autonomní.

Výhody:

- **Nezávislost:** Řídicí proces není závislý na internetovém připojení ani na dostupnosti vzdáleného serveru. Při výpadku síťové komunikace je v řízení na MCU pokračováno podle posledních platných dat.
- **Rychlost:** Data nejsou přenášena prostřednictvím externí sítě. Vnitřní regulační smyčky mohou být vykonávány v řádu milisekund, což je optimální pro okamžitou hardwarovou ochranu akumulátoru.
- **Bezpečnost:** Data o spotřebě elektrické energie neopouštějí lokální síť objektu. Tím je zamezeno jejich neautorizovanému získání třetími stranami.

Nevýhody:

- **Omezená kapacita paměti:** Paměť RAM je limitována řádem stovek kB, což je pro spuštění standardních optimalizačních řešičů nedostatečné.
- **Nutnost vývoje v C/C++:** Programování v těchto nízkoúrovňových jazycích je časově náročné a vykazuje vyšší komplexitu. Experimentování s pokročilými modely je tím výrazně ztíženo.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- **Nutnost zjednodušování modelu:** Vzhledem k nízkému výpočetnímu výkonu platformy nelze v reálném čase řešit nelineární optimalizační úlohy. Model musí být zjednodušen do lineární formy, např. na úlohu lineárního (LP) nebo kvadratického programování (QP).

Implementace na serveru

Server (například v cloudovém prostředí) disponuje vysokým výpočetním výkonem, díky čemuž je optimalizační úloha vyřešena za zlomek sekundy. Vypočtené výsledky jsou následně přenášeny do MCU.

Výhody:

- **Vysoký výpočetní výkon:** Server s rozsáhlou pamětí RAM umožňuje řešení i vysoce komplexních úloh. Do modelu tak může být implementován například přesný matematický popis degradace akumulátoru [22].
- **Využití ekosystému Pythonu:** V prostředí Pythonu jsou k dispozici špičkové modelovací knihovny jako CasADi, Pyomo nebo CVXPY. Vývojový cyklus je tímto způsobem výrazně akcelеровán.
- **Efektivní správa dat:** Ze strany serveru je snadno zajištěno stahování aktuálních cen ze spotového trhu i ukládání provozních dat do databáze.

Nevýhody:

- **Kritická závislost na internetu:** Při výpadku datového spojení nemá MCU k dispozici aktualizovaný plán řízení. Do mikrokontroléru proto musí být implementována záložní nouzová logika, kterou je při ztrátě spojení zajištěn bezpečný a stabilní chod střídače.
- **Provozní náklady:** Provozování serverové infrastruktury v cloudu je spojeno s pravidelnými měsíčními náklady přibližně ve výši 10 až 30 EUR.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tabulka 2.9: Srovnání implementace řídicího algoritmu na MCU a serveru

Kritérium	MCU	Server
Dostupná RAM	stovky kB	GB
Jazyk	C / C++	Python
Možnost MILP	Velmi omezená	Plná podpora
Vývojový čas	Vysoký	Nízký
Bezpečnost	Vysoká (lokální)	Vyžaduje šifrování
Autonomie	Plná	Závislá na síti

Pro účely této práce bylo rozhodnuto o realizaci implementace na serveru. Vývojový proces v prostředí Pythonu vykazuje výrazně vyšší rychlost a pro náročné výpočty je výkon serverové platformy shledán mnohem vhodnějším než limitované zdroje lokálního mikrokontroléru.

2.3.4 Možnosti implementace MPC v Pythonu na serveru

V rámci diplomové práce je klíčové provést volbu optimálních softwarových nástrojů. Těmito nástroji je umožněna exaktní formulace optimalizační úlohy a její následné propojení s numerickým řešičem.

Knihovny pro modelování

Pro matematickou formulaci problému MPC jsou uvažovány následující softwarové knihovny:

- **CasADi:** Tento nástroj je považován za standard pro oblast nelineárního MPC. Je jím umožněno rychlé vyčíslování derivací pomocí algoritmu automatické diferenciace a podporováno je též generování C-kódu pro následné nasazení v MCU. Syntaxe je striktně orientována na maticové operace, což je spojeno s vyšší náročností v počáteční fázi učení.
- **do-mpc:** Jedná se o softwarovou nástavbu nad frameworkem CasADi, která je přímo specializována na problematiku MPC. Obsahuje již předpřipravené funkční moduly pro definici modelu a regulátoru. Tvorba vnitřních matic je plně automatizována, čímž je urychlen celý proces vývoje.
- **Pyomo:** Tento framework se vyznačuje vysokou mírou shody s čistým matematickým zápisem úloh. Je velmi často využíván pro lineární a smíšené celočíselné úlohy (MILP). Pyomo samo o sobě nepředstavuje řešič, nýbrž vysokoúrovňové rozhraní pro komerční i open-source solvery. Vyznačuje se značnou flexibilitou.
- **CVXPY:** Tato knihovna je primárně zaměřena na oblast konvexní optimalizace. Její struktura je velmi jednoduchá a přehledná. Použití je vhodné zejména pro roz-

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

sahově menší modely, složité nelineární úlohy však tímto nástrojem podporovány nejsou.

Numerické řešiče

Zatímco výše uvedenými knihovnami je optimalizační úloha formálně definována, samotný numerický výpočet je prováděn dedikovaným řešičem [27].

- **IPOPT:** Vysoce výkonný řešič určený pro rozsáhlé nelineární optimalizační úlohy se spojitými proměnnými. Velmi často je aplikován v přímé kombinaci s knihovnou CasADi [23].
- **OSQP:** Moderní numerický řešič specializovaný na kvadratické programování. Vyznačuje se vysokou numerickou stabilitou a rychlostí, pročež je optimální pro lineární varianty MPC.
- **Gurobi:** Špičkový komerční optimalizační software. Pro akademické účely je poskytován bezplatně a vykazuje nejvyšší výkon při řešení úloh s celočíselnými proměnnými (MILP) [26].

2.3.5 Závěr volby

Prediktivní řízení na bázi modelů (MPC) je pro řešení zadaného problému vyhodnoceno jako nejvhodnější metodika. Pomocí MPC je umožněna efektivní práce s budoucími predikcemi cen na spotovém trhu OTE a současně jsou striktně dodržovány definované fyzikální limity akumulátoru i odběrného místa [28].

V rámci této práce je algoritmus MPC situován na server. Tímto způsobem je umožněno plné využití výpočetního potenciálu jazyka Python a pozornost může být plně soustředěna na robustní návrh řídicí logiky. V budoucích fázích vývoje je jako ideální směr uvažován přenos výpočetního jádra přímo na úroveň mikrokontroléru, čímž by bylo dosaženo ještě vyšší systémové stability a datové bezpečnosti.

2.4 Predikční modely a předpověď výkonu FVE

Pro správnou funkci optimalizace je klíčová předpověď vnějších vlivů, kterými je ovlivňován energetický systém domácnosti. Tato práce je zaměřena na domácnosti s bateriovým úložištěm a fotovoltaickou elektrárnou (FVE). Z tohoto důvodu je vyžadováno předpovídání energie vyrobené solárními panely.

Pro předpověď výroby je využíváno několik přístupů. Prvním z nich je fyzikální modelování. Další dva přístupy jsou založeny na využití strojového učení, přičemž se jedná o obyčejné dopředné neuronové sítě a komplexní rekurentní architektury typu LSTM (Long Short-Term Memory).

2.4.1 Fyzikální modelování

Fyzikální přístup představuje tradiční metodu, u které není vyžadováno vlastnictví historických dat o výrobě konkrétní elektrárny. Tato vlastnost je považována za hlavní výhodu

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

při aplikaci u nových projektů. Tento model bývá označován jako „white-box“, avšak je při něm vyžadováno hluboké porozumění fyzikálním principům.

Matematická formulace

Základní rovnice pro výpočet okamžitého výkonu fotovoltaického panelu (2.7) kombinuje několik parametrů, mezi něž se řadí [29]:

- geometrické parametry instalace,
- optické vlastnosti materiálu,
- meteorologické vstupy.

$$P = A \cdot \eta \cdot G_{PAO} \cdot \alpha \quad (2.7)$$

Kde:

- A ... plocha panelů,
- η ... účinnost buňky při standardních testovacích podmínkách (STC),
- G_{PAO} ... intenzita záření dopadající na rovinu panelu (Plane of Array),
- α ... koeficient snížení účinnosti vyvolaný ostatními vlivy.

Rovnice (2.7) je zdánlivě jednoduchá, avšak jako problematické se jeví získání všech potřebných parametrů. Plocha panelů A a účinnost buňky η jsou jasně definovány a jsou uváděny výrobcem v technické dokumentaci.

Komplikace nastávají při určování intenzity záření G_{PAO} a koeficientu snížení účinnosti α . Tyto veličiny jsou podrobněji rozebrány v následujících částech.

Intenzita záření dopadající na rovinu panelu

Zkratka PAO vychází z anglického termínu „Plane of Array irradiance“ a představuje intenzitu záření v rovině pole. Tato veličina je vázána přímo na konkrétní orientovanou plochu. Globální záření dopadající na nakloněný panel je rozdělováno do tří základních složek [30]:

$$G_{PAO} = G_{DNI} \cdot \cos(\theta) + G_{diff} + G_{refl} \quad (2.8)$$

Kde:

- G_{DNI} ... intenzita přímého záření měřená na plochu kolmou k paprskům (Direct Normal Irradiance),

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- θ ... úhel mezi vektorem dopadajících paprsků a normálou plochy panelu,
- G_{diff} ... difuzní složka představující záření rozptýlené v atmosféře,
- G_{refl} ... odražená složka představující záření odražené od okolních ploch.

Největší vliv na celkovou výrobu elektrické energie je přisuzován první složce, tedy přímému záření.

Difuzní část nabývá na významu především při vysoké oblačnosti a její velikost je závislá na natočení panelů. Difuzní záření je obecně vyjadřováno vůči horizontální rovině (G_{HDI}). Označíme-li úhel náklonu panelu od vodorovné roviny jako ϕ , je pro výpočet uplatňován následující vztah [31]:

$$G_{diff} = G_{HDI} \cdot \frac{1 + \cos(\phi)}{2} \quad (2.9)$$

Odražená složka je vyjadřována analogickým způsobem. Namísto horizontálního difuzního záření je uvažováno globální horizontální záření G_h . Současně musí být zohledněna odrazivost okolního terénu, která je popsána pomocí koeficientu albeda ρ :

$$G_{refl} = G_h \cdot \rho \cdot \frac{1 + \cos(\phi)}{2} \quad (2.10)$$

Tento člen je významný zejména pro oboustranné (bifaciální) panely.

Je zjevné, že intenzita záření v rovině panelu je závislá na mnoha okolních podmínkách. Je nutné znát jednotlivé složky záření a také koeficient albeda, jehož hodnota se liší podle typu a stavu povrchu v okolí instalace.

Ztrátové faktory výkonu panelu

V rovnici (2.7) je obsažen člen α , v němž je zahrnuta závislost účinnosti na teplotě β , propustnost krycího skla τ a vliv usazených nečistot (znečištění prachem). Tyto veličiny se vyznačují obtížným matematickým popisem.

V rámci teplotní závislosti je uvažována teplota samotného fotovoltaického článku. Ta je ovlivňována okolní teplotou a intenzitou dopadajícího záření. Článek je zároveň ochlazován konvekcí a naopak ohříván vnitřními elektrickými ztrátami. Konvekce je přitom závislá na rychlosti a směru proudění větru. Tímto je demonstrováno, jak komplexní model musí být sestaven pro přesný odhad výkonu panelu.

Propustnost je determinována tloušťkou ochranného skla a přítomností prachové vrstvy. Dalším významným faktorem je odrazivost skla, kterou je drasticky snižována účinnost při vysokých úhlech mezi dopadajícími paprsky a normálou plochy.

Zhodnocení možnosti využití fyzikálního modelu pro predikci výroby FVE

Fyzikálním modelem je vyžadováno odvození komplexních rovnic, které jsou závislé na mnoha vnějších vlivech. Přestože některé vlivy lze zanedbat, výsledný model zůstává pro dosažení rozumného odhadu velmi složitý.

Hlavní problém spočívá v dosazování specifických koeficientů a v náročnosti získávání dat o jednotlivých složkách záření. Model vykazuje teoretickou funkčnost především za jasného počasí. V případě oblačnosti se do popředí dostává problematický člen G_{diff} .

Další komplikace je způsobována zastíněním panelů okolními budovami nebo vegetací. V takových případech dochází k prudkému poklesu výkonu FVE, což je vliv, který nemůže být v přesných predikcích zanedbán.

2.4.2 Obyčejná neuronová síť

Vícevrstvý perceptron (MLP) představuje základní typ dopředné neuronové sítě. V oblasti fotovoltaiky je MLP považován za jeden z nejčastěji využívaných nástrojů pro krátkodobé předpovědi. Na rozdíl od fyzikálních modelů jsou vztahy mezi meteorologickými podmínkami a výstupním výkonem učeny přímo z historických dat. Tímto způsobem jsou zachyceny i drobné anomálie konkrétní instalace, aniž by bylo nutné složitě popisovat samotné fyzikální děje.

Funkce MLP

Typická síť MLP určená pro předpověď výkonu FVE je složena ze vstupní vrstvy, jedné nebo několika skrytých vrstev a výstupní vrstvy. Každému spoji mezi neurony je přiřazena specifická váha. Během procesu učení jsou tyto váhy postupně upravovány pomocí algoritmu zpětného šíření chyby (backpropagation) [32].

Předpověď výkonu FVE je formulována jako regresní úloha, kde jsou na vstup přiváděny hodnoty předpovědi počasí. Matematicky je operace v jedné vrstvě sítě zapsána následovně:

$$h = \sigma(Wx + b) \quad (2.11)$$

Kde:

- x ... vektor vstupních dat,
- σ ... nelineární aktivační funkce,
- W ... matice synaptických vah,
- b ... vektor posunů (biasů).

Výhody využití MLP pro předpověď výroby FVE

1. **Nízké nároky na výpočetní výkon:** Učení sítě MLP vyžaduje řádově kratší čas oproti architekturám typu LSTM.
2. **Menší nároky na množství dat:** Pro úspěšné natrénování MLP není vyžadováno tak rozsáhlé množství historických dat jako u sekvenčních sítí.
3. **Vysoká rychlost predikce:** Výpočet dopředného chodu již naučené sítě je prováděn téměř okamžitě, což je výhodné při integraci velkého počtu elektráren do distribučního systému.
4. **Vysoká přesnost:** Za předpokladu dostupnosti kvalitních vstupních dat je síť MLP dosahováno nízké chybovosti [33].

2.4.3 LSTM

Sítě LSTM (Long Short-Term Memory) představují pokročilý typ rekurentních neuro-nových sítí, které jsou navrženy specificky pro práci s časovými řadami a sekvencemi [34]. Jejich hlavní přednost spočívá ve schopnosti uchovávat informaci o minulých stavech počasí a výroby, díky čemuž je dosahováno lepších výsledků při predikci výkonu během rychlých změn meteorologických podmínek.

Funkce LSTM

Zatímco síť MLP je každý časový bod zpracováván nezávisle na předchozích, v síti LSTM je využívána vnitřní paměť (buňkový stav) a systém hradel, kterými je řízen tok informací. Zapomínacím hradlem je určováno, které informace z minulosti již nejsou podstatné. Vstupním hradlem jsou naopak vybírány nové informace určené k uložení do paměti.

Tímto mechanismem je úspěšně řešen problém mizejícího gradientu, kterým jsou klasické rekurentní sítě limitovány při učení dlouhodobých závislostí. Síť LSTM tak může být zachycen například vliv ranní mlhy, která se postupně rozpadá, a to na základě dat z předchozích hodin [35].

Výhody využití LSTM pro předpověď výroby FVE

1. **Práce s dlouhodobými závislostmi:** Tradiční sítě vykazují rychlé zapomínání informací z dlouhé historie. V síti LSTM je integrována vnitřní paměť, kterou jsou tyto informace udržovány po optimální dobu.
2. **Modelování komplexních nelineárních vztahů:** Výroba FVE není determinována pouze samotným časem, ale je ovlivňována mnoha synergickými faktory. Síť LSTM jsou tyto složité korelace efektivně zachycovány.

2.4.4 Srovnání metod predikce výroby fotovoltaické elektrárny

V následující tabulce (2.10) jsou shrnuty kritické parametry pro predikci výkonu FVE.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tabulka 2.10: Srovnání metod predikce výroby fotovoltaické elektrárny

Kritérium	Fyzikální model	MLP (NN)	(Obyčejná NN)	LSTM (Sekvenční NN)
Nároky na data	Žádné (parametry)	Střední (dat)	(měsíce)	Vysoké (roky sekvencí)
Přesnost (jasno)	Velmi vysoká	Velmi vysoká		Velmi vysoká
Přesnost (proměnlivo)	Nízká	Vysoká		Velmi vysoká
Výpočetní náročnost	Minimální	Nízká		Velmi vysoká
Složitost impl.	Střední (fyzika)	Nízká		Vysoká
Modelování stínění	Manuální / obtížné	Automatické z dat		Automatické z dat

Po provedení analýzy různých přístupů bylo rozhodnuto ve prospěch využití struktury MLP. Nevýhody fyzikálního modelování spočívají především v extrémní složitosti a v praktické nemožnosti formulace dostatečně přesného matematického modelu pro všechny myslitelné provozní podmínky. Architektura LSTM sice představuje nejpresnější variantu, avšak je jí vyžadováno obrovské množství historických dat, k nimž v rámci této práce nebyl zajištěn přístup.

2.4.5 Nástroje pro sběr dat

Základem pro korektní natrénování vícevrstvé perceptronové neuronové sítě (MLP) je zajištění kvalitních datových sad. Pro proces učení jsou vyžadovány vstupní parametry předpovědi počasí a přesná pozice slunce. Dále jsou uvažovány geometrické vlastnosti instalovaných panelů a skutečný měřený výstupní výkon elektrárny.

Data počasí

Pro trénování MLP je ideální uplatnit přímo předpovědi počasí, nikoli zpětně naměřené reálné hodnoty. Historické předpovědi z numerických matematických modelů však zpravidla nebývají dlouhodobě archivovány. Tato skutečnost však nepředstavuje zásadní bariéru. Přesnost odhadu meteorologických podmínek na následující den je velmi vysoká, přičemž úspěšnost předpovědi běžně přesahuje hodnotu 90 %. Vzhledem k tomu, že model vyžaduje predikci pouze na jeden až dva dny dopředu, jsou reálná naměřená historická data považována za plně dostačující alternativu.

Pro získávání informací o stavu atmosféry je využíváno rozhraní **Open-Meteo API**. Tímto nástrojem jsou poskytována jak historická data pro trénink MLP, tak aktuální předpovědi pro operativní provoz samotného algoritmu.

Kromě čistě meteorologických dat je nezbytné stanovit přesnou polohu slunce na obloze. K tomuto účelu je implementována softwarová knihovna **pvlb** vyvíjená pro programovací jazyk Python [36].

Geometrické vlastnosti instalace

Informace o natočení panelů vůči světovým stranám (azimut) byly získány pomocí softwarového nástroje **Google Earth Pro**. Sklon panelů (elevace) byl odhadnut přímo na základě typu a konstrukčního tvaru objektu, na němž je fotovoltaická elektrárna instalována.

Data výstupního výkonu

Data popisující skutečný výkon solárních panelů jsou stahována z cloudové platformy **Solax Cloud**. Pro účely této práce byly analyzovány a zpracovány provozní záznamy získané od 10 reálných uživatelů.

2.5 Serverová architektura a softwarové standardy

Rozvoj moderních energetických systémů vyžaduje implementaci sofistikované informační a komunikační infrastruktury. Tento požadavek je urgentní zejména v oblasti integrace a řízení obnovitelných zdrojů energie (OZE), kde dochází k vysoké fluktuaci výroby. Infrastrukturou musí být zajištěn kontinuální sběr, spolehlivé zpracování a analýza telemetrických dat v reálném čase.

V rámci realizovaného řešení je serverová část koncipována jako centrální uzel, který je klíčový pro celkovou funkčnost systému inteligentního energetického managementu (EnMS). Tímto uzlem jsou agregována a korelována telemetrická data z lokálních měničů, predikční modely výroby i spotřeby elektrické energie a externí datové zdroje. Mezi tyto externí vstupy jsou řazeny především aktuální a vnitrodenní ceny na spotovém trhu s elektřinou.

2.5.1 Softwarová architektura řídicího systému a framework FastAPI

Volba vhodného komunikačního rozhraní je pro systémy typu EnMS kritickým faktorem, neboť přímo ovlivňuje latenci, propustnost a spolehlivost datových toků z distribuovaných IoT zařízení. Pro vývoj backendové vrstvy byl zvolen moderní webový framework FastAPI, jenž je postaven na standardních typových anotacích jazyka Python. Tímto nástrojem je dosahováno vysokého výpočetního výkonu a vysoké úrovně bezpečnosti typu (type safety) při zachování rychlosti vývoje.

Asynchronní zpracování dat

Hlavní výhoda frameworku FastAPI spočívá v nativní podpoře asynchronního programování, které je realizováno prostřednictvím standardu ASGI (Asynchronous Server Gateway Interface). V rámci navržené architektury je tak umožněna efektivní obsluha I/O operací, přičemž zpracování dat a čekání na síťové odpovědi neblokuje vykonávání instrukcí na úrovni procesoru. Webovým serverem může být v jeden okamžik asynchronně obsluhováno více heterogenních úloh:

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

- Přijímání a parsování telemetrických dat z lokálních mikrokontrolérů.
- Dotazování na aktuální spotové ceny u operátora trhu.
- Ukládání provozních stavů do perzistentního úložiště a komunikace s externími předpovědními API (např. systém Open-Meteo).

Tento princip je založen na architektuře smyčky událostí. V momentech, kdy je systém nucen čekat na odpověď ze sítě, je prostřednictvím klíčového slova `await` uvolněn procesorový čas. Tímto způsobem je maximalizována efektivita využití systémových prostředků.

Výkonnostní parametry

Framework FastAPI interně využívá vysoce optimalizované knihovny Starlette (pro webovou část) a Pydantic (pro validaci dat). Díky tomu je dosahováno propustnosti, která je plně srovnatelná s kompilovanými nízkoúrovňovými jazyky, jako je například Go.

V rámci syntetických benchmarků je tímto řešením dosahováno kapacity až 20 000 požadavků za sekundu (req/s). Starší frameworky (např. Flask) jsou limitovány synchronním modelem WSGI (Web Server Gateway Interface), kde je pro obsluhu každého požadavku alokováno samostatné vlákno operačního systému. Při nasazení v prostředí s vysokým počtem současně připojených IoT uzlů tak u WSGI dochází k rychlému vyčerpání systémových prostředků a nárůstu latence.

Integrita dat a dokumentace

Automatická validace všech příchozích datových struktur je zajišťována knihovnou Pydantic. V energetických aplikacích je pracováno s kritickými fyzikálními veličinami, mezi které patří činný výkon P [W], napětí U [V] nebo stav nabití akumulátoru SoC [%]. Jakékoliv neplatné či anomální datové typy musí být systémem okamžitě detekovány a odmítnuty. Tímto reaktivním mechanismem se účinně předchází chybám a nestabilitám v následných optimalizačních a rozhodovacích algoritmech.

Nespornou výhodou frameworku FastAPI je rovněž automatické generování interaktivní dokumentace podle standardu OpenAPI (Swagger UI). Tímto nástrojem je výrazně zjednodušen proces ladění komunikačních protokolů na straně klientských mikrokontrolérů.

Technické srovnání webových backendových frameworků

V tabulce 2.11 je uvedeno strukturované srovnání klíčových technických parametrů posuzovaných webových frameworků.

Ačkoliv by pro méně rozsáhlé aplikace mohl být starší synchronní framework dostatečným řešením, volba asynchronní architektury FastAPI představuje řešení navržené s ohledem na budoucí rozšiřitelnost systému (scalability). Při potenciálním navýšení počtu monitorovaných odběrných míst o řádové hodnoty nebude architektura limitujícím faktorem celého EnMS.

Tabulka 2.11: Technické srovnání webových backendových frameworků

Parametr	FastAPI	Flask (WSGI)	Django
Propustnost	~ 20 000 req/s	~ 2 000 req/s	~ 3 000 req/s
Asynchronní provoz	Nativní (ASGI)	Omezená (pluginy)	Přidaná (nové verze)
Validace dat	Automatická (Pydantic)	Manuální / externí	Vestavěná (Serializers)
Dokumentace API	Automatická (Swagger)	Vyžaduje externí knih.	Vyžaduje externí knih.
Vhodnost pro IoT	Velmi vysoká	Nízká (vlákna)	Střední (režie)
Křivka učení	Nízká	Velmi nízká	Vysoká

2.5.2 Databázová vrstva a objektově-relační mapování s využitím SQLAlchemy

Ukládání provozních a konfiguračních dat je pro stabilitu systému kritické. Uchovávány musí být zejména uživatelské konfigurace, jmenovité parametry fotovoltaických elektráren (FVE) a výsledky predikčních modelů. Pro tyto účely je nezbytné integrovat robustní a spolehlivou relační databázi.

V rámci architektury byla implementována knihovna `SQLModel`, což je moderní nadstavba integrující vlastnosti ORM (Object-Relational Mapping) knihovny `SQLAlchemy` a validačního nástroje `Pydantic`. Tímto přístupem jsou sjednocena databázová schémata a validační modely do jediné deklarativní třídy v jazyce Python. Tím je eliminována duplicita kódu a minimalizováno riziko vzniku chyb způsobených nekonzistencí mezi API rozhraním a databázovou strukturou.

Sjednocení validace a perzistence

V konvenčních systémech bývají datové struktury definovány redundantně – odděleně jsou vyvíjeny databázové modely a odděleně validační schémata pro API. Pomocí `SQLModel` je umožněna definice jednotné třídy s příznakem `table=True`, která plní obě funkce simultánně.

Pro systémy energetického managementu z toho plynou následující výhody:

- **Jediný zdroj pravdy (Single Source of Truth):** Jakákoliv modifikace v definici datových typů (např. přidání nového telemetrického kanálu ze střídače) se okamžitě propaguje do databázové struktury i do validační logiky API.
- **Zvýšení typové bezpečnosti:** Využití typových anotací umožňuje provádění statické analýzy kódu již ve fázi vývoje. Tím je usnadněna práce se složitými strukturami časových řad.
- **Snížení výpočetní režie:** Je eliminována nutnost explicitní transformace dat mezi objekty databázového driveru a objekty API rozhraní, čímž je zrychlena odezva

serverové části.

Volba databázového enginu

Výběr konkrétního relačního systému závisí na cílovém způsobu nasazení. Pro lokální řídicí jednotky v rámci konceptu Edge Computing, které obsluhují separátní instalaci, je optimální volbou vestavěný embedded engine **SQLite**. Pro centralizované servery agregující data z multiklientských instalací je průmyslovým standardem **PostgreSQL**. Technické srovnání obou systémů je uvedeno v tabulce 2.12.

V aktuální vývojové fázi je využíván systém **SQLite**, který nevyžaduje dedikovanou správu ani konfiguraci síťových služeb. Architektura postavená na knihovně **SQLModel** však plně garantuje transparentní migraci – přechod na robustní systém **PostgreSQL** vyžaduje pouze úpravu konfiguračního řetězce připojení.

Tabulka 2.12: Srovnání databázových systémů pro energetický management

Vlastnost	SQLite	PostgreSQL
Architektura	Souborová (Serverless)	Klient-server
Konfigurace	Nulová (lokální soubor)	Komplexní (řízení přístupu, sítě)
Podpora konkurence	Omezená (uzamykání souboru)	Vysoká (MVCC na úrovni řádků)
Asynchronní provoz	Realizován přes SQLAlchemy	Nativní podpora (asyncpg)
Typické využití	Edge uzly, prototypování	Produkční systémy, velká data

2.5.3 Plánování úloh a automatizace procesů (Job Scheduling)

Garantování správného chodu EnMS vyžaduje exaktní časování periodicky se opakujících úloh. Mezi klíčové procesy je řazeno stahování spotových cen elektřiny z portálu OTE, a.s., k jehož zveřejňování dochází denně po 12. hodině pro následující obchodní den. Dále je prováděno periodické stahování meteorologických predikcí (např. z rozhraní Open-Meteo) za účelem predikce generovaného výkonu FVE. V neposlední řadě musí být v delších časových intervalech spouštěno autonomní přetrénování predikčních modelů na základě nově akumulovaných historických dat.

Pro plánování úloh v prostředí jazyka Python jsou nejčastěji analyticky posuzovány tři frameworky: APScheduler, Celery a RQ.

APScheduler

Knihovna APScheduler (Advanced Python Scheduler) je vhodná pro přímou integraci do asynchronního prostředí frameworku FastAPI. Tento plánovač je spuštěn přímo v rámci procesu webového serveru, což umožňuje transparentní přístup k databázovému spojení přes SQLModel bez nutnosti implementace meziprocesové komunikace (IPC). Pro zamezení blokování hlavního API vlákna je využívána komponenta **AsyncIOScheduler**.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V systému jsou konfigurovány tři typy spouštěčů (triggers):

- **CronTrigger:** Úlohy jsou spouštěny ve fixně stanovený čas. Typickým příkladem je stahování spotových cen z OTE denně ve 13:00.
- **IntervalTrigger:** Úlohy jsou spouštěny s předem definovanou periodicitou, což je využíváno pro vyčítání telemetrie z měniče každých 5 minut.
- **DateTrigger:** Slouží pro jednorázové exekuce v přesně definovaný časový okamžik (např. plánované servisní cykly bateriového úložiště).

Celery a RQ

Prostřednictvím knihovny APScheduler lze efektivně odbavovat pouze netradiční, výpočetně nenáročné úlohy. Výpočetně rigidní procesy (např. trénování hlubokých neuronových sítí) by však mohly způsobit přetížení hlavního procesu a zvýšení latence API. Z tohoto důvodu je nezbytné tyto asynchronní netriviální výpočty delegovat na dedikované procesy.

- **Celery:** Jedná se o robustní distribuovaný systém pro správu front úloh (Task Queue) [solem_celery]. Výpočty jsou delegovány na samostatné pracovní procesy (workery). Architektura vyžaduje externího brokeru zpráv (např. Redis nebo RabbitMQ), avšak poskytuje lineární škálovatelnost.
- **RQ (Redis Queue):** Tento systém představuje odlehčenou alternativu k Celery, která restriktivně využívá jako úložiště front výhradně databázi Redis. Je vhodný pro středně náročné úlohy, přičemž hlavní výhodou je nízká konfigurační režie a vysoká stabilita.

Srovnání plánovacích systémů

Srovnání vlastností jednotlivých systémů pro plánování úloh v EnMS je přehledně shrnuto v tabulce 2.13.

Tabulka 2.13: Technické srovnání systémů pro plánování úloh

Parametr	APScheduler	Celery Beat	RQ (Redis Queue)
Komplexita implementace	Nízká	Vysoká	Střední
Závislosti	Žádné (in-memory)	Redis / RabbitMQ	Redis
Typ úloh	Lehké, periodické	Těžké, distribuované	Středně náročné
Vhodnost pro EnMS	API a stahování dat	Retrainování NN	Asynchronní výpočty

2.5.4 Efektivita komunikačního rozhraní: JSON vs. binární formáty

Zajištění spolehlivé komunikace mezi backendovým serverem a lokálním mechatronickým mikrokontrolérem vyžaduje volbu optimálního přenosového formátu dat. V této části je provedena komparativní analýza textového formátu JSON a binárních alternativ v kontextu minimalizace přenosové režie.

Limity formátu JSON

Formát JSON (JavaScript Object Notation) reprezentuje veškeré datové typy jako textové řetězce (ASCII/UTF-8). Pro mechatronické systémy pracující v reálném čase z toho plynou významná omezení:

- **Datová expanze:** Číselné hodnoty jsou vyjadřovány textově. Například 32-bitová hodnota typu `float` vyjadřující výkon (123.456) zabere v JSON textové podobě 7 bajtů, k čemuž je nutné připočíst režii uvozovek a klíče. V nativní binární reprezentaci přitom tatáž hodnota zabírá rigidně pouze 4 bajty.
- **Redundance metadat:** Každá přenesená zpráva musí opakovaně obsahovat identifikátory klíčů (např. `"power_output": 4500`). Při vysoké frekvenci přenosu telemetrie s desítkami veličin je tímto způsobem neúměrně zatěžována přenosová linka.
- **Výpočetní náročnost parsování:** Na straně mikrokontroléru (MCU) vyžaduje zpracování JSON textu sekvenční procházení řetězců, vyhledávání tokenů a typovou konverzi z ASCII do float/int, což spotřebovává limitovaný procesorový čas MCU.

Binární alternativy

Pro potlačení výše zmíněných limitů a zvýšení propustnosti jsou zvažovány dva koncepty binárního kódování:

- **Modul struct a C-struktury:** Tímto přístupem je definován rigidní binární layout, který přesně koresponduje s uspořádáním struktur v paměti (RAM) mikrokontroléru. Jedná se o nejúspornější možný způsob přenosu, neboť nejsou přenášena žádná metadata, nýbrž pouze surové bajty. Metoda však striktně vyžaduje shodu v zarovnání paměti (padding) a korektní ošetření endianity (byte ordering).
- **MessagePack:** Tento formát funguje jako binární ekvivalent JSONu. Dosahuje o 20 % až 40 % vyšší úspory prostoru oproti čistému textu, přičemž zachovává informaci o datových typech a struktuře. Pro embedded platformy jsou k dispozici optimalizované knihovny s nízkou pamětovou režii.

Srovnání komunikačních formátů

Syntetické porovnání vlastností jednotlivých formátů pro přenos dat mezi serverem a klientským mikrokontrolérem je uvedeno v tabulce 2.14.

Tabulka 2.14: Technické srovnání komunikačních formátů pro přenos dat

Parametr	JSON	MessagePack	C Struct
Čitelnost člověkem	Vysoká	Nízká	Nulová
Režie (Metadata)	Velmi vysoká	Střední	Nulová
Výpočetní náročnost (MCU)	Vysoká	Nízká	Minimální
Typová bezpečnost	Slabá	Dynamická	Vysoká
Vhodnost pro EnMS	Webová vizualizace	Flexibilní API	Telemetrie MCU

Pro komunikaci mezi MCU a serverem byla finálně zvolena varianta přenosu surových C-struktur. Navzdory riziku vzniku chyb při případné změně schématu představuje tato metoda nejefektivnější přenosový mechanismus z hlediska propustnosti a výpočetní zátěže MCU.

2.5.5 Dlouhodobá archivace telemetrie pomocí formátu Parquet

V mechatronických energetických systémech vykazuje objem generovaných dat exponenciální nárůst. Při vzorkovacím intervalu 5 minut vyprodukuje jedno monitorované odběrné místo přibližně 8 640 datových řádků měsíčně pro jeden sledovaný parametr.

Pro účely následného trénování algoritmů strojového učení se klasické relační databáze (SQLite, PostgreSQL) jeví jako nevhodné, neboť jejich řádková orientace (row-oriented storage) dramaticky zpomaluje sekvenční čtení rozsáhlých časových řad přes vybrané sloupce.

Z tohoto důvodu je analyzován otevřený sloupcově orientovaný formát Apache Parquet. Na rozdíl od formátů CSV či standardních SQL tabulek seskupuje Parquet hodnoty stejných sloupců lineárně vedle sebe na diskovém úložišti, což přináší následující benefity:

- **Vysoký kompresní poměr:** Vzhledem k ukládání dat stejného typu v kontinuálních blocích lze efektivně aplikovat pokročilé kompresní algoritmy (Snappy, Gzip, dictionary encoding).
- **Optimalizace I/O operací:** Při načítání historických dat pro trénování neuronové sítě jsou z disku čteny pouze sloupce s relevantními veličinami, čímž je eliminována nutnost parsování celého řádku.
- **Zachování datové integrity:** Formát v sobě nativně integruje self-describing schémata a metadata, čímž je potlačeno riziko chybné interpretace datových typů při přenosu mezi různými analytickými platformami.
- **Efektivní segmentace (Partitioning):** Data lze fyzicky strukturovat do adresářů podle časových epoch (rok/měsíc), což umožňuje provádět selektivní dotazy bez nutnosti skenování celého datového souboru.

Ačkoliv jsou výhody formátu Parquet pro dlouhodobou archivaci prokazatelné, v rámci aktuálního stavu projektu je tento mechanismus uvažován jako volitelný modul pro budoucí rozšíření produkčního systému.

2.5.6 Zabezpečení rozhraní

Zajištění vysoké úrovně kybernetické bezpečnosti komunikačních kanálů je v systémech EnMS kritickou prioritou. Neautorizovaná manipulace s konfiguračními registry střídačů či neoprávněné zásahy do řízení toku výkonu z bateriových úložišť představují závažná rizika, která mohou vyústit v destrukci hardwarových komponent či destabilizaci distribuční soustavy.

Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a serverem byla implementována metoda autentizace využívající statické API klíče přenášené v HTTP hlavičkách (HTTP Headers). Tato metoda vykazuje minimální výpočetní náročnost, čímž představuje optimální alternativu k robustním, avšak pro embedded systémy příliš komplexním protokolům typu OAuth2.

Na straně backendu je využita nativní podpora třídy `APIKeyHeader` frameworku FastAPI. Touto komponentou je automaticky validována přítomnost a správnost klíče v definované hlavičce a zajištěna integrace tohoto bezpečnostního prvku do OpenAPI specifikace.

Z hlediska mikrokontroléru vybaveného ethernetovým či Wi-Fi radičem představuje vložení dodatečného textového pole do HTTP hlavičky operaci s nulovou výpočetní režii. Tímto způsobem je eliminována potřeba implementace asymetrické kryptografie a komplexních knihoven pro parsování tokenů typu JWT (JSON Web Token) na hardwarově omezených platformách.

2.6 Hybridní měnič a komunikační rozhraní

V rámci diplomové práce je hybridní fotovoltaický měnič uvažován nejen jako statické zařízení pro konverzi energie, ale jako komplexní akční člen a datový uzel celého systému. Pro úspěšnou implementaci řídicích algoritmů, mezi něž se řadí prediktivní řízení založené na modelech (MPC), je nezbytné detailní porozumění funkční architektuře těchto zařízení, jejich komunikačním rozhraním a fyzikálním omezením vnitřních komponent. [37]

2.6.1 Definice a rozdělení fotovoltaických měničů

Fotovoltaický měnič (střídač) je definován jako energetické zařízení určené k transformaci stejnosměrného proudu (DC) z fotovoltaických panelů nebo akumulátorů na proud střídavý (AC). Střídavý proud je následně využit pro napájení lokálních spotřebičů nebo pro dodávku do distribuční sítě. V praxi jsou rozlišovány tři základní typy měničů:

- **Síťový měnič (On-Grid):** Tento typ je funkční pouze za předpokladu připojení k aktivní distribuční síti. Energie z panelů je přeměňována a dodávána přímo do domácích rozvodů nebo do sítě. Práce s vlastním bateriovým úložištěm není podporována a při výpadku sítě je zařízení z bezpečnostních důvodů odstaveno.
- **Ostrovní měnič (Off-Grid):** Tento měnič pracuje zcela nezávisle na distribuční síti. Použití je koncipováno pro lokace bez elektrické přípojky. Energie z panelů je ukládána do baterií, ze kterých jsou následně napájeny spotřebiče. Dodávka přebyteků energie zpět do sítě ani dokupování energie ze sítě však není technicky umožněno.

- **Hybridní měnič (Hybrid):** V této architektuře jsou kombinovány vlastnosti síťového a ostrovního měniče. Je podporována současná práce s fotovoltaickými panely, bateriovým úložištěm i distribuční sítí. Energie z panelů může být spotřebovávána, ukládána do baterie nebo dodávána do sítě. V případě potřeby je umožněn také odběr energie ze sítě pro napájení spotřebičů nebo pro nabíjení baterií.

Relevance hybridního měniče pro inteligentní řízení

Pro účely předkládané práce je volba hybridního měniče zcela klíčová. Hlavním cílem je realizace inteligentního nákupu a prodeje elektrické energie na základě aktuálních spotových cen. Aby mohla být tato optimalizace implementována, musí být řídicí systém (MCU) vybaven akčním členem, kterým lze dynamicky měnit směry energetických toků.

Pouze hybridní měnič umožňuje obousměrný tok energie mezi objektem a distribuční soustavou a zároveň poskytuje plnou kontrolu nad akumulací. V době nízkých nebo záporných spotových cen je umožněn nákup levné energie ze sítě a její ukládání do baterie. Naopak v době cenových špiček je spotřeba objektu plně kryta z baterie, případně je akumulovaná energie se ziskem prodávána zpět do sítě. Bez hybridní architektury by algoritmus energetické arbitráže nemohl být realizován.

Tato rešerše je zaměřena především na ekosystém měničů SolaX, které představují průmyslový standard pro pokročilé rezidenční instalace. Pro účely testování je k dispozici reálné zařízení této značky. V textu je analyzována jeho integrace z pohledu mechatronického návrhu hardwaru i softwaru.

Následující rozbor je restriktivně orientován na měnič **SolaX X3 Hybrid G4** s firmwarem **ARM verze 2.03** a **DSP verze 2.07**. Správná funkčnost vyvinutých algoritmů nemůže být pro jiná zařízení nebo odlišné verze firmwaru plně garantována, neboť funkce řídicích registrů se mohou lišit.

2.6.2 Hybridní měnič jako akční člen

Hybridní měnič tvoří v moderní decentralizované energetice inteligentní rozhraní mezi několika energetickými doménami. Propojována je stejnosměrná (DC) větev fotovoltaických panelů a baterie se střídavou (AC) větví lokálních spotřebičů a distribuční soustavy. Z pohledu řídicího mikrokontroléru, který je předmětem návrhu, střídač nefiguruje pouze jako pasivní zdroj dat, nýbrž je na něj nahlíženo jako na klíčový akční člen.

Hlavním úkolem hybridního měniče je zajištění stability napětí a frekvence v lokální síti. Dále je zajišťována optimalizace bodu maximálního výkonu (MPPT) u fotovoltaických polí a správa nabíjecích i vybíjecích cyklů akumulátorů.

Režimy měniče důležité pro inteligentní řízení

V kontextu inteligentního nákupu a prodeje energie jsou měničem realizovány tři základní strategie řízení, které jsou nadřazeným systémem voleny pomocí instrukcí:

- **Režim vlastní spotřeby (Self-Use):** Lokální spotřebiče jsou prioritně napájeny

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

z aktuální výroby fotovoltaické elektrárny (FVE). Přebytky energie jsou ukládány do baterie. Přetoky do sítě jsou generovány až po úplném nabití baterie.

- **Priorita napájení do sítě (Feed-in Priority):** Vyrobená energie je směřována primárně k prodeji do sítě. Tato strategie je pro optimalizační algoritmus výhodná v momentech extrémně vysokých spotových cen.
- **Manuální / Vzdálený režim (Manual):** Tento režim je stěžejní pro účely energetické arbitráže. Mikrokontrolérem je skrze registry měniče vynucován nákup levné energie z distribuční soustavy pro nabití úložiště, zatímco v době cenových špiček je naopak aktivován prodej akumulované energie.

Klíčové parametry pro návrh

Význam sledovaných parametrů pro optimalizační logiku je shrnut v tabulce 2.15.

Tabulka 2.15: Klíčové parametry systému a jejich role v návrhu řídicího systému

Parametr systému	Význam pro návrh	Role měniče v systému
Energetická bilance	Vstupní data pro optimalizaci toků v reálném čase.	Měření výkonu na portech (PV, BAT, AC).
Stav nabití (SoC)	Klíčová stavová proměnná pro rozhodovací algoritmus.	Interpretace dat z BMS akumulátoru.
Dynamika zátěže	Nutnost rychlé reakce na transienční jevy v síti.	Adaptivní regulace výstupního proudu.

2.6.3 Komunikační rozhraní měniče SolaX

Komunikační vrstva tvoří kritický prvek inteligentního energetického managementu. Pro propojení mikrokontroléru s hybridním měničem SolaX byl zvolen protokol Modbus. Tento standard dominuje v oblasti průmyslové automatizace, přičemž mezi jeho hlavní výhody patří otevřenost, deterministické chování a robustní sdílený datový model založený na registrech. Protokol pracuje na principu dotaz-odpověď (Client/Server). [38]

Protokol Modbus je definován ve dvou hlavních variantách, jimiž jsou Modbus TCP a Modbus RTU. Měníče SolaX podporují oba tyto přístupy. Níže jsou obě varianty popsány a jsou vysvětleny jejich klady a zápory z pohledu řízení energetických toků.

Modbus RTU

Modbus RTU (Remote Terminal Unit) využívá sériovou komunikaci, která je u měničů SolaX standardně realizována přes rozhraní RS-485. Tato fyzická vrstva využívá diferenční signalizaci s vodiči A a B, což zajišťuje vysokou odolnost proti elektromagnetickému rušení, jež je vyzařováno výkonovými spínacími prvky měniče.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Integrita dat v rámci binárního kódování je zajištěna pomocí 16bitového kontrolního součtu (CRC-16). Rámec Modbus RTU má pevnou strukturu:

- adresa serveru (1 B)
- funkční kód (1 B)
- datové pole (N B)
- kontrolní součet CRC (2 B)

Specifikem Modbus RTU je striktní časování, které klade vysoké nároky na firmware mikrokontroléru. Jednotlivé rámce musí být odděleny intervalem ticha o minimální délce 3,5 znaku ($T_{3.5}$). Jakékoli přerušení toku dat uvnitř rámce delší než 1,5 znaku ($T_{1.5}$) je klasifikováno jako chyba a má za následek vymazání přijímacího bufferu. Pro architekturu STM32 to vyžaduje přesnou konfiguraci periferie UART v kombinaci s hardwarovými časovači. [39]

Modbus TCP

Modbus TCP zapouzdřuje standardní Modbus rámce do TCP/IP paketů, čímž je umožněn přenos přes síť Ethernet. Na rozdíl od varianty RTU zde aplikační vrstva nevyužívá kontrolní součet CRC; kontrola doručení a integrity je plně v kompetenci transportní vrstvy TCP/IP stacku.

Struktura paketu je rozšířena o hlavičku MBAP (Modbus Application Protocol), která nahrazuje adresu zařízení a CRC identifikátory:

- Transaction Identifier (2 B)
- Protocol Identifier (2 B)
- Length (2 B)
- Unit Identifier (1 B)

Srovnání komunikačních standardů

Z hlediska fyzikálních parametrů se přenos po síti Ethernet jeví jako výhodnější. Pokud je měničem přenášen výkon $P = 5 \text{ kW}$ při napětí $U = 230 \text{ V}$, protéká systémem proud přibližně $I = 21,7 \text{ A}$. Vysoké proudy v měniči generují rušení a teplo podle vztahu pro ztrátový výkon $P = RI^2$. Sběrnice RS-485 i Ethernet musí tomuto rušení odolat. Technické parametry obou standardů jsou porovnány v tabulce 2.16.

Z analýzy parametrů v tabulce 2.16 vyplývá, že možnost využití Modbus TCP je teoreticky vhodnější, neboť varianta TCP vykazuje lepší parametry téměř ve všech bodech. Samotný měnič však rozhraní Modbus TCP nativně neobsahuje a tato komunikace musí být realizována externě pomocí Wi-Fi dongle připojeného k zařízení.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tabulka 2.16: Technické srovnání komunikačních standardů Modbus RTU and Modbus TCP

Vlastnost	Modbus RTU	Modbus TCP
Fyzické médium	RS-485	Ethernet
Detekce chyb	CRC-16	Kontrolní součet TCP/IP
Topologie sítě	Sběrnice	Hvězda (přes switch/router)
Maximální adresace	247 zařízení	Teoreticky neomezeno
Režim přenosu	Half-duplex	Full-duplex
Propustnost	9,6 až 115,2 kbps	10/100/1000 Mbps

Tento mezičlen představuje kritický bod celého řetězce. Při jakémkoli selhání komunikace (např. odeslání dvou dotazů současně nebo neočekávané odpojení klienta) dochází k zablokování přenosu dat. V takovém případě je vyžadován restart měniče, v některých situacích je dokonce nutné Wi-Fi dongle fyzicky odpojit a znovu zasunout, aby byla komunikace obnovena.

Při vývoji se navíc projevil další fenomén: pokud se k jednomu měniči přes Wi-Fi připojí sekundární zařízení, komunikace okamžitě kolabuje. Tento stav nastává i při vyloučení simultánního odesílání dotazů. Tato skutečnost je rozhodující pro volbu komunikační vrstvy; pro spojení mezi MCU a měničem byl proto vybrán stabilnější standard Modbus RTU.

2.6.4 Limitace paměťových struktur EEPROM

V kontextu inteligentního řízení energetických toků je pochopení limitů pamětí EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) zásadní, neboť nevhodná implementace algoritmu může vést k fatálnímu selhání hybridního měniče v řádu jednotek let.

Fyzikální podstata degradace buněk u EEPROM pamětí

EEPROM je paměť využívající technologii plovoucího hradla. Informace je uchovávána ve formě elektrického náboje v izolované vrstvě polykrystalického křemíku. Proces zápisu a mazání probíhá na principu Fowler-Nordheimova tunelování, kdy je pomocí vysokého napětí, generovaného vnitřní nábojovou pumpou, nucen průchod elektronů skrz tenkou dielektrickou vrstvou oxidu siliconu (SiO_2). [40]

Právě tato izolační vrstva podléhá při každém cyklu mikroskopické degradaci. Kumulativní poškození krystalové mřížky oxidu vede ke ztrátě schopnosti izolantu udržet náboj, což má za následek nechtěnou změnu logického stavu buňky. Při dalším poškozování mřížky dochází k fyzickému proražení dielektrika, po kterém se buňka stává trvale neprogramovatelnou.

Technická dokumentace střídačů SolaX uvádí u kritických parametrů, označených sym-

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

bolem hvězdy v registrové mapě, garantovanou životnost 100 000 zápisových cyklů. Pro inženýrský výpočet životnosti je nutné uvažovat s nepříznivými provozními podmínkami.

Analýza rizik při dynamickém řízení

Klíčovým registrem pro konfiguraci střídače je 0x001F (SolarChargerUseMode), jehož zápis je ukládán do EEPROM. Pokud by optimalizační algoritmus pracující v 15minutovém kroku (standard pro spotový trh) měnil pracovní mód měniče při každém výpočtu, dochází k rychlému vyčerpání životnosti paměti podle vztahu:

$$MTTF = \frac{N}{n_{\text{hour}} h_{\text{day}} d_{\text{year}}} = \frac{100\,000}{4 \cdot 24 \cdot 365} \approx 2,85 \text{ roku} \quad (2.12)$$

Z toho vyplývá, že je nutné vyhnout se využívání EEPROM registrů pro cyklické řízení. Jejich modifikace je přípustná pouze pro nízkofrekvenční změny stavu, například v týdenním intervalu.

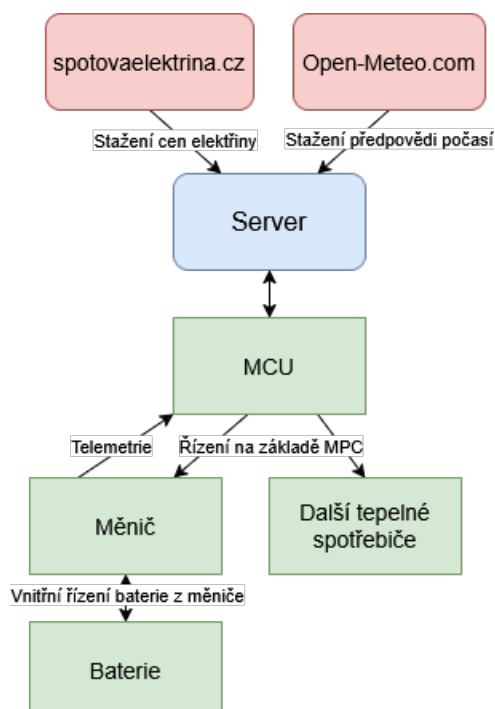
3 Návrh a realizace systému

3.1 Popis a celková architektura systému

Tato kapitola se věnuje celkovému popisu a architektuře navrženého systému pro inteligentní řízení energetických toků v domácnosti. Cílem je seznámit čtenáře s globální strukturou systému, jednotlivými hardwarovými i softwarovými subsystemy a jejich vzájemnými vazbami ještě předtím, než bude detailně popsán samotný vývoj řídicího hardwaru, softwaru a modelu optimalizace.

Navržené řešení reaguje na dynamické změny na energetickém trhu (spotové ceny) a předpověď počasí, přičemž efektivně kombinuje lokální výrobu z fotovoltaické elektrárny (FVE), akumulaci v bateriovém úložišti a případně flexibilitu spotřeby vybraných domácích spotřebičů s cílem minimalizovat celkové náklady na elektrickou energii.

Základní topologie a provázanost jednotlivých bloků je znázorněna na celkovém blokovém schématu (viz Obr. 3.1).



Obr. 3.1: Celkové blokové schéma inteligentního řízení domácnosti

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

3.1.1 Celkový koncept a princip fungování

Základní myšlenka navrženého řešení spočívá v rozdělení výpočetních úloh mezi nadřazený server (který disponuje dostatečným výkonem pro zpracování predikčních modelů) a lokální vestavný systém (mikrokontrolér), který zajišťuje přímé akční zásahy a komunikaci s výkonovými prvky elektroinstalace v reálném čase.

Celý proces optimalizace a řízení probíhá v pravidelných denních a vnitrodenních cyklech, které lze rozdělit do následujících po sobě jdoucích fází:

1. **Sběr externích dat:** Nadřazený server v pravidelných intervalech (zpravidla jednou denně po zveřejnění kurzů organizátorem trhu OTE) stahuje čtvrt hodinové spotové ceny elektrické energie pro následující den. Současně jsou z rozhraní OpenMeteo API stahována meteorologická data o předpovědi počasí (teplota vzduchu, oblačnost a doba slunečního záření) pro danou geografickou lokalitu.
2. **Predikce a optimalizace:** Na základě stažených meteorologických dat a historických provozních profilů objektu provádí server pomocí matematických modelů a neuronových sítí predikci očekávané výroby FVE a predikci spotřeby domácnosti. Následně je spuštěn optimalizační algoritmus (MPC), který vygeneruje optimální strategii řízení toků energií (časové plány nabíjení či vybíjení baterie a spouštění akumulčních spotřebičů) pro nadcházející období.
3. **Distribuce profilů:** Vygenerovaná matice instrukcí a cenových profilů je ze serveru odeslána prostřednictvím ethernetového rozhraní do paměti řídicího mikrokontroléru.
4. **Lokální regulace v reálném čase:** Mikrokontrolér cyklicky vyčítá aktuální stavy ze střídače FVE (okamžitá výroba, stav nabití baterie SoC, přetoky do sítě měřené na jednotlivých fázích) a realizuje naplánovanou strategii. Pokud reálná situace vykazuje významné odchylky od predikovaného modelu (např. náhlá změna počasí či neplánované zapnutí spotřebiče), mikrokontrolér autonomně koriguje řízení tak, aby nedocházelo k nežádoucím penalizacím nebo neefektivnímu nakládání s energií.

Tímto způsobem je dosaženo vysoké robustnosti systému: výpočetně náročné operace jsou delegovány na server, zatímco kritické a časově citlivé řízení technologie zůstává plně v režii autonomního lokálního mikrokontroléru.

3.1.2 Tok dat a komunikační rozhraní

Pro zajištění stability, determinismu a autonomie celého mechatronického systému je klíčové přesné definování struktury, směru a periodicity datových toků mezi jednotlivými vrstvami. Komunikační architekturu lze rozdělit do tří hierarchických úrovní: vnější (cloudová), vnitřní síťová (server–MCU) a lokální technologická (MCU–střídač/spotřebiče).

Přehledová matice jednotlivých datových toků, včetně použitých fyzických rozhraní a protokolů, je uvedena v Tab. 3.1.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Vnější datové toky (Cloud → Server)

Tato úroveň zajišťuje sběr globálních vstupních veličin nezbytných pro prediktivní plánování. Přenos probíhá přes standardní internetové připojení s využitím zabezpečeného protokolu HTTPS a aplikačních rozhraní REST API.

- **Cenový profil (Spotovaelektrina.cz → Server):** Jednou denně (v odpoledních hodinách) dochází ke stažení kompletního vektoru 24 hodinových spotových cen elektrické energie pro následující den ve formátu JSON.
- **Meteorologická data (OpenMeteo → Server):** V pravidelných intervalech (každé 3 hodiny) server dotazuje API pro získání aktualizované hodinové předpovědi teploty, oblačnosti a dobu svitu pro dané zeměpisné souřadnice objektu.

Řídicí datový tok (Server ↔ MCU)

Tento tok představuje most mezi strategickým plánováním a real-time exekucí. Vzhledem k tomu, že výpočetní server je v navržené architektuře umístěn vzdáleně (cloud), probíhá komunikace primárně přes síť Internet. Fyzické připojení na straně řídicího mikrokontroléru (MCU) je realizováno pomocí ethernetového rozhraní (100Base-TX). Pro tento účel je integrován hardwarový TCP/IP kontrolér W5500, který propojuje hlavní procesor STM32 (přes sběrnici SPI) s lokálním směrovačem (routerem) domácnosti.

- **Směr Server → MCU (Řídicí matice):** Po každém přepočtu optimalizačního algoritmu odešle server do MCU vektor instrukcí. Tento vektor obsahuje časový plán provozních režimů baterie (nabíjet/vybíjet/blokovat) a binární stavy pro spínání flexibilních spotřebičů na následující období.
- **Směr MCU → Server (Telemetrie):** Mikrokontrolér v krátkých intervalech (v řádu minut) odesílá na server zpětnou vazbu o aktuálním stavu systému (aktuální SoC baterie, okamžitá spotřeba domu, teplota v akumulacním zásobníku a chybové stavy). Tato data slouží na serveru pro logování a jako výchozí stav pro další běh prediktivního řízení (MPC).

Lokální technologický tok (MCU ↔ Střídač a spotřebiče)

Na nejnižší vrstvě probíhá kritické řízení výkonových prvků, které vyžaduje vysokou frekvenci vyčítání a minimální latenci.

- **Komunikace se střídačem FVE:** Probíhá přes diferenciální sériovou sběrnici RS485 s využitím průmyslového protokolu Modbus RTU. MCU zde vystupuje v roli *Master* a v periodě cca 5 s vyčítá ze střídače (*Slave*) provozní registry (výkon FVE, proudy na jednotlivých fázích z funkce smart metru, napětí baterie). V případě potřeby pak zápisem do příslušných holding registrů mění pracovní módy střídače (např. nucené nabíjení z distribuční sítě v době záporných spotových cen).

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

- **Řízení spotřebičů:** Představuje jednosměrný tok akčních zásahů z digitálních výstupů (GPIO) mikrokontroléru. Přes oddělovací členy a výkonová relé/stykače (případně pomocí PWM signálu pro modulaci výkonu) dochází k přímému zapínání a vypínání spotřebičů s tepelnou akumulací (bojler, tepelné čerpadlo).

Tabulka 3.1: Matice komunikačních rozhraní a přenášených dat v systému

Zdroj → Cíl	Fyzická vrstva	Obsah dat	Perioda
OTE → Server	Internet (WAN)	Hodinové spotové ceny	1× denně
OpenMeteo → Server	Internet (WAN)	Předpověď počasí	3 hodiny
Server → MCU	Internet → Ethernet (LAN)	Řídicí plány a profily	1 hodina
MCU → Server	Ethernet (LAN) → Internet	Telemetrie a stavy systému	5 minut
MCU ↔ Střídač	RS485	Výkonové toky, SoC, módy	5 sekund
MCU → Spotřebiče	GPIO / Relé	Povel ZAP / VYP	Dle potřeby

3.2 Hardwarový návrh řídicí jednotky

Tato kapitola se detailně věnuje fyzické realizaci hardwarové části systému, tedy návrhu a výrobě vlastní desky plošných spojů (DPS). Aby bylo možné naplnit hlavní cíle této diplomové práce, bylo nezbytné vyvinout spolehlivou řídicí jednotku přizpůsobenou na míru požadavkům zadání.

Vyrobená DPS je zobrazena na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Vyrobená deska plošných spojů

3.2.1 Specifikace periférií a blokové schéma systému

Hlavním úkolem navrhovaného hardwaru je propojení výpočetní serverové části s měničem a spotřebiči v domácnosti. Deska musí splňovat několik technických požadavků.

Výpočetní jádro

Mikrokontrolér (MCU) je srdcem řízení energetických toků v domácnosti. Musí komunikovat se serverovou částí a předávat optimalizační pokyny přes periferie desky do měniče a dalších spotřebičů. Dále by měl být schopen přijímat informace z vnějšího prostředí, jako je například signál o nízkém tarifu (HDO).

Připojení k serveru

Pro komunikaci se serverem je nezbytné připojení k internetu. K tomu lze využít buď Wi-Fi, nebo kabelové připojení přes Ethernet. První možnost je sice pro uživatele jednodušší, ale její hardwarový a softwarový návrh je složitější. Ethernetové připojení je navíc stabilnější, což je pro robustnost celého systému klíčové.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Spojení mezi MCU a ethernetovou vrstvou zajišťuje řadič W5500. Ten obsahuje hardwarově implementovaný TCP/IP stack. To zásadně odlehčuje hlavnímu mikrokontroléru, který tak nemusí zpracovávat komplexní síťové protokoly a může se plně věnovat samotnému řízení a optimalizaci.

Při připojení přes Ethernet lze navíc využít napájení pomocí PoE (Power over Ethernet), což výrazně usnadňuje instalaci.

Komunikace s měničem

Pro komunikaci s měničem existují dva přístupy. Prvním je využití protokolu Modbus RTU po sběrnici RS-485, druhým je Modbus TCP přes lokální síť. Druhá možnost je však hůře předvídatelná a méně stabilní (viz kapitola 2.6.3).

Pro propojení měniče s MCU je nutný převodník z UART na RS-485. Vzhledem k tomu, že střídač pracuje s vysokými proudy a napětím, je kriticky důležité zamezit přenosu rušení z měniče přímo na řídicí desku. Z toho důvodu je nezbytné galvanicky oddělit část s RS-485 od zbytku obvodů.

Napájecí kaskáda

Jak již bylo zmíněno, deska využívá napájení přes PoE. Pro případy, kdy uživatel nemá k dispozici switch s PoE zdrojem, je na DPS osazen i konektor pro standardní napájecí adaptér. Obvod proto obsahuje PoE řadič, který automaticky rozpozná, zda je deska napájena z adaptéru, nebo přes Ethernet.

Jmenovité napětí PoE je 48 V, pro většinu komponent je však nutné jej snížit na úroveň 3,3 V. Pro řízení pomocí PWM a spínání tranzistorů se navíc využívá napětí 12 V. Z tohoto důvodu obsahuje napájecí kaskáda dva samostatné snižovací měniče napětí (step-down).

Aktualizace firmwaru

Aby bylo možné snadno aktualizovat firmware na již nainstalovaném zařízení, je DPS vybavena konektorem USB-C.

Ovládání dalších spotřebičů

Pro plynulou regulaci výkonu (například při přeměrování přebytků z FVE do bojleru na ohřev teplé užitkové vody) se využívají výkonové MOSFETy řízené pulzně-šířkovou modulací (PWM). Toto zapojení umožňuje spínat externí polovodičová relé (SSR) a spojit tak modulovat výkon topných těles. Regulace přesně odpovídá aktuálním přebytkům energie, čímž se předchází nechtěnému nákupu elektřiny ze sítě.

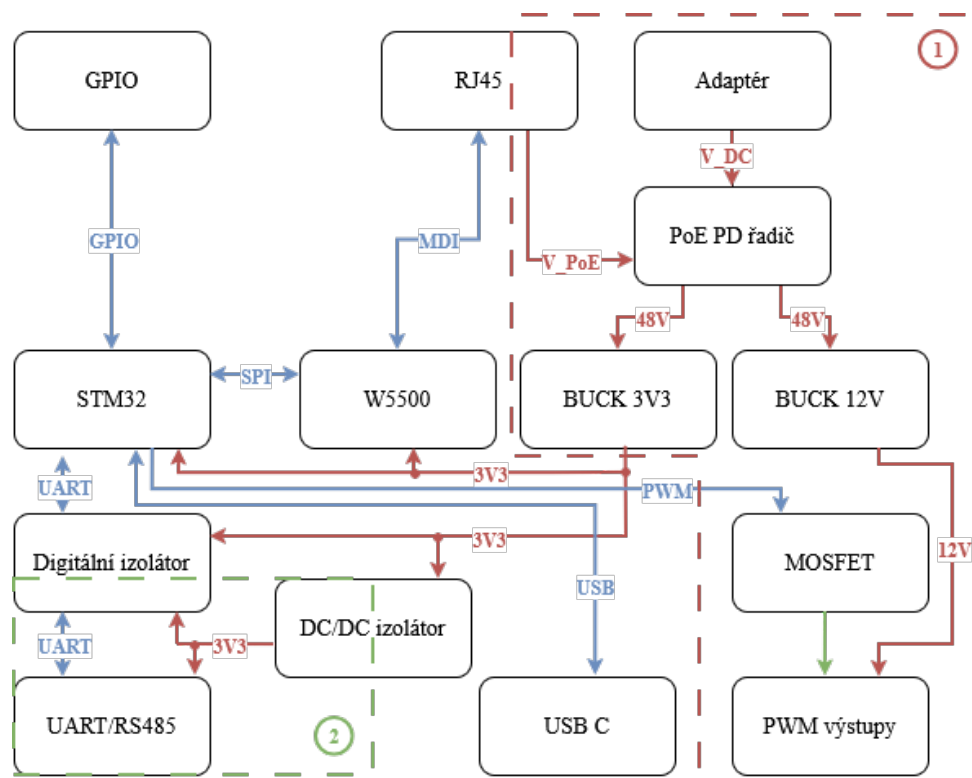
Pro jednoduché dvoustavové řízení (zapnuto/vypnuto) spotřebičů, jako jsou tepelná čerpadla, klimatizace nebo bazénové filtrace, jsou na desce vyvedeny univerzální digitální piny (GPIO).

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Blokové schéma DPS

Obrázek 3.3 znázorňuje základní blokové schéma desky plošných spojů, ze kterého se vychází při výběru komponent a návrhu samotné desky. Jednotlivé funkční bloky jsou detailně popsány v předchozím textu.

Ve schématu jsou barevně zvýrazněny dvě specifické sekce. Červené ohraničení (část 1) vymezuje výkonovou část desky. Zelené ohraničení (část 2) označuje galvanické oddělení fyzické vrstvy sběrnice RS-485 od zbytku obvodů řídicí jednotky.



Obr. 3.3: Základní blokové schéma navržené desky plošných spojů s vyznačením výkonové a komunikační části

3.2.2 Výběr komponent

Tato podkapitola detailně popisuje a zdůvodňuje výběr klíčových elektronických součástí pro realizaci navrženého hardwarového řešení. Výběr jednotlivých prvků zohledňuje požadavky na výpočetní výkon a spolehlivost komunikace.

Mikrokontrolér a ethernetový řadič

Jako hlavní výpočetní jednotka byl zvolen mikrokontrolér STM32F411RET6TR. Důvodem pro výběr tohoto čipu je přítomnost jádra ARM Cortex-M4, které disponuje hardwarovou podporou pro výpočty v plovoucí řádové čárce (FPU) a instrukcemi pro digitální zpracování signálu (DSP). Tyto vlastnosti jsou klíčové pro plynulý běh optimalizačních algoritmů a prediktivních modelů v reálném čase. Kapacita 512 kB paměti Flash poskytuje

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

dostatečnou rezervu pro uložení komplexního řídicího firmwaru.

Pro zajištění síťové konektivity a komunikace s nadřazeným serverem byl vybrán integrovaný ethernetový řadič W5500. Tento čip v sobě integruje hardwarový TCP/IP stack, MAC vrstvu i fyzickou vrstvu (PHY). Hardwarová implementace síťových protokolů zásadním způsobem odlehčuje hlavnímu mikrokontroléru, který tak nemusí ztrácet strojové cykly obsluhou síťového provozu a může se plně věnovat samotným řídicím úlohám.

Konektor pro Ethernet a napájení (PoE)

Fyzické připojení k lokální síti zajišťuje modulární konektor ARJM11C7-104-AB-EW2. Jedná se o standardní RJ45 port určený pro síť 10/100BASE-T, který v sobě obsahuje integrované magnetiky pro filtraci signálu a izolaci.

Pro zjednodušení instalace řídicí jednotky do domovního rozvaděče byla implementována technologie Power over Ethernet (PoE). Pro tento účel je na desce plošných spojů (DPS) osazen integrovaný obvod TPS2378DDA, který slouží jako rozhraní pro napájené zařízení (Powered Device – PD). Tento obvod zajišťuje korektní vyjednání dodávky energie se síťovým přepínačem a umožňuje automatické přepínání mezi napájením z ethernetového kabelu a externím napájecím adaptérem.

Snižovací měnič

Pro efektivní transformaci vyššího vstupního napětí z PoE linky (jmenovitě 48 V) na napěťové úrovni vhodné pro logické obvody a výkonové periferie obsahuje napájecí kaskáda dva samostatné snižovací (buck) měniče. Pro generování napětí 3,3 V pro digitální část desky a 12 V pro budič obvody byl zvolen integrovaný regulátor LMR51610XFDBVR. Tento měnič pracuje se spínací frekvencí 1,1 MHz a je schopen doručit proud až 1 A. Součástka byla zvolena pro svou vysokou účinnost a integrované ochranné funkce, které minimalizují tepelné ztráty a zvyšují spolehlivost napájení.

Rozhraní RS-485 a galvanické oddělení

Pro stabilní vyčítání dat a přenos řídicích povelů do střídače SolaX je využita diferenciální sběrnice RS-485 využívající protokol Modbus RTU. Jako budič této sběrnice byl zvolen transceiver THVD1400DR, který převádí logické signály mikrokontroléru na úroveň linky RS-485.

Vzhledem k tomu, že střídač pracuje s vysokými výkony a hrozí zde riziko vzniku zemních smyček nebo indukovaného přepětí, je signálová cesta sběrnice RS-485 striktně galvanicky oddělena od zbytku obvodů. K bezpečnému přenosu digitálního signálu přes izolační bariéru slouží oddělovač ISO6521DR. Izolované napájení pro tuto oddělenou komunikační část obstarává miniaturní DC/DC měnič CME0303S3C, který poskytuje stabilní výstupní napětí 3,3 V při výkonu 0,75 W. Pro ochranu linky před přechodovými jevy je rozhraní doplněno o obousměrný transil CDSOT23-SM712.

Výkonové spínání (MOSFETy)

Pro přímé spínání externích akčních členů (např. výkonových polovodičových relé SSR pro plynulou modulaci výkonu topných těles) jsou na desce vyvedeny tranzistory MOSFET typu DMN62D0U-7. Tyto N-kanálové tranzistory v kompaktním pouzdře SOT-23 disponují vhodnými parametry pro budicí úroveň. Výstupy jsou navíc chráněny proti napětovým špičkám při spínání induktivních zátěží.

Souhrnný přehled všech vybraných elektronických součástek, které definují finální topologii řídicího systému, je uveden v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: Souhrn vybraných klíčových hardwarových součástek pro řídicí jednotku

Funkční blok	Zvolená součástka	Klíčový parametr
Mikrokontrolér (MCU)	STM32F411RET6TR	ARM Cortex-M4, FPU, 512 kB Flash
Ethernetový radič	W5500	Hardwarový TCP/IP stack, PHY
Konektor RJ45	ARJM11D7-114-AB-EW2	10/100BASE-T, integrované magnetiky
Řadič PoE	TPS2378DDA	High-Power PD interface pro LAN napájení
Snižovací měnič (Buck)	LMR51610YDBVR	frekvence 1,1 MHz, 1 A
Budič RS-485	THVD1429DT	Převod logických úrovní
Digitální izolátor	ISO6731DWR	Tříkanálové galvanické oddělení (2/1)
Izolovaný DC/DC měnič	CME0303S3C	Výstup 3,3 V, 0,75 W
Spínací tranzistor	MMBT7002K	N-kanál MOSFET, 60 V, 0,3 A

3.2.3 Systém napájení

Spolehlivý napájecí systém je kritickým předpokladem pro stabilní chod řídicí jednotky. Návrh klade důraz na flexibilitu napájení, odolnost proti rušení a efektivní odvod tepla.

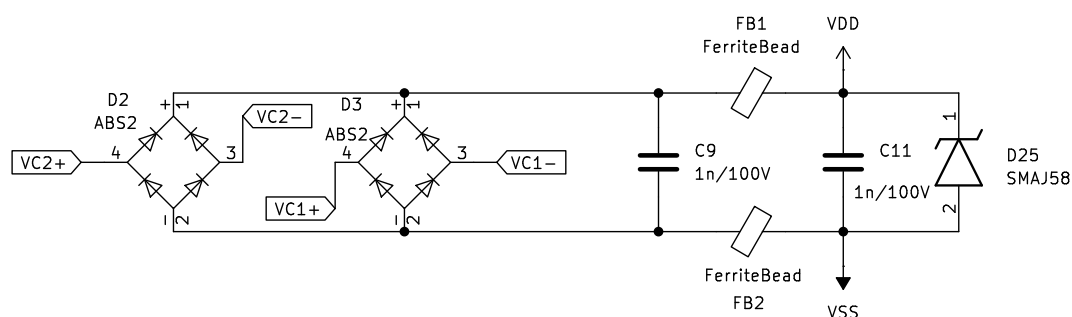
Pro zjednodušení instalace v rozvaděči byla implementována podpora standardu Power over Ethernet (PoE). Tato technologie umožňuje přenášet datový signál i elektrickou energii po jediném ethernetovém kabelu, což šetří místo a snižuje nároky na externí napájecí komponenty.

Zapojení PoE

Fyzické rozhraní tvoří modulární konektor RJ45 řady ARJM11, který obsahuje integrované oddělovací transformátory (tzv. magnetiky). Tyto prvky jsou navrženy pro standardy PoE (IEEE 802.3af/at/bt) a zajišťují galvanické oddělení datové linky. Stejnoseměrné napětí, injektované jako součtové napětí na kroucené páry, je odebráno ze středových odboček transformátorů.

Pro potlačení vysokofrekvenčního rušení a přizpůsobení impedance nevyužitých párů je použita tzv. Bob Smith terminace. Ta spočívá v připojení odboček transformátorů přes rezistory (typicky $75\ \Omega$) a společný kondenzátor na zem. Toto zapojení je klíčové pro snížení elektromagnetického rušení (EMI) a zlepšení elektromagnetické kompatibility zařízení.

Standardy PoE připouštějí různou polaritu napětí v závislosti na injektoru (MDI vs. MDI-X). Z tohoto důvodu je napětí vedeno na diodové můstky, které zajistí správnou orientaci napájení pro PD řadič bez ohledu na polaritu na vstupu. Za můstky následuje LC filtr s feritovými perličkami, který vyhlazuje napájecí napětí a absorbuje vysokofrekvenční šum. Pro ochranu před přepětím a elektrostatickým výbojem (ESD) je sběrnice doplněna TVS diodou. Zapojení je znázorněno na schématu 3.4.



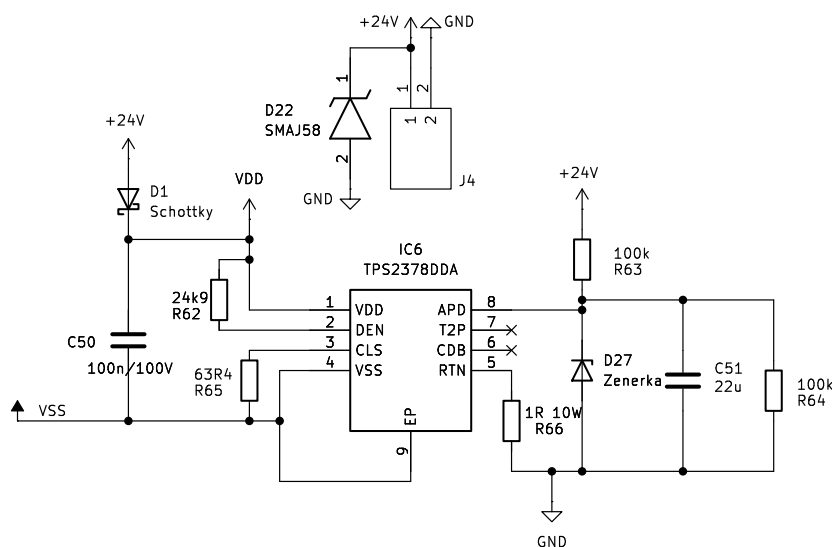
Obr. 3.4: Schéma zapojení napájecí části s PoE

Řadič Powered Device (PD)

Aktivní PoE napáječ vyžaduje pro zahájení dodávky energie identifikaci zařízení (detekci impedance $25\ k\Omega$). Tuto funkci zajišťuje řadič TPS2378DDA. Po úspěšné detekci řadič propojí zem PoE se zemí DPS. Vzhledem k využití keramických kondenzátorů na výstupu, které mají strmý náběh proudu, je v obvodu zařazen sériový odpor $1\ \Omega$ pro omezení proudových špiček.

Řadič rovněž automaticky řeší prioritu mezi PoE a externím napájecím adaptérem. Pokud je na pinu APD detekováno napětí (v rozsahu $1,5\text{--}5\text{ V}$), PoE se odpojí a systém přejde na napájení z adaptéru. Pro ochranu vstupu externího zdroje před přepólováním a napěťovými špičkami je použita Schottkyho dioda (D1) a TVS dioda (D22). Zapojení řadiče je ukázáno na schématu 3.5.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU



Obr. 3.5: Zapojení řadiče PD

Snižovací měniče pro 12 V a 3,3 V

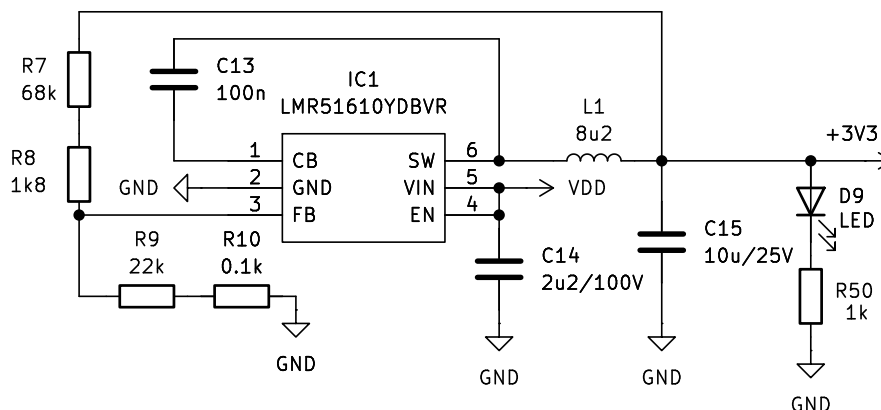
Většina komponent na desce vyžaduje napájení 3,3 V. S ohledem na velký napěťový rozdíl ze vstupu (až 48 V) jsou využity aktivní spínané snižovací (buck) měniče LMR51610YDBVR. Tyto měniče pracují se spínací frekvencí 1,1 MHz a nabízejí vysokou účinnost, čímž minimalizují tepelné ztráty. Jejich zapojení je znázorněno na schématu 3.6

Výstupní napětí je laděno pomocí odporového děliče. Pro PWM výstupy sloužící k ovládání externích relé je na desce vytvořena samostatná větev 12 V pomocí měniče stejného typu. Hodnoty pasivních prvků jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: Parametry pasivních prvků pro měniče

Součástka	Hodnota pro 3,3 V	Hodnota pro 12 V
Vstupní kapacita	2,2 μF	2,2 μF
Výstupní kapacita	10 μF	22 + 10 μF
Výstupní induktor	8,2 μH	22 μH
Horní rezistor děliče	69,8 k Ω	22,1 k Ω
Spodní rezistor děliče	309 k Ω	22,1 k Ω

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU



Obr. 3.6: Schéma zapojení snižovacího měniče

3.2.4 Zapojení dalších komponent

Tato část popisuje návrh a zapojení klíčových komponent na desce plošných spojů (DPS).

Zapojení mikrokontroléru (MCU)

Hlavní výpočetní jednotkou systému je mikrokontrolér STM32F411RET6TR. Pro zajištění přesné časové základny je k MCU připojen externí krystal s frekvencí 25 MHz a zatěžovací kapacitou 10 pF. Pro správnou funkci oscilátoru byla zvolena hodnota externích kondenzátorů vypočtená dle vztahu:

$$C_{\text{Load}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_{\text{stray}} \quad (3.1)$$

$$C_1 = C_2$$

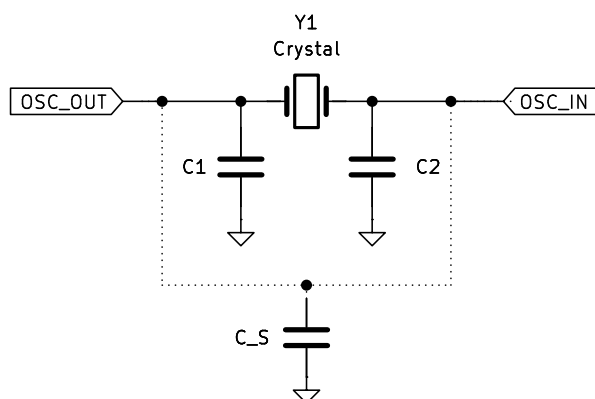
$$C_{1,2} = 2(C_{\text{Load}} - C_{\text{stray}})$$

Kde:

- C_{Load} je zatěžovací kapacita krystalu (dle datasheetu výrobce).
- C_{stray} je parazitní kapacita cest mezi MCU a krystalem (odhadnuta na 3 pF).
- C_1, C_2 jsou kapacity externích kondenzátorů.

Při dosazení hodnot $C_{\text{Load}} = 10$ pF a $C_{\text{stray}} = 3$ pF vychází teoretická hodnota 14 pF. Vzhledem k dostupnosti v řadě E12 byly zvoleny kondenzátory s kapacitou 15 pF. Schéma zapojení oscilátoru je zobrazeno na obrázku 3.7.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU



Obr. 3.7: Zapojení externího krystalu MCU

K MCU je dále připojeno tlačítko pro reset a tlačítko pro aktivaci režimu bootloa-deru. Pro zajištění stability signálu jsou doplněna pull-up, respektive pull-down rezistory o hodnotě $10\text{ k}\Omega$ a filtračními kondenzátory 100 nF .

Pro programování a ladění je na desce vyveden 20pinový konektor standardu ST-Link V2, obsahující debugovací piny, reset, napájení $3,3\text{ V}$ a zem. PWM výstupy pro řízení externích zátěží jsou vyvedeny na piny PB6, PB7 a PB8. Komunikace s měničem probíhá přes UART (piny PA9, PA10), přičemž směr dat na lince RS485 určuje pin PA8. USB rozhraní je připojeno na piny PA11 a PA12.

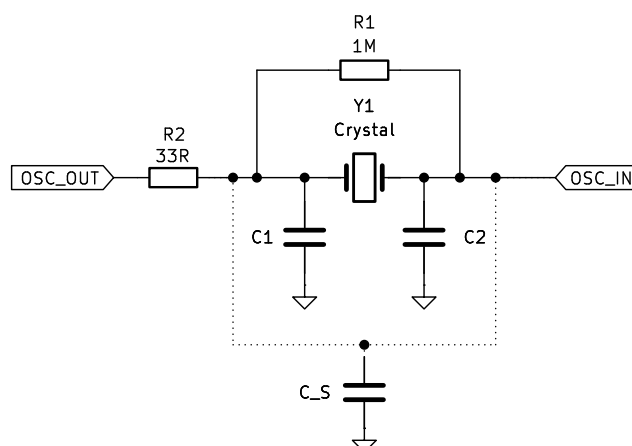
Ethernetový řadič W5500 komunikuje s MCU přes rozhraní SPI (piny PA5, PA6, PA7). Další GPIO piny (PB0, PB1, PB2, PC4, PC5, PA2) jsou využity pro nastavení řadiče a signály přerušení (nRESET, nSCS, nINT). Čtveřice GPIO pinů (PB3, PB4, PB5, PD2) je vyvedena na výstupní konektor pro potřeby spínání externích zařízení (suché kontakty). Indikaci stavů zajišťují LED diody připojené k pinům PC10–PC12 a PA15, pro testování PWM jsou vyhrazeny piny PC6–PC8. Napájecí cesty jsou odrušeny feritovými perličkami a blokovacími kondenzátory 100 nF a $4,7\text{ }\mu\text{F}$.

Zapojení W5500

Ethernetový řadič W5500 je připojen ke konektoru RJ45 s integrovanými magnetiky. Impedanční přizpůsobení linek zajišťují rezistory $49,9\text{ }\Omega$ a kondenzátory $6,8\text{ nF}$ v přijímací cestě. Pro ochranu před odrazy signálu jsou do všech komunikačních linek zařazeny sériové rezistory $33\text{ }\Omega$.

Pro taktování řadiče je použit 25 MHz krystal se zatěžovací kapacitou 18 pF . Výpočet externích kondenzátorů ($C_{1,2} = 30\text{ pF}$) a volba sériového rezistoru $R_2 = 33\text{ }\Omega$ (stanoveno empiricky pro správný rozběh oscilací) zajišťuje stabilitu komunikace. Obvod doplňuje paralelní rezistor $R_1 = 1\text{ M}\Omega$ pro podporu oscilátoru, viz schéma 3.8.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU



Obr. 3.8: Zapojení oscilátoru pro W5500

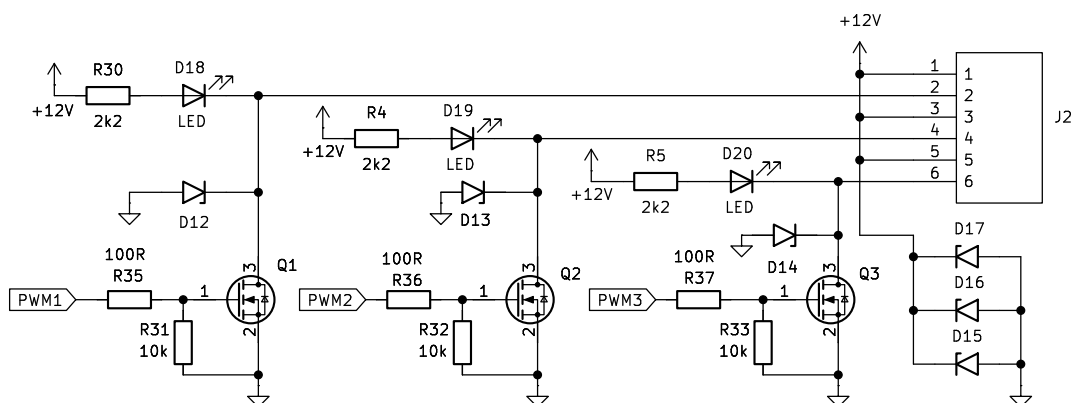
Zapojení RS485

Komunikace s měničem probíhá přes sběrnici RS-485, která je galvanicky oddělena od zbytku DPS, aby nedošlo k poškození citlivé elektroniky indukovaným napětím či zemními smyčkami. Pro oddělení jsou použity digitální izolátory ISO6731 a izolovaný DC/DC měnič CME0303S3C.

Provoz sběrnice zajišťuje transceiver THVD1429DT, který obsahuje integrovanou TVS diodu pro ochranu proti přepětí. Řízení směru dat (příjem/vysílání) obstarává mikrokontrolér přes pin PA8. Pro zakončení sběrnice je připraven 4pinový konektor, který umožňuje snadné připojení terminačního rezistoru 120 Ω .

Zapojení PWM výstupů

PWM výstupy pro řízení externích relé (SSR) jsou napájeny z větve 12V. Každý výstup je spínán N-kanálovým MOSFETem MMBT7002K, který je chráněn TVS diodou proti napětovým špičkám. Stavy výstupů jsou indikovány LED diodami. Zapojení je znázorněno na schématu 3.9.



Obr. 3.9: Schéma zapojení PWM výstupů

3.2.5 Topologie a konstrukce DPS

Při návrhu fyzického uspořádání DPS byl brán zřetel na omezení rozměrů desky. Cílem je systém montovatelný do standardního rozvaděče na DIN lištu. Dalším limitujícím faktorem byla cena výroby, která je u rozměrů do 100×100 mm výrazně nižší. Celková velikost DPS byla tedy stanovena na 100×90 mm.

Jedním ze základních konstrukčních kritérií bylo umístění všech vstupních a výstupních konektorů pouze na horní a spodní hranu desky, což umožňuje snadnou kabeláž při instalaci v rozvaděči.

Pro návrh byla zvolena čtyřvrstvá topologie. Dvě vrstvy jsou určeny pro signálové cesty, jedna vrstva slouží výhradně jako zemnicí (GND) rovina a jedna vrstva je vyhrazena pro napájecí větev.

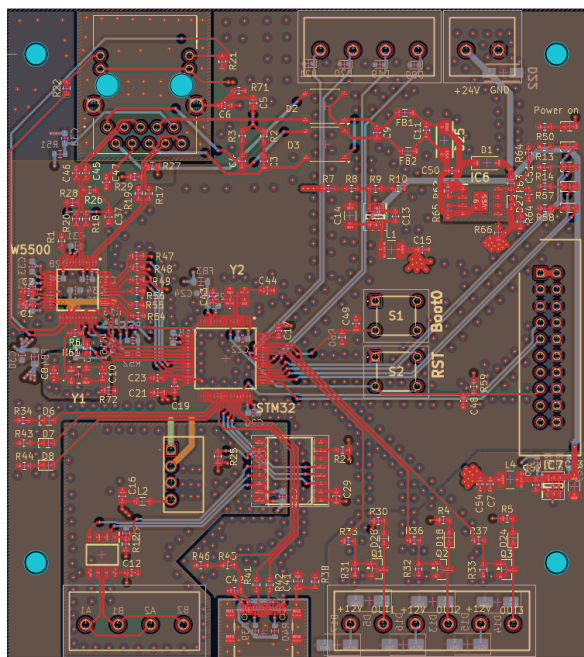
Do středu DPS byl umístěn mikrokontrolér STM32, který tvoří mozek systému, což umožňuje optimalizaci délky cest do všech směrů. V horní části jsou osazeny konektor RJ45, GPIO piny a konektor externího napájecího adaptéru. Spodní část desky obsahuje rozhraní RS485, konektor USB-C a PWM výstupy pro SSR relé. Vývojový 20pinový konektor a indikační LED diody jsou umístěny na pravém okraji DPS, kde nebudou při běžném provozu překážet.

Konektory USB-C a RJ45 jsou od zbytku desky galvanicky odděleny. Stínění (shield) konektorů je připojeno k zemi DPS přes kombinaci rezistorů ($1\text{ M}\Omega$) a kondenzátorů. Sekce RS485 je zcela izolována, a to jak v signálové, tak v napájecí vrstvě, čímž je zamezeno vzniku zemních smyček. Analogové napájení ethernetového řadiče W5500 je řešeno pomocí dedikovaného napájecího polygonu. V oblastech s PWM výstupy je pak vyčleněn samostatný polygon pro 12 V.

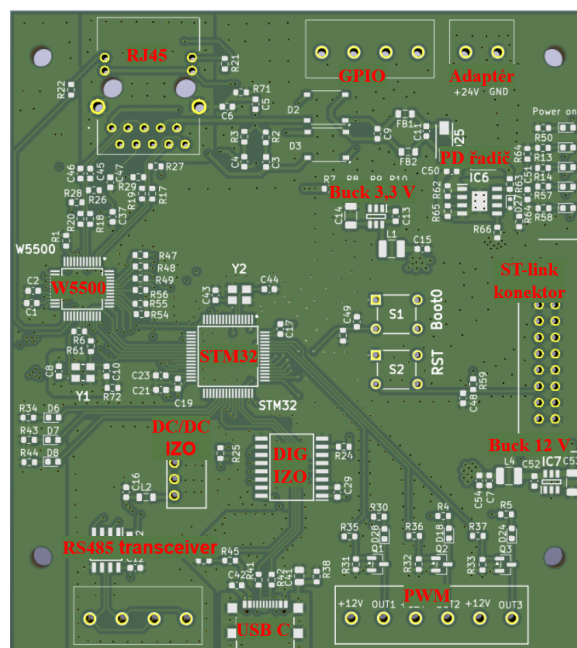
Všechny ochranné TVS diody jsou osazeny v těsné blízkosti konektorů, aby se minimalizovala indukčnost cesty a maximalizovala účinnost ochrany proti ESD a přepětí.

Navržený design DPS je znázorněn na obrázku 3.10.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU



(a) Návrh v CAD



(b) Fyzická vizualizace návrhu

Obr. 3.10: Návrh desky plošných spojů

3.2.6 Možnosti dalšího rozvoje systému

I přes úspěšnou implementaci a ověření funkčnosti prototypu bylo v průběhu testování identifikováno několik oblastí, které by v budoucích verzích hardwaru umožnily širší uplatnění řídicí jednotky a zvýšily její univerzálnost v rámci systémů chytré domácnosti.

Implementace druhého nezávislého kanálu RS-485

Aktuální verze využívá jednu sběrnici primárně pro komunikaci s fotovoltaickým střídačem. V komplexnějších instalacích, kde je vyžadováno současné řízení tepelného čerpadla nebo klimatizačních jednotek, se ukazuje sdílení jedné sběrnice jako limitující. Hlavním důvodem je odlišná komunikační rychlost (baudrate) jednotlivých zařízení – každé zařízení může vyžadovat komunikaci na odlišné rychlosti. Přidání druhého, galvanicky izolovaného kanálu by umožnilo logické i fyzické oddělení těchto technologií, zvýšilo by celkovou propustnost dat a eliminovalo by riziko kolizí na sběrnici.

Rozšíření počtu PWM výstupů

Současná verze disponuje omezeným počtem kanálů pro pulzně-šířkovou modulaci. Navýšení počtu těchto výstupů by umožnilo sofistikovanější řízení přebytků elektrické energie. Kromě plynulé regulace výkonu topného tělesa v bojleru by bylo možné paralelně řídit další odporové zátěže, čímž by se dále zvýšila míra vlastní spotřeby energie z fotovoltaiky.

Integrované rozhraní 1-Wire

Pro účely komplexního energetického managementu je výhodné sledovat teplotu v klíčových bodech systému, jako je technická místnost, okolí bateriového úložiště nebo teplota v akumulární nádrži (bojleru). Implementace dedikované svorkovnice pro sběrnici 1-Wire by umožnila snadné připojení digitálních teplotních čidel (typicky DS18B20). Výhodou tohoto řešení je možnost připojit více čidel na jeden pin mikrokontroléru při zachování vysoké odolnosti proti rušení na delší vzdálenosti, což je v prostředí domovních rozvaděčů žádoucí.

Zvýšení počtu univerzálních GPIO

Doplnění dalších digitálních vstupů a výstupů (případně přes I²C expandér) by umožnilo připojení pomocných signálů, jako jsou hlášení o poruchách, nebo připojení uživatelských tlačítek přímo na panel rozvaděče. To by uživateli umožnilo manuální přepínání provozních režimů, například vynucené nabíjení baterie před očekávaným výpadkem sítě nebo aktivaci režimu dovolené.

3.3 Modelování výroby fotovoltaické elektrárny

Pro efektivní řízení energetických toků domácnosti na základě spotových cen je při užití optimalizačního algoritmu MPC nutné modelovat kromě vnitřního chování systému také exogenní vstupy. Těmi jsou především výroba domácí fotovoltaické elektrárny a spotřeba domácnosti.

V případě predikce výroby je předpověď možná s vysokou úspěšností, protože výroba FVE je determinována fyzikálními principy a aktuálním počasím.

Cílem této kapitoly je návrh a implementace modelu založeného na umělých neuronových sítích, který dokáže s vysokou přesností odhadovat výkon FVE na základě předpovědi počasí a geometrické polohy Slunce vůči solárním panelům.

V následujících podkapitolách je podrobně popsán proces od získání a čištění dat z měničů Solax, přes výpočet fyzikálních parametrů, až po návrh architektury neuronové sítě využívající metodu *transfer learningu* (dotrénování). Tato metoda umožňuje využít robustní obecný model natrénovaný na rozsáhlém datasetu a následně jej adaptovat na unikátní podmínky konkrétního uživatele, čímž se minimalizují chyby v odhadu budoucích zisků energie.

3.3.1 Metodika sběru a přípravy dat pro predikční model

Pro úspěšný predikční model postavený na principu strojového učení je kritické získání kvalitních dat. Pro trénink jsou nezbytné jak vstupní, tak výstupní hodnoty. Výstupem neuronové sítě je v tomto případě výkon FVE. Volba vstupních parametrů je zásadní – cílem je zvolit takové proměnné, které zachycují fyzikální závislosti systému, ale zároveň vykazují co nejvyšší vzájemnou korelaci.

Zdroj dat výstupu NN

Jako zdroj dat o výkonu FVE byl zvolen Solax cloud. Data byla získána od sedmi vlastníků fotovoltaických elektráren, přičemž tři z nich mají panely rozdělené na dvě světové strany.

Možnost zpětného stažení historických dat ze Solax cloudu je omezena na jeden rok, což limituje množství dostupných tréninkových vzorků. Další komplikací je fakt, že data z měniče jsou logována v pětiminutových intervalech, přičemž se jedná o okamžitý vzorek, nikoliv o průměrnou hodnotu za danou periodu. V časech proměnlivé oblačnosti jsou tyto vzorky nepřesné a pro trénink sítě nevhodné. Proto byla zvolena metoda využití celkové vyrobené energie za delší časové období, konkrétně za jednu hodinu, což zvyšuje stabilitu dat.

Pro predikci je důležitá výroba na úrovni panelů, nikoliv výstup měniče na střídavé straně. Pro přepočítání slouží vzorec:

$$\sum_{i=1}^n E_{PV,i} = \frac{E_{\text{prod,AC}}}{\eta_{\text{inv}}} - E_{\text{bat,out}}\eta_{\text{bat}} + E_{\text{bat,in}} \quad (3.2)$$

Kde:

- $E_{\text{prod,AC}}$... celková vyrobená energie na AC straně měniče,
- $E_{\text{bat,out}}$... energie vystupující z baterie (nabíjení),
- $E_{\text{bat,in}}$... energie vstupující do baterie (vybíjení),
- $E_{PV,i}$... energie jednotlivých stringů,
- η_{inv} ... účinnost měniče,
- η_{bat} ... účinnost baterie.

Ze Solax cloudu lze získat energii z měniče a hodnoty vybité, respektive nabité energie z baterie. Účinnosti systému je nutné vypočítat či stanovit.

Účinnost bateriového úložiště je určena jako poměr mezi vybitou a nabitou energií. Je třeba si uvědomit, že účinnost se v průběhu času mírně snižuje. Pro účely této práce však pracujeme s průměrnou účinností vypočítanou z celkové vybité a nabité energie. Účinnost baterií se reálně pohybuje mezi 94 % a 96 %. Účinnost měniče se nevypočítává, uvažuje se katalogová hodnota 98 %.

Pro instalace, kde všechny panely směřují na stejnou světovou stranu, je výpočet dle rovnice (3.2) dostačující. U uživatelů s různorodou orientací panelů je nutné rozdělit celkovou energii mezi jednotlivé členy podle jejich natočení. Předpokladem pro tento výpočet je, že stringy nejsou tvořeny kombinací panelů z více světových stran, což pro všechny uvažované FVE platí.

K rozdělení se využívá okamžitý výkon stringů, respektive výpočet poměrů výkonů mezi nimi. Tímto poměrem se následně vynásobí vypočtená celková energie, čímž se rozdělí

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

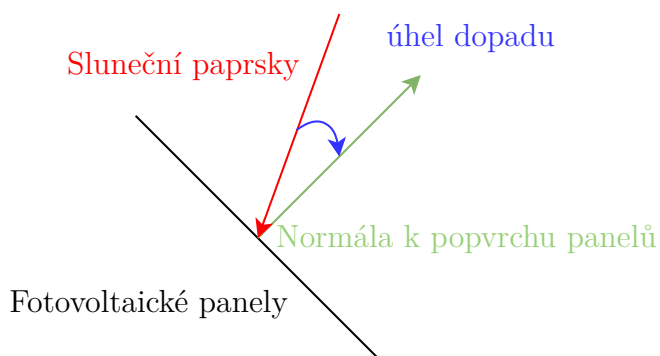
mezi jednotlivá pole panelů. Vzhledem k tomu, že energie je uložena v jednotkách kWh a časový úsek činí jednu hodinu, je převod na výkon roven dělení jedničkou.

Pro sjednocení dat ze všech FVE je nutné normalizovat výkon vzhledem k instalovanému jmenovitému výkonu FVE. Tímto krokem se eliminují rozdíly ve velikosti instalací, což zjednoduší vstupní data a zvýší efektivitu učení neuronové sítě. Tímto je výstupní část datasetu připravena pro trénink NN.

Zdroje dat vstupů NN

Druhou částí datasetu jsou vstupní data neuronové sítě. Jak již bylo zmíněno v této části je možná jistá variabilita při výběru vstupních proměnných.

První očekávatelný vstup je úhel mezi sluncem a panelem. K získání tohoto úhlu se využívá dvou vektorů - vektor pozice slunce a vektor normály panelu (Obr. 3.11).



Obr. 3.11: Úhel dopadu slunečních paprsků na povrch fotovoltaických panelů

Vektor normály střechy se získal výpočtem z azimutu a sklonu střechy. Úhel azimutu se vyčetl pomocí Google earth Pro aplikace. Úhel sklonu střechy se odhadl ze znalosti objektu. Následně se převedl pomocí goniometrických funkcí vektor z polárních do kartézských souřadnic (3.3). Kde *elevace* je 90° - sklon.

Vektor pozice slunce se získal pomocí azimutu a zenitu. Tyto úhly se pro jednotlivé lokace a časy získaly pomocí toolboxu v pythonu pvlib. Stejně jako v případě normálového vektoru střechy se přepočítal tento vektor do kartézských souřadnic (3.3). Kde *elevace* je 90° - zenit.

$$\begin{aligned}x &= \cos(elevace) \cos(azimut) \\y &= \sin(elevace) \\z &= \cos(elevace) \sin(azimut)\end{aligned}\tag{3.3}$$

Pro výpočet úhlu mezi dvěma vektory s jednotkovou velikostí pak stačí vypočítat skalární součin těchto dvou vektorů a z výsledku vypočítat arkus kosinus.

Dalšími vstupy jsou údaje o počasí. Výběr vhodných ukazatelů je kritický pro správnou funkci NN. Pro získání dat o počasí se využilo open meteo API viz 2.4.5.

Vybrané hodnoty ke stažení byly: teplota ve 2 m, oblačnost nízká, střední, vysoká a

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

celková, vlhkost vzduchu, doba svitu slunce v sekundách za hodinu a krátkovlnné záření. Ne všechny se využily k funkci predikce výroby viz níže ??.

3.3.2 Návrh neuronové sítě

Návrh této sítě představuje optimalizační problém, který lze rozdělit do dvou hlavních úloh: volbu vstupních parametrů a návrh samotné architektury.

Volba vstupních parametrů NN

Při výběru vstupů lze kombinovat různé meteorologické údaje a veličiny popisující pozici Slunce. Cílem je zvolit parametry, které významně ovlivňují výstup sítě, ale zároveň vykazují co nejnižší vzájemnou korelaci. Pro účely predikce výkonu FVE byly posouzeny následující veličiny:

- **Teplota ve 2 m:** Určuje provozní teplotu fotovoltaických článků. Jejich účinnost s rostoucí teplotou klesá vlivem vlastností křemíku. Zároveň nepřímo koreluje s intenzitou slunečního záření. **Využito.**
- **Rychlost větru v 10 m:** Proudění vzduchu ochlazuje povrch panelů nucenou konvekcí. Tím se snižuje teplota článků a roste jejich účinnost. Vliv větru je však v porovnání s intenzitou záření sekundární, proto byl pro zjednodušení zanedbán. **Nevyužito.**
- **Oblačnost nízká:** Představuje zásadní překážku pro dopadající záření. Nízká mračka mají vysokou optickou hustotu a tlumí přímou složku záření. Parametr je klíčový pro detekci rychlých propadů výroby. **Využito.**
- **Oblačnost střední:** Omezuje dopadající záření, ale její vliv je hůře předvídatelný. Často je již zahrnuta v parametru celkové oblačnosti. Kvůli snížení korelace vstupů nebyla použita samostatně. **Nevyužito.**
- **Oblačnost vysoká:** Skládá se hlavně z ledových krystalků, které způsobují jen mírný rozptyl světla. Na celkový výkon FVE má zanedbatelný vliv. **Nevyužito.**
- **Oblačnost celková:** Integruje vliv všech pater atmosféry. Je nutná pro zachycení útlumu difúzního záření, i když je nízká oblačnost nulová (např. při souvislé vysoké oblačnosti). **Využito.**
- **Vlhkost vzduchu:** Ovlivňuje spektrální složení záření a jeho rozptyl. V rámci hodinového modelu je však tento vliv minimální a většina informace je již obsažena v teplotě a oblačnosti. **Nevyužito.**
- **Doba svitu slunce v sekundách za hodinu:** Udává, jakou část hodinového intervalu dopadalo na panely přímé záření. Jde o velmi silný indikátor výroby, který vhodně doplňuje údaje o procentuální oblačnosti. **Využito.**
- **Krátkovlnné záření:** Přímý fyzikální údaj o energii dopadající na horizontální plochu. V reálných předpovědích počasí však bývá tato hodnota méně přesná než odhad oblačnosti, proto byla vynechána. **Nevyužito.**

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

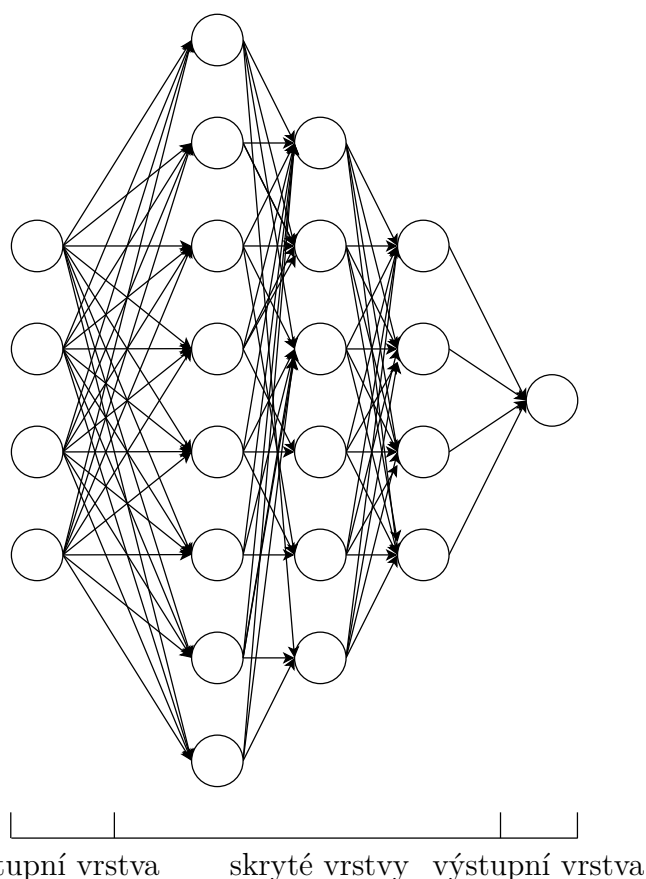
- **Elevace slunce:** Určuje úhel Slunce nad obzorem. Umožňuje síti spolehlivě rozlišit den a noc (záporné hodnoty) bez nutnosti vkládat čas jako další parametr. **Využito.**
- **Úhel dopadu paprsků:** Zohledňuje orientaci a sklon panelů vůči Slunci, což definuje teoretické maximum výroby. Do sítě vstupuje ve formě kosinu, což síti usnadňuje aproximaci cílové funkce. **Využito.**

Po otestování různých variant byla jako optimální vybrána kombinace šesti vstupů: **kosinus úhlu dopadu, elevace Slunce, doba svitu, nízká oblačnost, celková oblačnost a teplota okolí.**

Architektura NN

Návrh optimální topologie sítě je iterační proces. Cílem je najít kompromis mezi výpočetní náročností a schopností sítě popsat komplexní závislosti bez rizika přetrénování.

Zvolená architektura je tvořena třemi skrytými plně propojenými (lineárními) vrstvami s klesajícím počtem neuronů v poměru **128 – 64 – 32**. Schématické znázornění struktury sítě uvádí obr. 3.12.



Obr. 3.12: Schéma architektury navržené dopředné neuronové sítě

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Parametry sítě a konfigurace trénovacího procesu byly stanoveny následovně:

- **Aktivační funkce ReLU:** Pro skryté vrstvy byla zvolena funkce *Rectified Linear Unit*. Tato volba omezuje problém mizejícího gradientu a urychluje konvergenci. Funkce sigmoid vykazovala při testech podobné výsledky, ReLU však byla zvolena pro svou nižší výpočetní náročnost.
- **Regularizace Dropout:** Pro zamezení přetrénování byla použita technika Dropout s koeficientem 0,2. Během trénování se náhodně deaktivuje 20 % neuronů, což nutí síť hledat obecné závislosti namísto memorování trénovacích dat.
- **Optimalizátor Adam a Learning Rate:** Jako optimalizační algoritmus byl vybrán *Adam* s fixní hodnotou učícího poměru $\alpha = 0,0005$. Tato konfigurace zajišťuje stabilní sestup po gradientu chybové funkce bez kmitání v okolí lokálních minim.
- **Chybová funkce MAE:** Pro hodnocení přesnosti byla zvolena *Mean Absolute Error* (střední absolutní chyba). Na rozdíl od kvadratických funkcí je MAE méně citlivá na odlehlé hodnoty (*outliers*), které mohou vzniknout chybou měření.
- **Normalizace MinMax:** Všechny vstupní veličiny jsou transformovány do jednotného intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Tento krok je nezbytný pro sjednocení různých měřítek vstupů (např. stupně Celsia versus sekundy svitu).

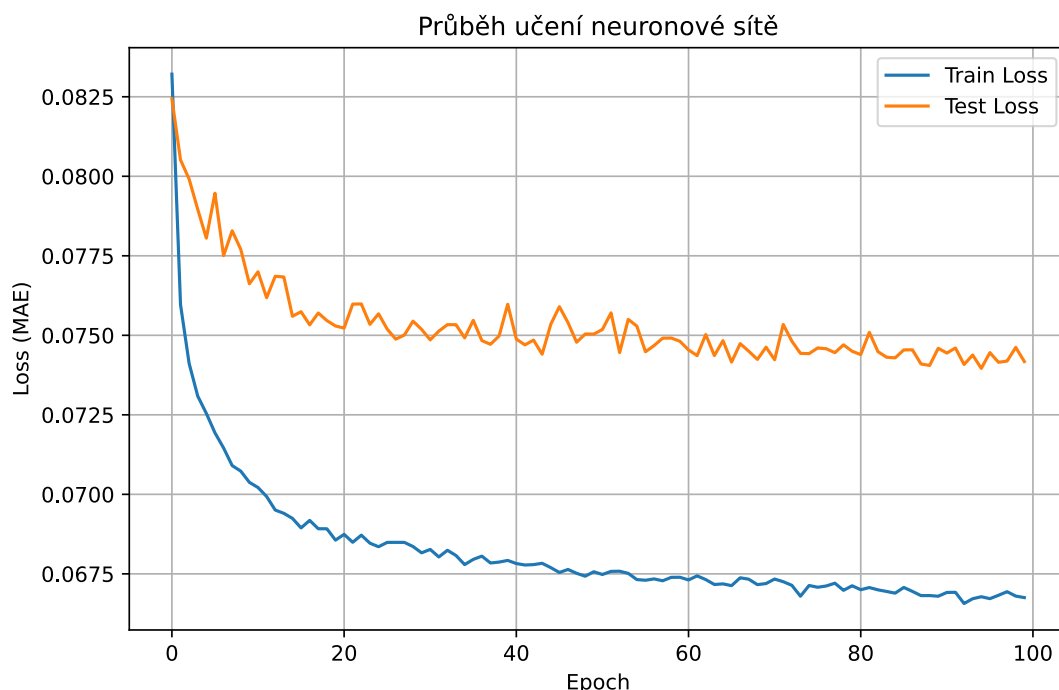
3.3.3 Trénink neuronové sítě

Globální trénink a generalizace modelu

Implementace a samotný proces učení navržené neuronové sítě proběhly v prostředí frameworku *PyTorch*. Pro fázi prvotního trénování byl využit dataset obsahující přibližně 84 000 hodinových záznamů. Tento soubor dat byl náhodně rozdělen v poměru 80 % pro trénovací sadu a 20 % pro sadu validační. Validací sada slouží ke kontrole schopnosti generalizace a včasné detekci přetrénování. Testovací data byla získána až po fázi návrhu a trénování NN.

Proces optimalizace parametrů sítě probíhal po dobu 100 epoch. Vývoj chybové funkce MAE v závislosti na počtu epoch pro trénovací i validační část datasetu je graficky znázorněn na grafu 3.1.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU



Graf 3.1: Vývoj chybové funkce během procesu trénování

Ačkoliv takto natrénovaný „globální“ model vykazuje schopnost predikovat základní fyzikální trendy výroby, jeho nasazení v reálných podmínkách naráží na specifika jednotlivých instalací. Mezi hlavní faktory snižující přesnost univerzálního modelu patří:

- **Technický stav komponent:** Rozdílné stáří panelů, jejich tepelní koeficienty a aktuální míra degradace.
- **Lokální stínění:** Statické překážky (okolní zástavba, komíny, vegetace), které způsobují nelineární propady výkonu v závislosti na konkrétním azimutu a elevaci Slunce.
- **Instalační odchylky:** Nepřesnosti v určení skutečného sklonu a orientace panelů oproti projektové dokumentaci.

Z těchto důvodů není obecný model schopen dosáhnout přesnosti vyžadované pro pokročilé algoritmy řízení spotřeby. Jako řešení byla zvolena metodika dotrénování. Při ní je globální model použit jako základ a následně je adaptován na unikátní datový otisk konkrétní střechy, jak popisuje následující část.

Personalizace modelu pomocí metody Transfer Learning

Pro eliminaci systematických chyb obecného modelu a jeho přizpůsobení unikátním podmínkám konkrétní instalace byla zvolena metodika učení s přenosem znalostí (angl. *transfer learning*). Princip této metody spočívá v převzetí vah a biasů z globálně předtrénovaného modelu a jejich následné jemné adaptaci (*fine-tuning*) na specifickém, lokálním datasetu dané FVE.

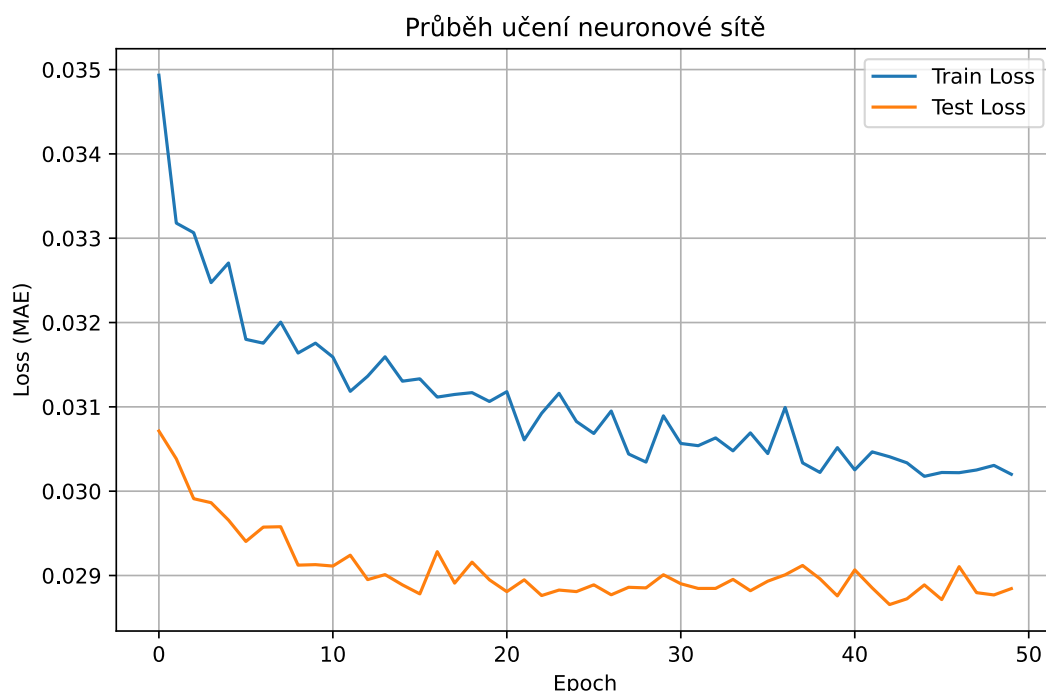
3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Využití předtrénovaného modelu poskytuje významnou výhodu v podobě kvalitního počátečního odhadu parametrů sítě. Model již disponuje schopností interpretovat základní fyzikální souvislosti (např. vliv elevace Slunce na teoretický výkon). Díky tomu vyžaduje proces dotrénování řádově menší objem dat i nižší počet výpočetních epoch pro dosažení konvergence.

Efektivita tohoto přístupu se ukázala jako velmi vysoká. Výsledná přesnost predikce byla přímo úměrná kvalitě a rozsahu lokálních dat dostupných pro danou instalaci. Pro proces adaptace byly provedeny následující úpravy parametrů:

- **Snížení učícího poměru (Learning Rate):** Hodnota byla redukována oproti základnímu tréninku. Tím se zabrání destrukci již naučených obecných příznaků a zajistí se pouze jemné doladění vah pro lokální specifika.
- **Redukce počtu epoch:** Vzhledem k vysoké relevanci počátečních vah postačoval k dosažení minima chybové funkce menší počet iteračních kroků.

Průběh adaptačního procesu pro vybranou instalaci je dokumentován na grafu 3.2. Z grafu je patrné, že chybová funkce začíná na výrazně nižších hodnotách než u globálního modelu a rychle konverguje k optimu, které reflektuje reálné provozní stavy konkrétní střechy.

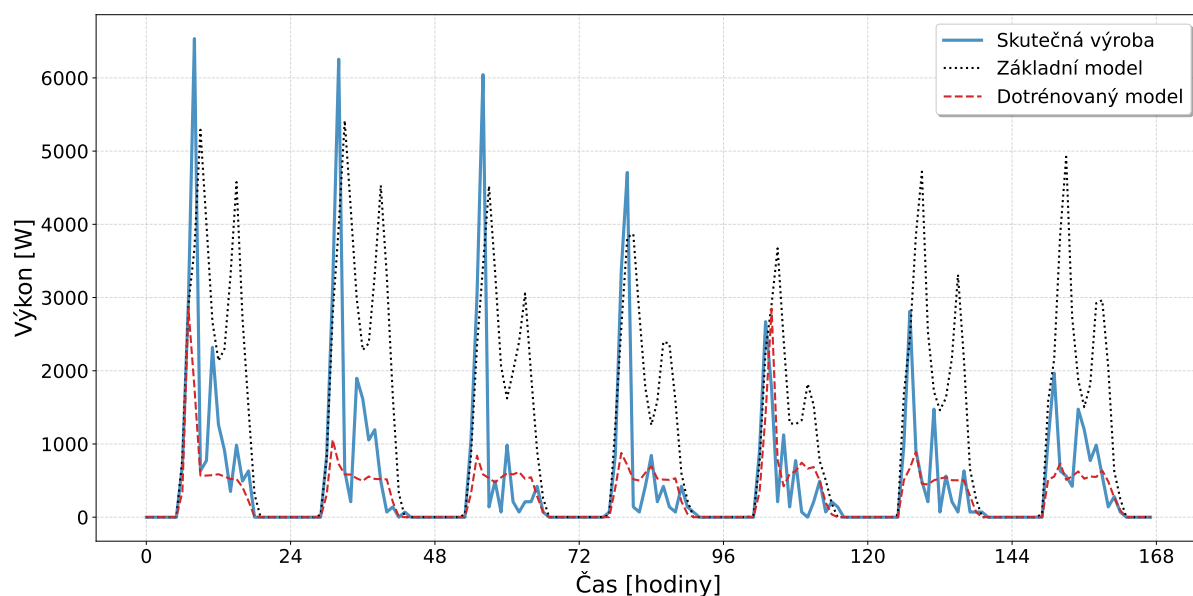


Graf 3.2: Vývoj chybové funkce během procesu dotrénování na data konkrétní FVE

3.3.4 Vyhodnocení natrénované neuronové sítě

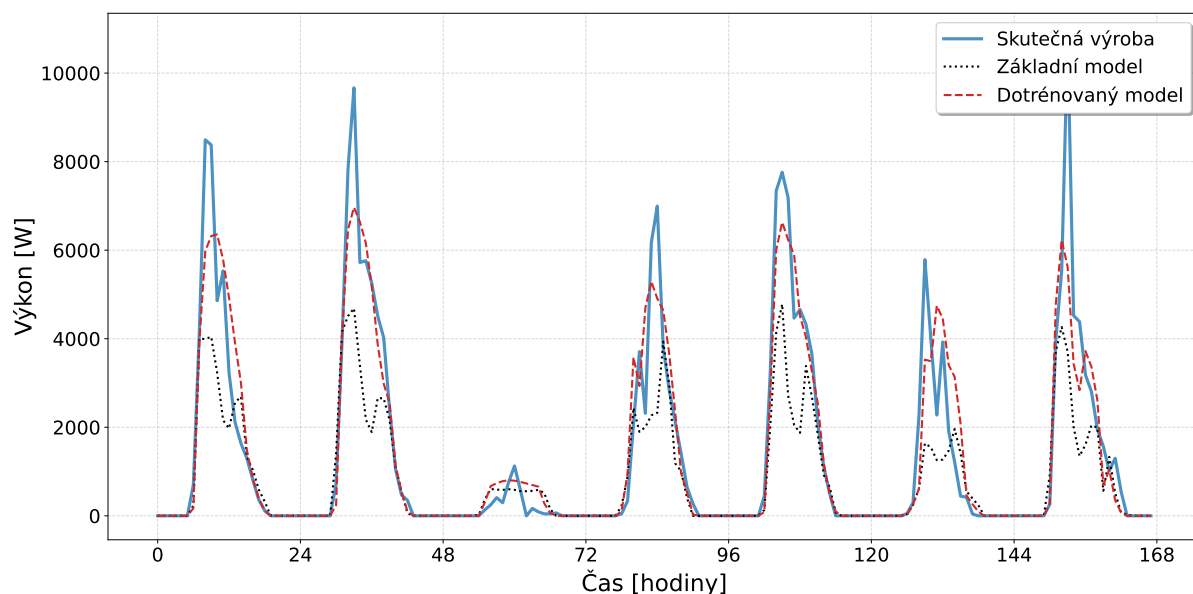
Klíčovým indikátorem úspěšnosti navrženého postupu je přímé porovnání predikce obecného (globálního) modelu a modelu adaptovaného pomocí dotrénování na lokální data. Vyhodnocení proběhlo na testovacích datech, která nebyla součástí trénovacího procesu, aby byla zajištěna objektivita výsledků.

Při analýze výstupů obecné sítě se ukázaly systematické odchylky u instalací, které pracují v režimu s omezením přetoků do distribuční sítě. U těchto systémů dochází v době maximálního slunečního záření k nucenému omezování výkonu střídače, pokud domácnost nedokáže energii okamžitě spotřebovat nebo uložit do baterií. Jak je patrné z grafu 3.3, obecná síť predikuje teoretické maximum výroby, zatímco reálná data vykazují propady k nulovým hodnotám. Tento nesoulad mezi fyzikálním potenciálem a administrativním omezením způsobuje u univerzálního modelu vysokou chybovost.



Graf 3.3: Srovnání predikce obecného a dotrénovaného modelu u instalace s omezením přetoků

Opačný problém nastává u druhého uživatele (graf 3.4), který omezení přetoků nemá. Globální model zde ukazuje propady v době nejvyšší výroby. Tento nedostatek odstraňuje dotrénovaná síť, která je mnohonásobně přesnější.



Graf 3.4: Srovnání predikce obecného a dotrénovaného modelu u instalace bez omezení přetoků

3.3.5 Prostory ke zlepšení

Navržený systém predikce vykazuje vysokou míru spolehlivosti. V rámci dalšího vývoje však byly identifikovány oblasti, které by mohly dále snížit chybovost odhadů:

- **Kategorizace instalací:** Rozdělení datasetu na dvě základní skupiny – FVE s povolenými přetoky a systémy bezpřetokové. Vytvořením dvou samostatných modelů se eliminuje zkreslení způsobené nuceným omezováním výkonu.
- **Filtrace dat:** Z trénovacího procesu by se měly vyřadit úseky, kdy je bateriové úložiště nabito na 100 % a současně je nulový přetok do sítě. V těchto stavech dochází k umělé devalvaci dat, protože střídač omezuje výrobu panelů z absence odbytu energie, nikoliv kvůli nedostatku záření.
- **Implementace rekurentních architektur:** S postupným narůstáním objemu lokálních dat se otevírá prostor pro přechod od MLP architektur k pokročilejším sítím typu LSTM. Tyto sítě dokážou lépe pracovat s časovými závislostmi a dynamikou změn v meteorologických předpovědích.

3.4 Statistické modelování spotřeby objektu

Pro efektivní optimalizaci energetických toků pomocí algoritmu MPC je nezbytné disponovat modelem, který s dostatečnou přesností predikuje spotřebu elektrické energie v domácnosti. Na rozdíl od výroby z FVE, která silně závisí na exogenních meteorologických faktorech, vykazuje spotřeba vysokou míru stochasticity danou chováním uživatelů.

3.4.1 Dataset

Data pro analýzu spotřeby byla stažena z monitoringu reálné domácnosti s instalovaným střídačem SolaX. Pro účely návrhu modelů byla data rozdělena do skupin podle hodiny

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

dne a typu dne na pracovní dny a víkendy či svátky. Tento přístup umožňuje zachytit základní uživatelské vzorce, jako je ranní špička před odchodem do zaměstnání nebo večerní nárůst spotřeby.

Stejně jako u predikce výroby (viz kapitola 3.3) se jedná o časově omezený vzorek dat. Při analýze vyvstala otázka volby mezi komplexním modelem typu LSTM (Long Short-Term Memory) a regresními modely. Ačkoliv LSTM sítě vynikají v zachycení dlouhodobých závislostí, narážejí na potřebu obrovského množství dat, které pro tuto úlohu nebylo k dispozici.

Získání dat

V datech stažených z cloudu SolaX se nenachází proměnná, která by přímo reprezentovala spotřebu domu. Tuto veličinu bylo proto nutné zpětně dopočítat. Logovanými hodnotami jsou navíc pouze okamžité vzorky výkonu, nikoliv průměrné hodnoty v čase. Ze stejných důvodů jako u predikce výroby se proto pro výpočet využilo integrálních hodnot energií namísto okamžitých výkonů.

Výpočet spotřebované energie v daném kroku se provádí podle bilanční rovnice:

$$E_{\text{tot,load}} = E_{\text{tot,imported}} - E_{\text{tot,exported}} + E_{\text{tot,inverter}} \quad (3.4)$$

Kde:

- $E_{\text{tot,load}}$ – celková spotřebovaná energie objektu,
- $E_{\text{tot,imported}}$ – celková elektrická energie importovaná z distribuční sítě,
- $E_{\text{tot,exported}}$ – celková elektrická energie exportovaná do distribuční sítě,
- $E_{\text{tot,inverter}}$ – celková elektrická energie dodaná hybridním měničem.

Všechny tyto veličiny představují vektory kumulativních hodnot, které měřicí systém střídače zaznamenává v pětiminutových intervalech. Pomocí diferenční funkce *diff* v prostředí *Python* byla nejprve vypočítána spotřebovaná energie ΔE za konkrétní pětiminutový krok. Pro potřeby predikčních modelů se tato hodnota následně přepočítala na průměrný výkon P_{load} ve wattech podle vztahu:

$$P_{\text{load}} = 1000 \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Filtrace dat

Po přepočtu energií na průměrný výkon se v surových datech objevily chybné a fyzikálně nerealizovatelné hodnoty. Jednalo se především o anomálie v podobě záporné spotřeby nebo odběrů, které výrazně překračovaly proudovou kapacitu hlavního jističe. Druhý

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

případ by teoreticky mohl nastat při současném maximálním odběru z distribuční sítě i z akumulátoru měniče, avšak v podmínkách uvažované instalace FVE k takovému stavu dojít nemohlo.

Z tohoto důvodu byl dataset omezen shora i zdola. Hodnoty spotřeby byly limitovány nulou jako spodní hranicí a proudovou hodnotou hlavního jističe jako horní hranicí. Maximální možný příkon objektu $P_{\max}$ pro třífázový jistič $B25$ byl určen výpočtem:

$$P_{\max} = 3I_n U_f = 3 \cdot 25 \text{ A} \cdot 230 \text{ V} = 17\,250 \text{ W} \quad (3.6)$$

3.4.2 Modelování spotřeby

Pro vytvoření robustního predikčního modelu je nejprve nutné definovat klíčové vlivy, které určují chování celého systému.

Spotřeba elektrické energie v domácnosti zásadně závisí na přítomnosti a chování jejích obyvatel. Tento lidský faktor se však modeluje velmi obtížně. Vyžadoval by buď instalaci PIR čidel pohybu v místnostech, nebo integraci sledování polohy mobilních telefonů. Vzhledem k tomu, že historická data o přítomnosti osob nebylo možné získat, tato závislost se v práci nemodeluje.

Druhým významným vlivem je venkovní teplota. Domácnosti vybavené fotovoltaickou elektrárnou totiž standardně využívají elektřinu i k vytápění. S tímto faktorem souvisí také skutečnost, že v zimních měsících tráví lidé více času uvnitř objektu, což přirozeně zvyšuje spotřebu.

Z těchto důvodů bylo implementováno rozdělení dat podle času (jednotlivé hodiny) a typu dne (pracovní den oproti víkendům a svátkům). Tento přístup umožňuje v datech identifikovat a popsat periodické uživatelské vzorce, jako je ranní špička před odchodem do zaměstnání, útlum během dne a následný večerní nárůst spotřeby.

Po rozdělení datového souboru podle hodin a typu dne se uvažovaly čtyři metody modelování spotřeby v závislosti na venkovní teplotě:

- polynom 1. stupně (lineární regrese),
- polynom 2. stupně (kvadratická regrese),
- medián,
- aritmetický průměr.

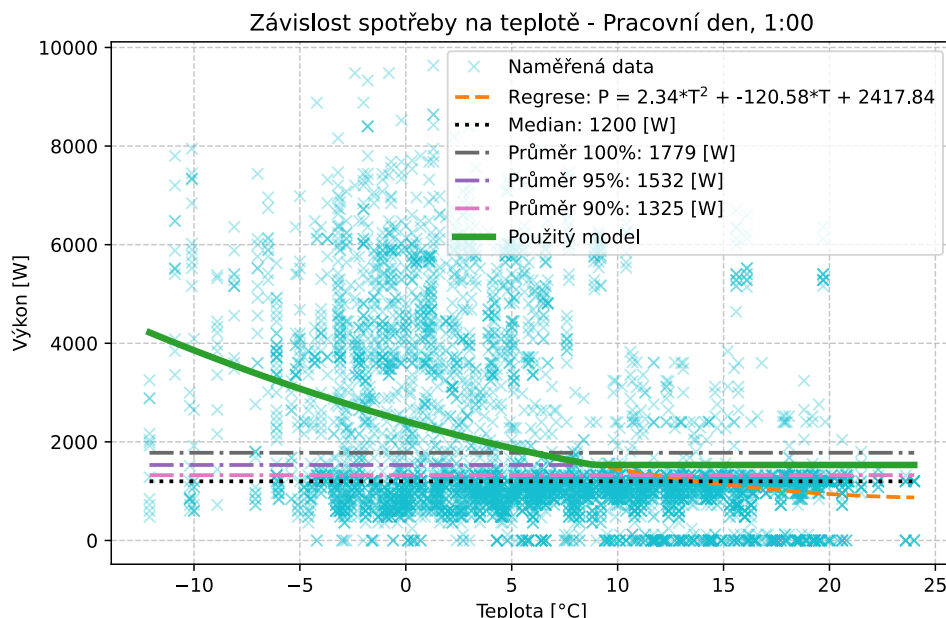
Každý z těchto přístupů vykazuje specifické výhody a nevýhody. Výsledný predikční model proto využívá jejich kombinaci.

Polynom 1. stupně

Lineární regrese slouží především k určení základního trendu závislosti spotřeby na teplotě. Při analýze naměřených dat (viz obr. 3.5) se však ukázalo, že tato závislost vykazuje

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

výrazně nelineární, hyperbolický charakter. Z tohoto důvodu se polynom 1. stupně nepoužívá přímo k výpočtu predikce, ale slouží jako indikátor, zda je závislost spotřeby na teplotě v danou hodinu statisticky významná.



Graf 3.5: Závislost spotřeby na venkovní teplotě v 01:00 (pracovní den)

Polynom 2. stupně

Při vytápění objektu pomocí tepelného čerpadla má hyperbolická závislost spotřeby na venkovní teplotě jasné fyzikální opodstatnění. Tepelný tok Q odváděný z domu prostupem je definován vztahem:

$$Q = k(T_{\text{in}} - T_{\text{out}}) \quad (3.7)$$

Při uvažování konstantní vnitřní teploty T_{in} lze rovnici zjednodušit na tvar:

$$Q = -k_1 T_{\text{out}} + k_2 \quad (3.8)$$

Topný faktor (COP) a tím i účinnost tepelného čerpadla η_{TC} vykazuje lineární závislost na venkovní teplotě:

$$\eta_{\text{TC}} = \frac{k_3 T_{\text{out}} + k_4}{k_5} \quad (3.9)$$

Výsledný elektrický příkon kompresoru $P_{\text{top,el}}$ je potom dán podílem tepelného výkonu a účinnosti:

$$P_{\text{top,el}} = \frac{Q}{\eta_{\text{TC}}} = \frac{(-k_1 T_{\text{out}} + k_2) k_5}{k_3 T_{\text{out}} + k_4} \quad (3.10)$$

Z uvedeného matematického popisu je patrné, že výsledná funkce představuje hyperbolu.

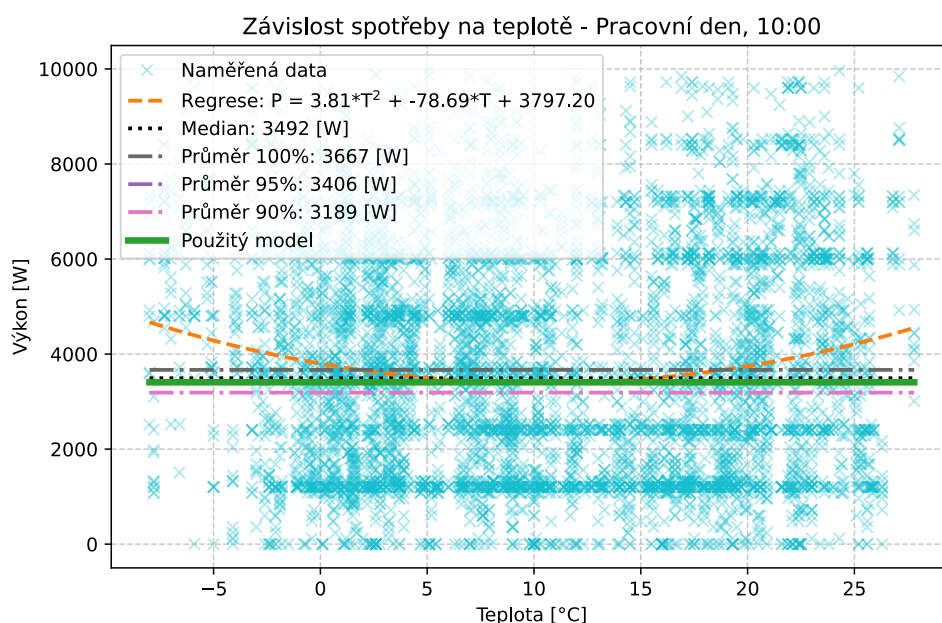
Modelování reálného systému přímo pomocí hyperbolické funkce je však numericky

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

nestabilní, protože v mezních stavech hrozí dělení nulou. Výpočet je navíc procesorově náročnější. Jako vhodná aproximace nelineárního vztahu byl proto zvolen kvadratický model (polynom 2. stupně).

Aritmetický průměr

V některých denních hodinách ztrácí modelování pomocí regrese smysl. Závislost spotřeby na venkovní teplotě je v těchto oknech minimální, jak dokumentuje obr. 3.6. Výsledný regresní polynom by v takovém případě do predikce vnášel chybu. Pro tyto stavy je nutné zvolit jednodušší statistický přístup, jako je aritmetický průměr nebo medián.



Graf 3.6: Závislost spotřeby na venkovní teplotě v 10:00 (pracovní den)

Výhodou aritmetického průměru oproti mediánu je schopnost zjemnit diskrétní rozlišení dat a zvýšit tak přesnost predikce. Nevýhodou průměru je však jeho citlivost na odlehlé hodnoty. Pokud uživatel nárazově zapne více spotřebičů s vysokým příkonem, celková spotřeba krátkodobě vzroste (např. na 15 kW), ačkoliv se jedná o anomálii. Klasický průměr by byl touto špičkou zkreslen.

Medián

Medián sice popsanou citlivostí na odlehlé hodnoty netrpí, nedokáže však přesně popsat reálný střed integrálních hodnot. Z tohoto důvodu byl čistý medián zamítnut a nahrazen aritmetickým průměrem vypočítaným z 95 % nejnižších hodnot. Tímto ořezem se z data-setu eliminovaly náhodné uživatelské anomálie.

Výsledný využitý model

Vzhledem k tomu, že každá z metod má své limity, využívá finální algoritmus jejich kombinaci. Systém nejprve pro každou hodinu a typ dne ověří teplotní závislost pomocí lineární regrese. Pokud je směrnice příčky vyšší než stanovený práh $-40 \text{ W/}^\circ\text{C}$, teplotní závislost se považuje za zanedbatelnou a model použije oříznutý průměr z 95 % hodnot.

V opačném případě algoritmus pomocí kvadratické regrese vypočítá koeficienty paraboly. Samotný polynom 2. stupně by však při vysokých letních teplotách predikoval nesmyslný nárůst spotřeby (pokud objekt nevyužívá klimatizaci). Proto je model zdola omezen minimem paraboly.

Matematicky se určí souřadnice vrcholu kvadratické funkce $T_{\min} = \frac{-b}{2a}$. Pro všechny teploty vyšší než $T_{\min}$ pak model fixně uvažuje konstantní hodnotu spotřeby odpovídající tomuto minimu. Výsledná křivka je navíc zespodu limitována hodnotou oříznutého průměru (algoritmus volí maximum z hodnoty paraboly a průměru).

Pro zachování dynamiky reálného času se k vypočtenému statickému modelu na mikrokontroléru (MCU) přičítá složka klouzavého průměru vyjádřená jako $\alpha (P_{\text{model}} - P_{\text{klouz,prumer}})$. Výpočet využívá reálná telemetrická data z objektu. Váhový koeficient α byl na základě experimentálního ověření stanoven na hodnotu 0,3.

3.4.3 Zhodnocení využitého modelu

Navržený model predikce spotřeby představuje robustní řešení, které kombinuje statistickou stabilitu s fyzikální podstatou celého systému. Hlavní komplikací při predikci domácí spotřeby je její výrazně stochastický charakter. Na rozdíl od výroby z FVE, kde jako dominantní faktory vystupují solární ozáření a teplota, je spotřeba určována lidským faktorem. Ten do dat vnáší vysokou míru neurčitosti a náhodných jevů.

Model odvozený z historických dat pomocí kombinace kvadratické regrese a oříznutého průměru dokáže efektivně zachytit takzvané bazální chování domu. To představuje spotřebu, která je v daný čas a při konkrétní venkovní teplotě statisticky nejpravděpodobnější. Nicméně ani přesný regresní model nedokáže z principu předpovědět události, jako je nárazové spuštění energeticky náročného spotřebiče (např. pračky, trouby nebo rychlovarné konvice), pokud tyto děje nejsou pevně vázány na konkrétní denní čas.

Z tohoto důvodu byla do algoritmu implementována dynamická korekce pomocí klouzavého průměru. Tato modifikace úspěšně řeší zásadní nedostatky statického modelu:

- **Adaptivita na aktuální stav:** Pokud se v domácnosti zrovna nachází více osob nebo probíhá činnost vyžadující zvýšený odběr, klouzavý průměr posune statickou predikci směrem nahoru.
- **Eliminace systematické chyby:** Statický model vytvořený z historických dat může trpět mírným posunem, například vlivem postupné obměny domácích spotřebičů. Složka klouzavého průměru tuto odchylku průběžně minimalizuje.
- **Filtrace šumu:** Zvolený koeficient $\alpha = 0,3$ zajišťuje, že systém adekvátně reaguje na trvalejší změny trendu v řádu desítek minut. Algoritmus se tím zároveň nenechá zbytečně destabilizovat krátkými proudovými špičkami, které trvají pouze minuty.

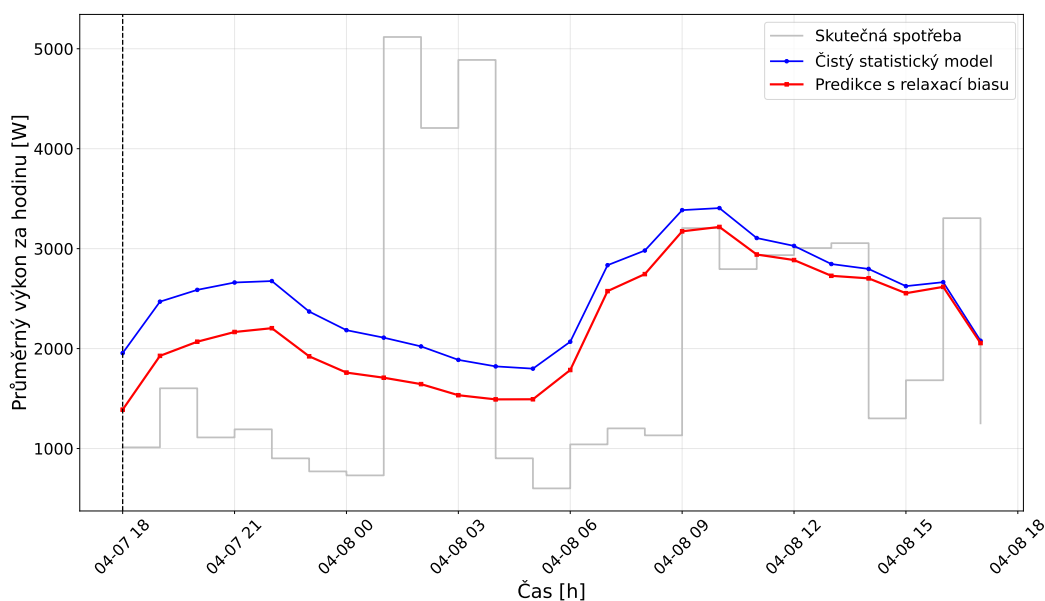
3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Hodnota klouzavého průměru se následně přičítá k hodnotám statické predikce. Vlivem takzvané relaxace je však nutné koeficient α na predikčním horizontu postupně snižovat. Spotřeba ve vzdálenější budoucnosti (např. za 24 hodin) totiž již přímo nezávisí na aktuálním okamžitém odběru.

Zvolená kombinace statistického modelu a filtrace v reálném čase je pro účely řízení energetických toků na mikrokontroléru vhodnější než komplexní rekurentní modely typu LSTM. Poskytuje totiž dostatečnou přesnost při zachování minimální výpočetní náročnosti a deterministického chování. To jsou klíčové parametry pro stabilitu optimalizačního algoritmu běžícího v reálném čase na vestavném systému.

Závěrem je nutné podotknout, že regresní část modelu vychází z analýzy chování konkrétního objektu. Výsledné parametry proto nelze bezmyšlenkovitě generalizovat na libovolné jiné domácnosti bez předchozího ověření a zhodnocení jejich specifických fyzikálních vlastností.

Reálné srovnání statické predikce, modelu s uplatněnou relaxací a skutečné spotřeby objektu je znázorněno na obr. 3.7.



Graf 3.7: Ukázka hodinového predikčního horizontu spotřeby na 24 hodin s aplikovanou relaxací počáteční odchylky

3.5 Softwarová architektura serverové části

Tato kapitola popisuje návrh a implementaci serverové části systému, která slouží jako centrální výpočetní uzel. Server zajišťuje sběr externích dat, výpočet predikčních modelů, optimalizaci a komunikaci s mikrokontrolérem prostřednictvím asynchronního REST API postaveného na frameworku FastAPI.

3.5.1 Celková architektura a datový model

Architektura systému vychází z konceptu Cloud-Edge computingu. Serverová část přebírá výpočetně náročné operace, čímž zásadně odlehčuje mikrokontroléru (MCU), který plní roli spolehlivého vykonavatele příkazů v reálném čase. Celková koncepce staví na důsledném oddělení sběru dat, predikční logiky a komunikační vrstvy.

Koncepce aplikace a tok dat

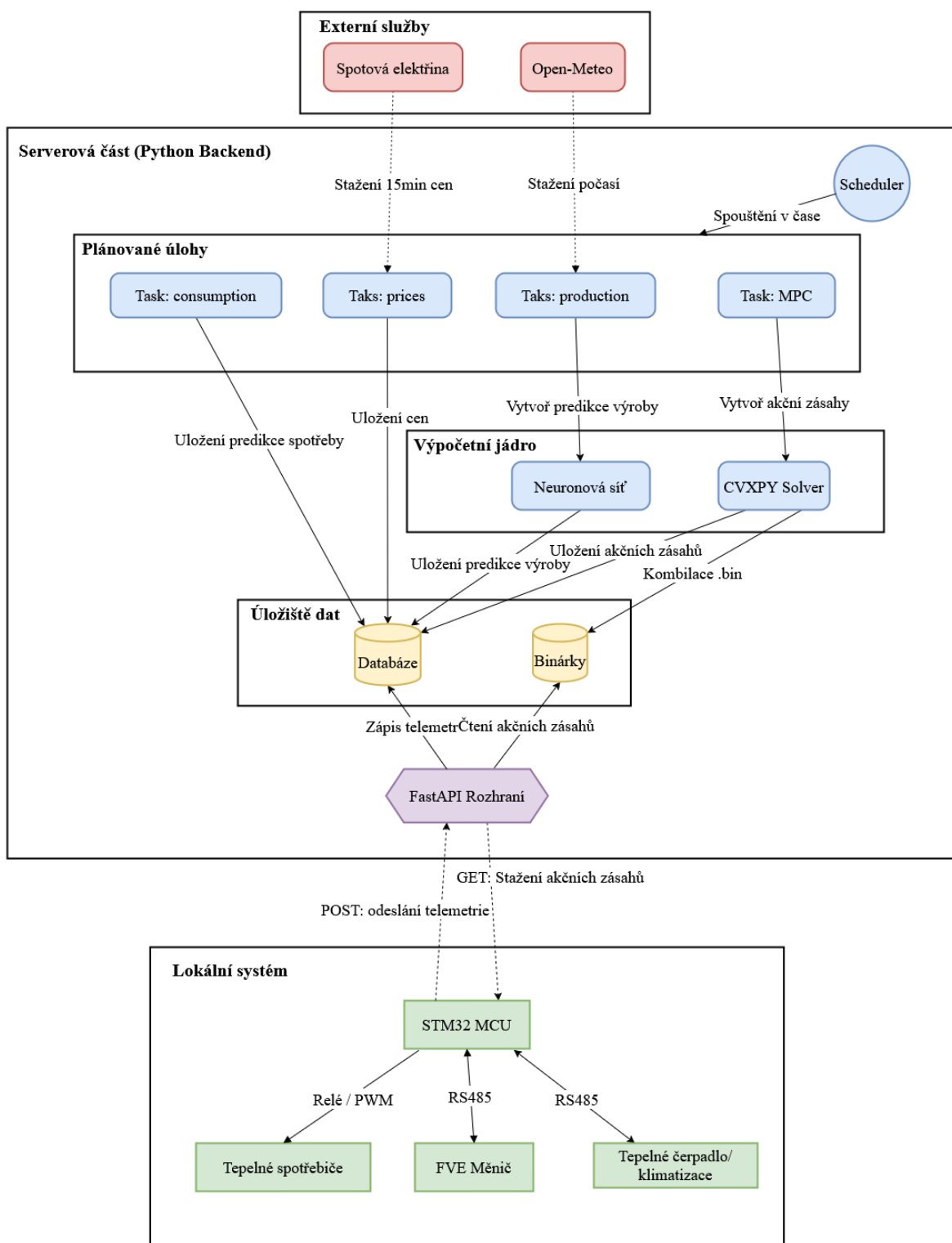
Logické uspořádání systému a toky dat jsou znázorněny na obr. 3.13. Hlavní procesy na serveru řídí plánovač úloh (scheduler), který v definovaných intervalech spouští následující moduly:

- **Modul získávání externích dat:** Server v pravidelných intervalech asynchronně komunikuje s externími API (Open-Meteo, spotovaelektrina.cz) pro získání dat o počasí a cenách elektřiny.
- **Predikční modul:** Neuronová síť na základě předpovědi počasí odhaduje výrobu fotovoltaické elektrárny (FVE). Paralelně regresní model odhaduje spotřebu domácnosti, přičemž zohledňuje historické trendy, venkovní teplotu a typ dne.
- **Optimalizační modul (MPC):** V 15minutových intervalech provádí algoritmus Model Predictive Control optimalizaci řízení na základě predikcí a telemetrie z baterie. Výstupem je optimální trajektorie provozu (např. cílové stavy nabití baterie).
- **Generování datových balíčků:** Výsledné řídicí povely jsou transformovány do binárního formátu. Tento krok dramaticky snižuje paměťovou náročnost a objem přenášených dat oproti textovým formátům (např. JSON), což je pro limitované zdroje MCU klíčové.
- **Sběr provozních dat:** MCU prostřednictvím zabezpečeného API odesílá telemetrii (stav baterie, okamžitý výkon). Tato data uzavírají regulační smyčku a slouží k následnému dotrénování modelů.

Struktura databáze

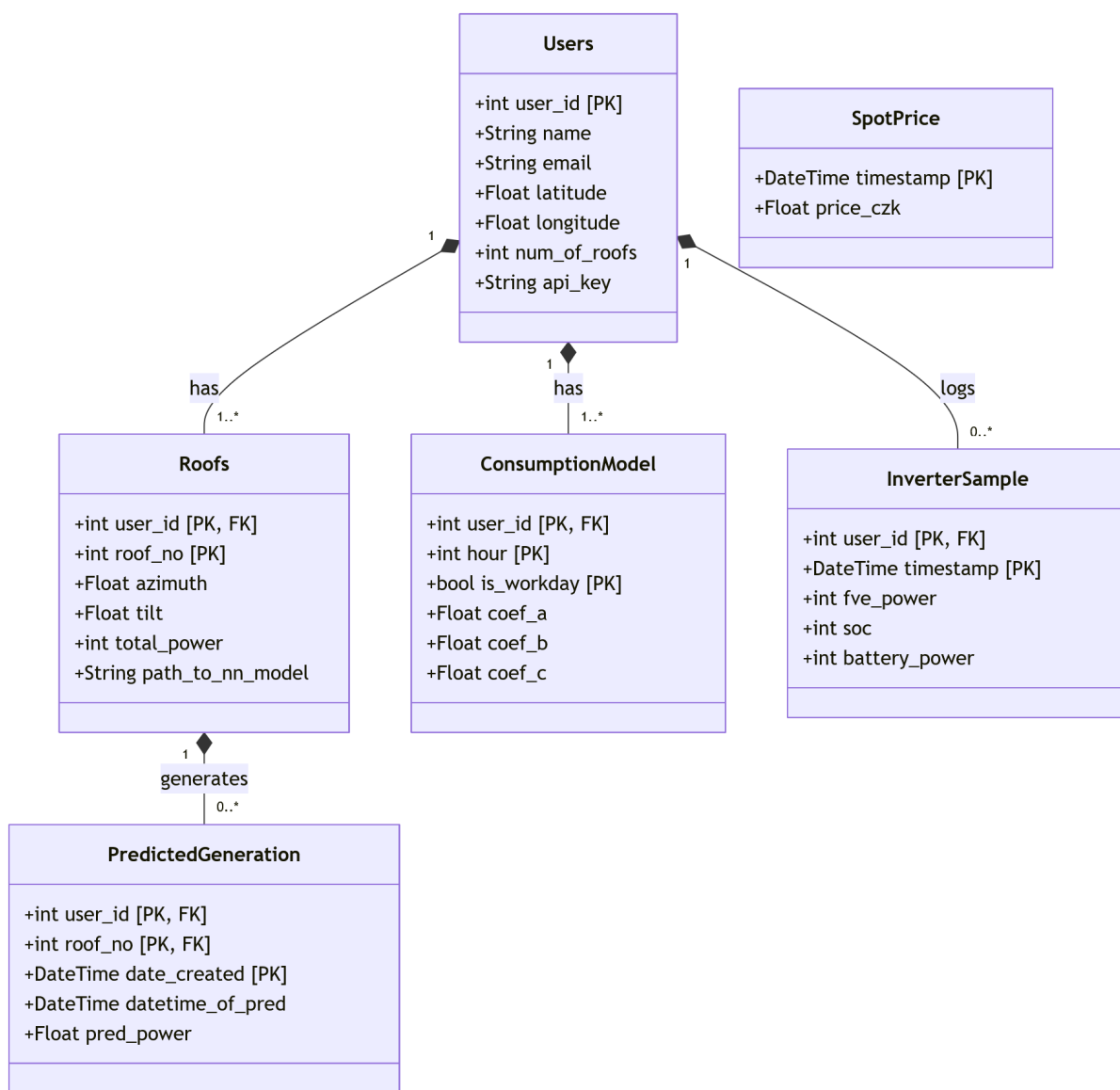
Pro ukládání dat byla zvolena relační databáze SQLite, spravovaná knihovnou SQLAlchemy. Tento nástroj umožňuje efektivní mapování objektů v jazyce Python přímo na databázové tabulky. Datový model je navržen s ohledem na referenční integritu a rychlost dotazování v rozsáhlých časových řadách, viz UML diagram na obr. 3.14.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU



Obr. 3.13: Blokové schéma architektury serveru a toků dat.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU



Obr. 3.14: Diagram tříd databázového modelu.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Databáze obsahuje následující klíčové entity:

- **Users a Roofs:** Uživatelské profily a parametry instalace (azimuty, sklony střech, instalovaný výkon) nezbytné pro parametrizaci AI modelů.
- **SpotPrice:** Historické a budoucí spotové ceny elektrické energie.
- **PredictedGeneration a PredictedConsumption:** Agregované výstupy z neuronové sítě a matematických modelů.
- **ConsumptionModel:** Koeficienty kvadratických polynomů pro výpočet predikce spotřeby.
- **InverterSample:** Provozní logy z MCU, které slouží jako zpětná vazba pro algoritmy.

Oddělení provozních a historických dat

Z důvodu výkonnostní optimalizace je v systému zavedeno logické oddělení zpracování informací:

- **Provozní (hot) data:** Obsahují aktuální předpovědi, ceny a nejnovější telemetrii, které jsou kritické pro algoritmus MPC. Tato data jsou často aktualizována a slouží k okamžitému výpočtu zásahů.
- **Historická (cold) data:** Slouží pro analytické účely a dlouhodobé učení modelů. Obsahují kompletní historii výroby a spotřeby. Pro práci s těmito daty jsou implementovány optimalizační indexy nad sloupci s časovými značkami.

3.5.2 Externí datové zdroje

Klíčovým předpokladem pro přesné fungování predikčních modelů a optimalizačních algoritmů je přístup k aktuálním a spolehlivým datům o počasí a tržních cenách elektrické energie. Systém pro tyto účely využívá volně dostupná rozhraní (API), která poskytují data s vysokým časovým rozlišením.

Získávání meteorologických dat

Pro získání předpovědi počasí odesílá server v pravidelných intervalech asynchronní požadavky na rozhraní Open-Meteo API. Požadavky jsou parametrizovány geografickými souřadnicemi konkrétní instalace, které jsou uloženy v uživatelském profilu. Z přijatých dat ve formátu JSON systém extrahuje klíčové veličiny nezbytné pro predikční modely, zejména venkovní teplotu ve výšce 2 m, parametry nízké a celkové oblačnosti a hodnoty slunečního svitu.

Získávání cen elektřiny

Algoritmus MPC vyžaduje pro optimalizaci nákupu a prodeje energie aktuální data o spotových cenách na denním trhu OTE. Server pro tento účel využívá API portálu *spotovaelektrina.cz*, který agreguje data operátora trhu do strojově čitelného formátu JSON. Hlavní výhodou tohoto řešení je přímá dostupnost cen v českých korunách (Kč / MWh), což eliminuje nutnost implementace subsystému pro průběžnou konverzi měn podle aktuálních kurzů ČNB.

Plánovač úloh spouští stahování cen standardně ve 14:00 SEČ, tedy v čase, kdy jsou ceny na následující den již zpravidla zveřejněny. V případě dočasné nedostupnosti služby je systém nastaven na opakované stažení ve 20:00.

Odolnost systému a mechanismy pro výpadky (fallback)

Vzhledem k tomu, že výpočetní jádro (MPC algoritmus) je na vnějších datech kriticky závislé, je nutné zajistit stabilitu systému i při dočasných výpadech externích rozhraní. V těchto situacích jsou aplikovány následující mechanismy:

- **Lokální vyrovnávací paměť:** Server trvale ukládá poslední úspěšně staženou předpověď a cenový profil do databáze. Při výpadku API jsou algoritmu poskytnuta tato historická data posunutá o příslušný časový krok.
- **Extrapolace cen:** V případě kompletní nedostupnosti aktuálních cen využívá algoritmus historický průměr pro daný typ dne (pracovní den oproti víkendu či svátku) z předešlého týdne. Tento přístup minimalizuje odchylku v rozhodování optimalizátoru oproti použití fixní ceny.
- **Konzervativní profil výroby:** Pokud meteorologické API selže na dobu delší než 6 hodin a data v paměti vyprší, systém přechází na konzervativní odhad výroby. Ten vychází z modelu jasné oblohy pro dané roční období, který je následně korigován o historickou průměrnou chybu v daném měsíci.

3.5.3 Implementace predikcí a optimalizačního algoritmu

Tato část textu se zaměřuje na softwarovou realizaci výpočetního jádra serveru. Jádro v sobě spojuje modely strojového učení pro odhad výroby, statistické modely spotřeby a optimalizační řešič. Tento řešič na základě získaných predikcí sestavuje ideální trajektorii pro řízení bateriového úložiště.

Integrace modelu neuronové sítě pro predikci výroby

Základem pro plánování energetické bilance je spolehlivý odhad výroby fotovoltaické elektrárny. Server pro tento účel využívá předtrénovaný model umělé neuronové sítě ve frameworku *PyTorch*. Architektura i konkrétní váhy této sítě jsou trvale uloženy na serveru.

Při každém spuštění predikční úlohy systém nejprve načte aktuální meteorologická data na nadcházejících 48 hodin. Tato data obsahují teplotu, oblačnost a dobu svitu.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Vstupní proměnné nejprve projdou transformací pomocí normalizačního objektu (Scaler). Ten zajišťuje převod hodnot do optimálního rozsahu, který je nezbytný pro správnou inferenci sítě.

Vzhledem k tomu, že systém podporuje distribuované instalace, pracuje algoritmus v iterativním režimu. Pokud jsou panely umístěny na více střechách s různou orientací (například východ a západ), provádí se inference neuronové sítě pro každou střechu odděleně. Výsledné vektory predikovaného výkonu jsou následně sečteny do celkového odhadu výroby a uloženy do relační databáze s hodinovým časovým rozlišením.

Modelování a predikce spotřeby objektu

Na rozdíl od výroby, která závisí především na slunečním svitu, je spotřeba domácnosti ovlivněna lidským chováním a kalendářem. Systém proto využívá hybridní přístup, který kombinuje polynomickou regresi s heuristickými pravidly.

Spotřeba se modeluje pomocí předpočítaných koeficientů kvadratické rovnice v závislosti na venkovní teplotě T :

$$P_{\text{load}}(T) = aT^2 + bT + c \quad (3.11)$$

Pro přesné zachycení lidského chování má systém unikátní koeficienty (a, b, c) pro každou hodinu dne. Tyto koeficienty jsou navíc oddělené pro pracovní dny a dny volna. Pro správnou detekci státních svátků je v systému integrována knihovna `holidays`.

Algoritmus obsahuje také bezpečnostní omezovače. Pokud by kvadratický model extrapoloval nereálnou hodnotu spotřeby, zasáhne ochranný mechanismus. Ten tuto hodnotu nahradí robustním průměrem z 95 % nejnižších hodnot historické spotřeby pro danou hodinu, jak popisuje kapitola 3.4.2.

Implementace MPC optimalizace (Model Predictive Control)

Hlavní částí řídicí logiky serveru je algoritmus Model Predictive Control. Jeho úkolem je najít ekonomicky nejvýhodnější plán nabíjení a vybíjení baterie pro následujících 24 až 48 hodin. Algoritmus pracuje v rozlišení 15 minut a bere v úvahu predikce výroby, spotřeby a aktuální spotové ceny.

Pro implementaci byl zvolen framework `CVXPY`. Tento nástroj umožňuje přehlednou formulaci konvexních optimalizačních úloh a využívá výkonné řešiče, jako jsou ECOS nebo OSQP. Celá úloha je definována jako lineární nebo kvadratické programování.

Optimalizace se spouští každých 15 minut. Systém nejprve vyčte z databáze nejnovější reálnou hodnotu stavu nabití baterie (SOC), což uzavírá zpětnou vazbu regulační smyčky. Následně solver sestaví rovnice v maticovém tvaru a spustí výpočet. Výsledný vektor optimálních stavů baterie systém extrahuje, zaokrouhlí na dvě desetinná místa a zabalí do binárního řídicího balíčku pro mikrokontrolér.

3.5.4 Automatizace a plánovač úloh (Scheduler)

Pro plně autonomní běh serverové aplikace bez nutnosti zásahu uživatele byl implementován interní plánovač úloh. Jeho hlavní rolí je řízení periodických procesů na pozadí. Plánovač zajišťuje časovou synchronizaci při stahování externích dat a pravidelně spouští výpočetně náročné predikční a optimalizační algoritmy.

Architektura plánovače

Plánovač běží jako samostatné asynchronní vlákno paralelně s hlavním procesem, který poskytuje REST API rozhraní. Toto oddělení zaručuje, že výpočet neuronové sítě nebo stahování dat nezablokuje webový server. Mikrokontroléry tak mohou bez prodlev stahovat své řídicí balíčky.

Každá spouštěná úloha je ošetřena ochranným blokem pro zachycení výjimek (**try-except**). Selhání jedné konkrétní úlohy, například kvůli chybě spojení při stahování cen, proto nepůsobí pád celého plánovacího vlákna.

Harmonogram procesů

Jednotlivé úlohy jsou rozvrženy do tří základních kategorií podle frekvence jejich spouštění. Výpočetní výkon serveru se tím distribuuje rovnoměrně a algoritmus MPC pracuje vždy s aktuálními daty:

- **Výpočet MPC a generování balíčků:** Úloha se spouští v 00, 15, 30 a 45. minutě každé hodiny. Proces načte aktuální stav nabití z telemetrie a zavolá optimalizační řešič v prostředí CVXPY. Ten vypočítá ideální profil na následujících 24 hodin a vygeneruje nové akční binární soubory pro koncová zařízení.
- **Aktualizace počasí a predikce výroby:** Server dotazuje meteorologické API každé 3 hodiny (počínaje časem 00:00). Následně se spustí inference neuronové sítě, která vygeneruje novou křivku předpokládané výroby fotovoltaiky pro nadcházející dny. Vyšší frekvence by u meteorologických modelů nepřinesla vyšší přesnost. Tříhodinový interval však dokáže rychle reagovat na změny počasí.
- **Predikce spotřeby objektu:** Tato úloha se spouští jednou denně v 00:05. Na základě polynomičtých modelů a kalendářních údajů, jako jsou typ dne a svátky, vypočítá základní profil spotřeby domácnosti pro nový den.
- **Stažení spotových cen OTE:** Úloha se spouští denně ve 14:00, kdy operátor trhu obvykle zveřejňuje pevné ceny pro následující den. Pokud je stahování neúspěšné kvůli výpadku serveru poskytovatele, plánovač akci opakuje v záchranném okně ve 20:00.

Přehledné shrnutí časového harmonogramu a frekvence spouštění úloh v rámci denního cyklu je uvedeno v tabulce 3.4.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Tabulka 3.4: Denní harmonogram spouštění úloh plánovače

Čas spuštění	Frekvence	Spouštěná úloha
xx:00, 15, 30, 45	15 minut	Výpočet MPC optimalizace a vygenerování řídicích balíčků pro MCU.
00:00 (a každé 3 h)	3 hodiny	Stažení předpovědi počasí (Open-Meteo) a spuštění inference neuronové sítě pro predikci výroby.
00:05	1x denně	Výpočet predikce spotřeby objektu na základě matematických modelů a kalendáře.
14:00	1x denně	Stažení spotových cen z denního trhu operátora OTE.
20:00	Záchranná	Dodatečné stažení spotových cen v případě výpadku ve 14:00.

Díky tomuto rozvržení má řídicí systém v každém 15minutovém kroku k dispozici nejčerstvější data pro ekonomicky optimální rozhodování. Systém přitom nadbytečně nepřetěžuje externí API rozhraní ani zbytečně nevytěžuje databázi.

3.5.5 Komunikace s mikrokontrolérem

Posledním krokem v řetězci serverové logiky je efektivní a bezpečné předání vypočítaného řídicího plánu (výstupu MPC) do koncového mikrokontroléru. Komunikační vrstva musí zohledňovat hardwarová omezení edge architektury, jako jsou omezená velikost paměti RAM a nižší výpočetní výkon. Dále musí být odolná proti případné nestabilitě domácího síťového připojení.

Agregace dat a sjednocení časových řad

Přestože v současné konfiguraci systému probíhá výpočet optimalizačního algoritmu na backendovém serveru, dlouhodobým cílem je kompletní přechod této výpočetní zátěže přímo na lokální mikrokontrolér. Z tohoto důvodu je datová struktura navržena s ohledem na budoucí lokalizaci výpočtů. Při přípravě datových balíčků se proto neuvažuje pouze s jednosměrným odesíláním výsledných akčních zásahů z optimalizace MPC, ale v rámci binárního paketu se do paměti MCU přenášejí i kompletní profily exogenních veličin. Mikrokontrolér tak získává surová data o budoucích spotových cenách a predikcích výroby a spotřeby v jednotlivých 15 minutových krocích, což tvoří nezbytný základ pro případné sestavení optimalizační matice přímo v paměti vestavného systému.

Vstupní data na straně serveru mají různé časové rozlišení. Meteorologická data a predikce výroby jsou generovány po hodinách, zatímco spotové ceny jsou dostupné po čtvrt hodinách. Pro účely exekuce plánu v mikrokontroléru je nutné tyto rozdílné časové řady synchronizovat.

Před odesláním server veškerá data (výrobu, spotřebu, ceny i cílové stavy baterie) agreguje a interpoluje do jednotných 15 minutových bloků. Výsledkem je lineární pole

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

96 záznamů, které pokrývá predikční a řídicí horizont na následujících 24 hodin.

Návrh a serializace do binárního protokolu

Běžné textové formáty pro přenos dat, jako jsou JSON nebo XML, s sebou nesou velkou režii kvůli přenosu metadat. Syntaktická analýza takových souborů by neúměrně zatěžovala paměť a procesor mikrokontroléru.

Pro přenos byl proto navržen binární protokol, který strukturu dat serializuje do podoby nízkoúrovňových typů jazyka C. Serializaci na straně serveru zajišťuje Python modul `struct`, který data pakuje do formátu Little-Endian.

Struktura přenášeného paketu se skládá z pevné hlavičky a samotného těla (payload):

- **Hlavička (Header):** Obsahuje identifikační řetězec (např. `ACTN` pro řídicí povely), číslo verze protokolu, časovou značku báze (Base Unix Timestamp) a informaci o počtu přiložených záznamů.
- **Tělo paketu (Payload):** Skládá se z pole s předem definovanou délkou, kde jeden 15 minutový blok zabírá pouze několik bajtů. Obsahuje například index časového kroku, požadované cílové nabití baterie jako 16bitové celé číslo bez znaménka a bitovou masku pro případné spínání reléových výstupů.

Tento přístup umožňuje zmenšit datový balíček pro celý den do stovek bajtů. Mikrokontrolér jej po stažení může okamžitě překopírovat do operační paměti bez nutnosti složitěho parsování.

Zabezpečení integrity dat pomocí kontrolního součtu

Při přenosu dat v lokální síti může dojít ke ztrátě nebo poškození jednotlivých bajtů. Pokud by mikrokontrolér vykonal poškozený příkaz, mohlo by dojít k poškození baterie nebo k nežádoucím přetokům do sítě.

Pro zamezení tohoto rizika obsahuje protokol ochranný prvek ve formě cyklického redundantního součtu. K tělu každého generovaného balíčku server připojuje 16bitový kontrolní součet typu `CRC-16`. Mikrokontrolér po stažení souboru provede stejný výpočet. Pokud se přijatý součet neshoduje s lokálně vypočítaným, paket se z bezpečnostních důvodů zahodí a proces stahování se opakuje.

Zabezpečení API a autorizace koncových zařízení

Zpřístupnění datových struktur do sítě internet vyžaduje implementaci bezpečnostních mechanismů. V architektuře, kde server obsluhuje více nezávislých domácností, je nutné zajistit ochranu dat. Žádné zařízení nesmí přistupovat k datům cizí fotovoltaické elektrárny ani odesílat falešnou telemetrii.

REST API rozhraní postavené na frameworku FastAPI implementuje autorizaci na úrovni HTTP hlaviček. Při registraci nového uživatele vytvoří kryptograficky bezpečný generátor

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

v databázi unikátní 32znakový hexadecimální klíč. Mikrokontrolér musí tento klíč přiložit ke každému požadavku v hlavičce **X-API-Key**.

Server přijatou hlavičku zachytí a ověří její platnost vůči databázi. V případě chybějícího nebo neplatného klíče požadavek odmítne. Po úspěšné autorizaci server odešle unikátní binární soubor určený výhradně pro daného uživatele.

3.5.6 Administrační webové rozhraní

Pro efektivní správu celého systému bylo nad frameworkem FastAPI implementováno administrační webové rozhraní. Toto grafické uživatelské rozhraní (GUI) zamezuje nutnosti přímých zásahů administrátora do relační databáze, čímž se předchází vzniku chyb. Rozhraní slouží primárně k obsluze životního cyklu koncových zařízení, správě uživatelských profilů a k importu matematických modelů.

Správa odběrných míst a generování autorizačních klíčů

Proces registrace nového odběrného místa s mikrokontrolérem je plně automatizován pomocí webového formuláře. Administrátor do systému zadává klíčové parametry, které jsou nutné pro chod výpočetních modelů. Mezi tyto parametry patří geografické souřadnice pro stahování předpovědi z Open-Meteo API a konfigurace fotovoltaických panelů, konkrétně jejich počet, azimut a sklon.

Bezprostředně po odeslání a validaci formuláře systém zapíše data do databázových tabulek. Pomocí knihovny **secrets** následně vygeneruje unikátní 32 znakový autorizační klíč. Tento klíč se administrátorovi jednorázově zobrazí na obrazovce jako potvrzení o vytvoření profilu. Z tohoto rozhraní se klíč zkopíruje a pevně se vloží (hardcoded) do zdrojového kódu firmwaru pro daný mikrokontrolér STM32. Tímto postupem se zajistí bezpečné spárování hardwaru se serverovým účtem bez nutnosti posílat klíče přes nezabezpečené kanály.

Import a validace modelů spotřeby

Parametry střech lze do systému zadat manuálně. Matematický model spotřeby objektu je však tvořen desítkami koeficientů kvadratických polynomů. Každý uživatel vyžaduje 48 sad koeficientů, protože pro každou hodinu v pracovních dnech a o víkendech platí odlišná kvadratická rovnice. Manuální zadávání takového množství dat by bylo neefektivní a hrozilo by riziko překlepů.

Z toho důvodu administrační rozhraní obsahuje nástroj pro hromadný import těchto parametrů pomocí souborů ve formátu CSV (*Comma-Separated Values*).

Proces importu podléhá striktní validační logice. Při nahrání souboru na server probíhají následující kontroly:

- **Strukturální validace:** Kontrola přítomnosti všech vyžadovaných hlaviček sloupců, jako je identifikátor hodiny, typ dne, koeficienty a, b, c a omezující 95 % průměr.
- **Datová validace:** Ověření, zda jsou všechny koeficienty platného číselného typu

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

s plovoucí desetinnou čárkou (Float) a zda nechybí některé hodnoty (NaN).

- **Logická validace:** Zajištění, že soubor obsahuje kompletní matici dat pro všech 24 hodin a oba typy dnů.

Pokud nahraný soubor neprojde byť jen jedním krokem kontroly, databázová transakce se zruší a rozhraní vrátí detailní chybové hlášení. Tento robustní přístup chrání integritu databáze. Zabraňuje tak selhání optimalizačního algoritmu MPC, který je na správnosti těchto koeficientů závislý. Po úspěšné validaci se záznamy hromadně vloží do tabulky `ConsumptionModel` a spojí se s identifikátorem daného uživatele.

3.5.7 Závěrečné zhodnocení a možnosti dalšího rozvoje

Navržená a implementovaná serverová část představuje robustní výpočetní jádro celého systému energetického managementu. Přijatá koncepce Cloud-Edge computingu prokázala zásadní výhody v oddělení výpočetně náročné logiky od koncového hardwaru. Přesunem algoritmů strojového učení (PyTorch) a konvexní optimalizace (CVXPY) na server bylo dosaženo stavu, kdy mikrokontrolér STM32 není limitován svou pamětí ani výpočetním výkonem, a funguje čistě jako deterministický vykonavatel optimalizované trajektorie a sběrač telemetrických dat.

Kombinace asynchronního REST API (FastAPI), relační databáze a vlastního binárního protokolu navíc zajišťuje minimalizaci datových přenosů a vysokou spolehlivost celého řešení. Implementované záchranné mechanismy (fallbacky) zároveň garantují kontinuitu řízení i při výpadcích externích služeb třetích stran.

Prostor pro budoucí vylepšení

Přestože je současná architektura plně funkční a připravená na reálný provoz, její modulární návrh nabízí široké možnosti dalšího rozvoje. V rámci budoucí práce lze systém rozšířit o následující funkcionality:

- **Automatizované přetrénování neuronových sítí:** Systém v současnosti využívá předtrénovaný model s fixními vahami. Nashromážděná telemetrická data z reálného provozu (tabulka `InverterSample`) představují ideální datovou sadu pro zavedení kontinuálního učení. Budoucím vylepšením by bylo vytvoření automatizované pipeline, která by modely v pravidelných intervalech (např. jednou měsíčně) dotrénovala, čímž by systém dokázal maximálně využít nashromážděná data.
- **Prezentační uživatelské rozhraní:** Ačkoliv systém disponuje administračním GUI pro správu parametrů, koncový uživatel postrádá vizualizaci svého hospodaření s energií. Implementace moderního webového dashboardu by uživateli umožnila sledovat aktuální stav baterie, finanční úspory z algoritmického obchodování na spotovém trhu a interaktivní grafy porovnávající predikci s realitou.
- **Zvýšení granularity MPC řízení (5minutový krok):** Současná optimalizace pracuje s 15minutovými bloky, které odpovídají obchodním intervalům operátora trhu (OTE). Přechod algoritmu MPC na 5minutový časový krok by přinesl výrazně vyšší reaktivitu na rychlé změny (např. přechod mraků, krátkodobé spuštění energeticky náročných spotřebičů typu rychlovarná konvice).

3.6 Návrh a formulace algoritmu prediktivního řízení (MPC)

Tato kapitola je zaměřena na komplexní algoritmičtý návrh a matematickou formulaci modelového prediktivního řízení (MPC) určeného pro optimalizaci energetických toků v rezidenčním objektu. Cílem navrženého řízení je minimalizace celkových finančních nákladů na elektrickou energii při striktním zachování uživatelského tepelného komfortu a respektování fyzikálních limitů akumulačních subsystémů. Algoritmus musí v reálném čase dynamicky reagovat na predikovanou výrobu fotovoltaické elektrárny, predikovanou spotřebu domácnosti a zejména na fluktuace spotových cen na vnitrodenním energetickém trhu.

Vzvodem k tomu, že obecné teoretické principy prediktivní regulace a koncept klouzavého horizontu byly popsány v řešební části této práce (viz kapitola 2.3), navazuje tento text přímou aplikací na konkrétní systém.

Následující podkapitoly popisují sestavení matematického modelu v lineárním stavovém prostoru, fyzikální odvození termodynamických modelů objektu různých řádů a transformaci spojitého fyzikálního popisu do diskretní maticové struktury. Zvláštní pozornost je věnována identifikaci a eliminaci strukturální singularity stavového prostoru, která vzniká v důsledku integrální povahy ideálního akumulátoru energie. Dále je pozornost věnována matematickému rozbalení predikčních rovnic, definování tvrdých i měkkých omezení a formulaci konvexní účelové funkce.

3.6.1 Formulace matematického modelu v lineárním stavovém prostoru

Pro návrh a implementaci prediktivního řízení (MPC) je nezbytné popsat dynamické chování celého energetického systému domácnosti pomocí matematického modelu. Obecný matematický zápis takového systému s krokem vzorkování Δt je definován rovnicemi:

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k + G_d w_k \quad (3.12)$$

$$y_k = C_d x_k + D_d u_k \quad (3.13)$$

kde $x_k \in \mathbb{R}^n$ reprezentuje stavový vektor systému v diskretním čase k , $u_k \in \mathbb{R}^m$ je vektor řídicích (akčních) veličin, $w_k \in \mathbb{R}^p$ definuje vektor měřitelných exogenních poruch působících na systém a $y_k \in \mathbb{R}^q$ je vektor výstupních veličin. Matice A_d , B_d , G_d , C_d a D_d jsou diskretní systémové matice příslušných rozměrů.

Definice stavových, řídicích a poruchových veličin

Stavový vektor x_k sdružuje klíčové akumulační veličiny systému, které jednoznačně popisují energetickou bilanci a vnitřní stav objektu v daném okamžiku. Řídicí vektor u_k obsahuje akční zásahy, které mikrokontrolér aktivně vynucuje, a vektor poruch w_k integruje veličiny ovlivňující systém zvnějšku, jejichž hodnoty jsou získávány z predikčních modelů. Veličiny jsou definovány následovně:

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

$$x_k = \begin{bmatrix} E_{\text{bat},k} \\ T_{\text{house},k} \\ T_{\text{floor},k} \\ T_{\text{TUV},k} \end{bmatrix}, \quad u_k = \begin{bmatrix} P_{\text{ch},k} \\ P_{\text{dis},k} \\ P_{\text{heat},k} \\ P_{\text{TUV},k} \end{bmatrix}, \quad w_k = \begin{bmatrix} P_{\text{pv},k} \\ P_{\text{load},k} \\ T_{\text{out},k} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Popis jednotlivých proměnných včetně jejich fyzikálních jednotek je uveden níže:

- $E_{\text{bat},k}$ [Wh] ... Množství elektrické energie uložené v bateriovém úložišti.
- $T_{\text{house},k}$ [°C] ... Vnitřní teplota vzduchu v obytné zóně objektu.
- $T_{\text{floor},k}$ [°C] ... Teplota podlahy.
- $T_{\text{TUV},k}$ [°C] ... Teplota teplé užitkové vody (TUV) v akumulčním bojleru.
- $P_{\text{ch},k}, P_{\text{dis},k}$ [W] ... Nabíjecí a vybíjecí výkon baterie. Tyto veličiny jsou uvažovány jako separátní a nezáporné z důvodu linearit.
- $P_{\text{heat},k}$ [W] ... Elektrický příkon topného systému (tepelného čerpadla, nebo elektrokotle).
- $P_{\text{TUV},k}$ [W] ... Elektrický příkon bojleru.
- $P_{\text{pv},k}$ [W] ... Predikovaný generovaný výkon fotovoltaických panelů.
- $P_{\text{load},k}$ [W] ... Predikovaný výkon spotřeby v domácnosti bez kontrolovaných spotřebičů.
- $T_{\text{out},k}$ [°C] ... Venkovní teplota vzduchu.

Termodynamické modely subsystémů a odvození ODR

Dynamika akumulace elektrické energie v lithiovém akumulátoru (LFP) je standardně popsána jako čistý integrátor výkonu v čase s uvažováním účinnosti nabíjení η_{ch} a vybíjení η_{dis} . Z hlediska teorie řízení však tato ideální integrální vazba generuje nulový řádek v matici systému, což vede k její singularitě a vážným numerickým nestabilitám při optimalizaci na delším horizontu.

Pro zamezení tohoto jevu a zajištění striktní regularity matic byla do matematického popisu zavedena fyzikálně obhajitelná regularizace ve formě koeficientu přirozeného samovybíjení α_{self} [s⁻¹]. Upravená obyčejná diferenciální rovnice baterie má potom tvar:

$$\frac{dE_{\text{bat}}(t)}{dt} = -\alpha_{\text{self}}E_{\text{bat}}(t) + \eta_{\text{ch}}P_{\text{ch}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}}P_{\text{dis}}(t) \quad (3.15)$$

Zavedením velmi malé nenulové disipativní konstanty α_{self} se posunou vlastní čísla systému mimo počátek komplexní roviny, což odstraňuje singularitu, aniž by došlo k měřitelnému zkreslení reálného ekonomického chování systému.

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

Pro modelování tepelné setrvačnosti budovy a jejího topného systému se v praxi využívá ekvivalentních RC schémat. V závislosti na přítomnosti velkoplošného podlahového vytápění se rozlišují dva přístupy k popisu objektu:

A. Varianta s otopnými tělesy / bez podlahového vytápění (Model ODR 1. řádu) Pokud objekt využívá nízkokapacitní otopná tělesa (radiátory, fancoily), je dynamika vnitřního vzduchu popsána obyčejnou diferenciální rovnicí prvního řádu. Celý dům je aproximován jednou tepelnou kapacitou C_{house} , která ztrácí energii prostupem přes tepelný odpor obálky budovy R_{house} do okolního prostředí o teplotě T_{out} :

$$C_{\text{house}} \frac{dT_{\text{house}}(t)}{dt} = \frac{T_{\text{out}}(t) - T_{\text{house}}(t)}{R_{\text{house}}} + COP \cdot P_{\text{heat}}(t) \quad (3.16)$$

kde COP (Coefficient of Performance) představuje topný faktor tepelného čerpadla, který transformuje elektrický příkon na tepelný výkon.

B. Varianta s podlahovým vytápěním (Model ODR 2. řádu) Při instalaci teplovodního nebo elektrického podlahového vytápění představuje masivní betonová nebo anhydritová vrstva podlahy dominantní prvek tepelné akumulace s velkým časovým zpožděním. Systém je proto popsán modelem druhého řádu (dvoukapacitní RC model). Elektrický příkon primárně ohřívá kapacitu podlahy C_{floor} , ze které se teplo s vnitřním prostupovým odporem R_{floor} předává do tepelné kapacity vzduchu C_{house} :

$$C_{\text{floor}} \frac{dT_{\text{floor}}(t)}{dt} = P_{\text{heat}}(t) - \frac{T_{\text{floor}}(t) - T_{\text{house}}(t)}{R_{\text{floor}}} \quad (3.17)$$

$$C_{\text{house}} \frac{dT_{\text{house}}(t)}{dt} = \frac{T_{\text{floor}}(t) - T_{\text{house}}(t)}{R_{\text{floor}}} - \frac{T_{\text{house}}(t) - T_{\text{out}}(t)}{R_{\text{house}}} \quad (3.18)$$

Dynamika ohřevu teplé vody v bojleru s tepelnou kapacitou vody C_{dhw} a koeficientem tepelných ztrát pláště R_{dhw} do vnitřního prostředí o teplotě T_{house} je definována jako:

$$C_{\text{TUV}} \frac{dT_{\text{TUV}}(t)}{dt} = \eta_{\text{TUV}} P_{\text{TUV}}(t) - \frac{T_{\text{TUV}}(t) - T_{\text{house}}(t)}{R_{\text{TUV}}} - \dot{Q}_{\text{draw}}(t) \quad (3.19)$$

kde η_{TUV} je účinnost topné spirály a $\dot{Q}_{\text{draw}}(t)$ představuje stochastickou poruchu způsobenou nárazovým odběrem teplé vody uživatelem.

Sestavení spojitých a diskrétních stavových matic

Sjednocením výše uvedených diferenciálních rovnic (3.15) až (3.19) pro variantu vyššího řádu (s podlahovým vytápěním) získáváme maticový zápis spojitého stavového prostoru $\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t) + G_c w(t)$. Díky zavedené regularizaci samovybíjení baterie má

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

spojitá systémová matice A_c plnou hodnotu a její struktura je definována následovně:

$$A_c = \begin{bmatrix} -\alpha_{\text{self}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{1}{R_{\text{house}}C_{\text{house}}} + \frac{1}{R_{\text{floor}}C_{\text{house}}}\right) & \frac{1}{R_{\text{floor}}C_{\text{house}}} & \frac{1}{R_{\text{TUV}}C_{\text{house}}} \\ 0 & \frac{1}{R_{\text{floor}}C_{\text{floor}}} & -\frac{1}{R_{\text{floor}}C_{\text{floor}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{\text{TUV}}C_{\text{TUV}}} & 0 & -\frac{1}{R_{\text{TUV}}C_{\text{TUV}}} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$B_c = \begin{bmatrix} \eta_{\text{ch}} & -\frac{1}{\eta_{\text{dis}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_{\text{floor}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\eta_{\text{TUV}}}{C_{\text{TUV}}} \end{bmatrix}, \quad G_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{\text{house}}C_{\text{house}}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Pro implementaci v řídicím serveru je nutné provést diskretizaci spojitého modelu s pevnou periodou Δt . Přechod na diskrétní matice A_d , B_d a G_d je realizován exaktní integrací. Vzhledem k regularizaci matice A_c je zaručeno, že výsledné diskrétní matice jsou numericky stabilní a dobře podmíněné pro konvexní optimalizaci:

$$A_d = e^{A_c \Delta t}, \quad B_d = \left(\int_0^{\Delta t} e^{A_c \tau} d\tau \right) B_c, \quad G_d = \left(\int_0^{\Delta t} e^{A_c \tau} d\tau \right) G_c \quad (3.22)$$

3.6.2 Formulace účelové funkce a optimalizačního kritéria

Základním principem modelového prediktivního řízení v této aplikaci je minimalizace celkových provozních nákladů domácnosti na elektrickou energii na uvažovaném predikčním horizontu N . Optimalizační algoritmus hledá takovou sekvenci akčních zásahů U , která minimalizuje navrženou účelovou funkci J , jež v sobě kombinuje čisté finanční toky na spotovém trhu, penalizaci degradace bateriového úložiště, ohodnocení koncového stavu energie a měkké penalizace za nedodržení uživatelského tepelného komfortu.

Zajištění konvexity a bilance na rozhraní sítě

Při obchodování na spotovém trhu se výkon odebíraný ze sítě a výkon dodávaný do sítě oceňují odlišně. Zatímco nákup je zatížen distribučními poplatky, zisk z prodeje je naopak ponížen o fixní poplatek dodavateli za vykoupenou energii. Výsledný výkon na patě domu $P_{\text{grid},k}$ je dán Kirchhoffovým zákonem:

$$P_{\text{grid},k} = P_{\text{load},k} + P_{\text{ch},k} + P_{\text{heat},k} + P_{\text{TUV},k} - P_{\text{pv},k} - P_{\text{dis},k} \quad (3.23)$$

Pokud by byl výkon $P_{\text{grid},k}$ ponechán jako jedna optimalizační proměnná, účelová funkce by pro finanční výpočty vyžadovala nelineární operátory. Z tohoto důvodu je proměnná matematicky rozdělena na dvě nezávislé, striktně nezáporné proměnné: $P_{\text{buy},k} \geq 0$

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

(nákup) a $P_{\text{sell},k} \geq 0$ (prodej). Bilanční rovnice přechází do tvaru:

$$P_{\text{buy},k} - P_{\text{sell},k} = P_{\text{load},k} + P_{\text{ch},k} + P_{\text{heat},k} + P_{\text{TUV},k} - P_{\text{pv},k} - P_{\text{dis},k} \quad (3.24)$$

Sestavení celkové účelové funkce

Na základě poznatků z rešerše o stárnutí LFP akumulátorů je nutné do algoritmizace zahrnout jak cyklické opotřebení, tak kalendářní degradaci. Pro zajištění uživatelského komfortu jsou do funkce integrovány penalizace odchylek vnitřní teploty objektu a teploty TUV od požadovaných žádaných hodnot. Dále je nezbytné ošetřit přirozenou vlastnost optimalizace na konečném horizontu (tzv. efekt konce horizontu), kdy má algoritmus tendenci baterii na konci predikčního okna zcela vyčerpat, neboť nezná budoucí potřebu energie za hranicí kroku N .

Celková účelová funkce J je proto definována jako suma nákladů a penalizací napříč celým predikčním horizontem rozšířená o terminální ohodnocení koncového stavu baterie:

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} [J_{\text{grid},k} + J_{\text{cyc},k} + J_{\text{cal},k} + J_{\text{comf},k}] \Delta t + J_{\text{term}} \quad (3.25)$$

kde jednotlivé dílčí složky představují:

Finanční toky se sítí ($J_{\text{grid},k}$) Vyjadřují celkovou platbu za nakoupenou elektřinu a zisk z jejího prodeje snížený o poplatek obchodníkovi:

$$J_{\text{grid},k} = (c_{\text{spot},k} + c_{\text{dist}}) P_{\text{buy},k} - (c_{\text{spot},k} - c_{\text{poplatek,dodav}}) P_{\text{sell},k} \quad (3.26)$$

Penalizace cyklického stárnutí ($J_{\text{cyc},k}$) Lineární závislost na ampérhodinové propustnosti, omezující nežádoucí mikrocyklování baterie z důvodu zanedbatelných cenových rozdílů:

$$J_{\text{cyc},k} = c_{\text{wear}} (P_{\text{ch},k} + P_{\text{dis},k}) \quad (3.27)$$

Penalizace kalendářního stárnutí a přebíjení ($J_{\text{cal},k}$) Jednostranná kvadratická penalizace aktivní pouze při překročení doporučeného limitu SoC_{90} (např. 90 %), která omezuje růst pasivační vrstvy SEI při vysokých stavech nabití. V konvexní optimalizaci je implementována pomocí pomocné nezáporné proměnné $s_{\text{cal},k} \geq 0$:

$$J_{\text{cal},k} = w_{\text{high}} \cdot s_{\text{cal},k}^2 \quad (3.28)$$

s omezující podmínkou: $s_{\text{cal},k} \geq SoC_k - SoC_{90}$.

Penalizace porušení uživatelského komfortu ($J_{\text{comf},k}$) Reprezentuje měkká omezení pro udržování vnitřní teploty domu a teploty teplé užitkové vody blízko žádaných

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

hodnot. Kvadratická penalizace zajišťuje, že malé odchylky jsou tolerovány, avšak velké odchylky jsou restriktivně potlačovány. K zachování konvexity jsou zavedeny nezáporné pomocné proměnné odchylek $s_{\text{house},k}$ a $s_{\text{TUV},k}$:

$$J_{\text{comf},k} = w_{\text{house}} \cdot s_{\text{house},k}^2 + w_{\text{TUV}} \cdot s_{\text{TUV},k}^2 \quad (3.29)$$

Terminální ohodnocení stavu nabití (J_{term}) Zabraňuje efektu konce horizontu přiřazením virtuální finanční hodnoty zbytkové energii v baterii v posledním kroku N . Zůstatková energie je naceněna průměrnou spotovou cenou c_{avg} , což motivuje algoritmus ponechat energii uloženou pro navazující optimalizační okno:

$$J_{\text{term}} = -c_{\text{avg}} E_{\text{bat},N} \quad (3.30)$$

Popis využitých parametrů a koeficientů:

- $c_{\text{spot},k}$ [Kč/kWh] – Predikovaná spotová cena silové elektřiny v čase k .
- c_{dist} [Kč/kWh] – Regulovaná složka, daně a distribuční poplatky uplatněné při nákupu.
- $c_{\text{poplatek},\text{dodav}}$ [Kč/kWh] – Poplatek obchodníkovi za výkup energie.
- c_{wear} [Kč/kWh] – Cena cyklického opotřebení jedné kilowatthodiny proteklé baterií.
- w_{high} [Kč/%²] – Váhový koeficient penalizace vysokého stavu nabití.
- w_{house} [Kč/°C²] – Váhový koeficient penalizace odchylky teploty v domě od žádané hodnoty.
- w_{TUV} [Kč/°C²] – Váhový koeficient penalizace odchylky teploty TUV od žádané hodnoty.
- c_{avg} [Kč/kWh] – Průměrná predikovaná tržní cena použitá pro zhodnocení terminálního stavu.

Formulace tvrdých a měkkých omezujících podmínek

Aby mohl optimalizační solver korektně vyřešit úlohu kvadratického programování, musí být matematicky definovány hranice stavového prostoru. Ty jsou rozděleny na striktní tvrdá omezení (hard constraints), reprezentující fyzikální limity prvků, a uživatelská měkká omezení (soft constraints).

Tvrdá omezení systému jsou definována fyzikálními limity kapacity akumulátoru, maximálními akčními zásahy měniče a mezními technologickými/bezpečnostními teplo-

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

tami:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{bat}, \min} &\leq E_{\text{bat}, k} \leq E_{\text{bat}, \max} \\
 0 &\leq P_{\text{ch}, k} \leq P_{\text{ch}, \max} \\
 0 &\leq P_{\text{dis}, k} \leq P_{\text{dis}, \max} \\
 T_{\text{house}, \min} &\leq T_{\text{house}, k} \leq T_{\text{house}, \max} \\
 T_{\text{TUV}, \min} &\leq T_{\text{TUV}, k} \leq T_{\text{TUV}}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Kde pro referenční rezidenční objekt jsou nastaveny striktní teplotní limity $T_{\text{house}, \min} = 21, 0^\circ\text{C}$, $T_{\text{house}, \max} = 23, 5^\circ\text{C}$ pro vnitřní prostor a $T_{\text{TUV}, \min} = 40, 0^\circ\text{C}$, $T_{\text{dhw}, \max} = 65, 0^\circ\text{C}$ pro zásobník TUV.

Měkká omezení tepelného komfortu jsou vázána na požadovanou žádanou teplotu (např. $T_{\text{set}, \text{house}} = 22, 5^\circ\text{C}$ a $T_{\text{set}, \text{TUV}} = 50, 0^\circ\text{C}$) a do optimalizační úlohy vstupují přes rovnicové vazby pro pomocné proměnné $s_{\text{house}, k}$ a $s_{\text{TUV}, k}$:

$$\begin{aligned}
 s_{\text{house}, k} &\geq T_{\text{house}, k} - T_{\text{set}, \text{house}} \\
 s_{\text{house}, k} &\geq T_{\text{set}, \text{house}} - T_{\text{house}, k} \\
 s_{\text{TUV}, k} &\geq T_{\text{TUV}, k} - T_{\text{set}, \text{TUV}} \\
 s_{\text{TUV}, k} &\geq T_{\text{set}, \text{TUV}} - T_{\text{TUV}, k} \\
 s_{\text{house}, k} &\geq 0, \quad s_{\text{TUV}, k} \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

Tyto lineární nerovnosti v kombinaci s kvadratickým členem v účelové funkci zaručují, že solver minimalizuje absolutní hodnotu odchylky teplot od ideálního stavu. Pokud je to však ekonomicky výhodné (např. extrémně drahá špička na spotovém trhu), solver dovolí teplotě mírně zakolísat v rámci měkkého pásma, ale nikdy nepřekročí tvrdé limity nastavené v rovnicích ((3.31 a 3.32)). Výsledná matematická struktura plně zachovává vlastnosti konvexity, což zaručuje rychlé a stabilní nalezení globálního minima optimalizace.

3.6.3 Verifikace a vyhodnocení funkce optimalizačního algoritmu

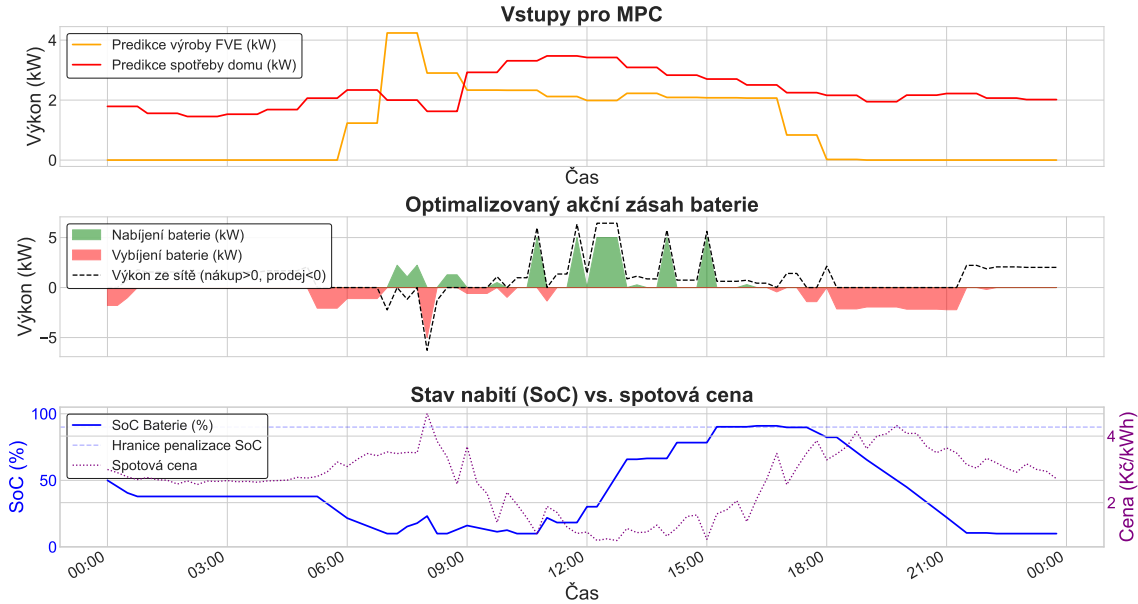
Pro ověření funkčnosti a matematické stability navrženého prediktivního řízení byla provedena série simulací na reálných historických datech spotřeby domácnosti a výroby fotovoltaické elektrárny s krokem vzorkování $\Delta t = 15 \text{ min}$. Hlavním cílem této sekce je analýza chování optimalizátoru při reakci na dynamicky se měnící spotové ceny a ověření, zda algoritmus korektně implementuje ekonomické priority definované v účelové funkci (3.25).

Při samotné verifikaci je nutné zdůraznit, že optimalizační algoritmus byl v této fázi spuštěn výhradně s uvažováním aktivního řízení vnitřních stavů bateriového úložiště, zatímco profily ostatních domácích spotřebičů (P_{heat} a P_{TUV}) byly uvažovány jako součást celkové predikované spotřeby objektu. K tomuto zjednodušení bylo přistoupeno z důvodu technologických omezení při reálné implementaci na testovaném objektu, kde technické řešení infrastruktury aktuálně umožňovalo přímé digitální řízení a vynucování pracovních

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

módů pouze na straně hybridního střídače. Baterie tak představuje jediný plně kontrolovaný akční člen v systému.

Typický průběh optimálních akčních zásahů a trajektorie stavu nabití (SoC) akumulátoru na 24hodinovém predikčním horizontu je znázorněn na grafu 3.8.



Graf 3.8: Simulace akčních zásahů MPC

Komplexní model pro MPC optimalizaci v sobě uvažuje:

- 1. Reakce na záporné a nízké spotové ceny:** V časových úsecích, kdy spotová cena silové elektřiny klesá k minimálním hodnotám, algoritmus aktivně vynucuje nabíjení baterie ze sítě (P_{buy}). Systém tak chytře akumuluje energii nejen z vlastních přebytků fotovoltaiky, ale také spekulativním nákupem z distribuční sítě, pokud je to ekonomicky výhodné i po přičtení distribučního poplatku c_{dist} a opotřebení baterie c_{wear} .
- 2. Řízení vybití v ranních a večerních špičkách:** V ranních a večerních hodinách, kdy spotové ceny na trhu dosahují lokálních maxim, algoritmus striktně zakazuje nákup energie ze sítě. Spotřeba domácnosti P_{load} je v těchto fázích plně kryta vybitím akumulátoru (P_{dis}). Pokud je v baterii dostatek energie a spotová cena převyší součet ceny opotřebení a poplatku dodavateli, optimalizátor nařizuje řízený prodej přebytků do sítě (P_{sell}) za účelem generování přímého finančního zisku.
- 3. Vliv penalizace cyklického stárnutí (c_{wear}):** Implementace lineárního členu opotřebení se projevila jako klíčový stabilizační prvek. Algoritmické řízení díky němu ignoruje drobné cenové fluktuace na trhu (v řádu haléřů), u kterých by zisk nepokryl reálné opotřebení lithiových článků. Baterie tak zůstává v klidovém stavu a spíná se pouze při signifikantních cenových rozdílech, což přímo prodlužuje fyzickou životnost úložiště.
- 4. Eliminace efektu konce horizontu pomocí J_{term} :** V konvenčních schématech prediktivního řízení bez terminálního ohodnocení vykazuje solver tendenci baterii v

posledním kroku horizontu (krok N) kompletně vybit, protože "nevidí" energetické potřeby následujícího dne. Na grafu 3.8 je vidět, že i přes tuto úpravu zůstává baterie vybitá. To je dáno nízkou průměrnou cenou v daném dni a algoritmus MPC tak počítá s tím, že vybití baterie bude výhodnější než ponechání rezervy akumulované energie.

3.7 Implementace řídicího firmwaru mikrokontroléru

V této kapitole je popsán návrh a implementace softwarové architektury mikrokontroléru STM32, který tvoří integrační uzel celého systému. Hlavním úkolem firmwaru je zajistit deterministické řízení energetických toků v reálném čase při současném zachování konektivity se vzdáleným serverem.

3.7.1 Architektura a hierarchie programu

Návrh softwarové architektury mikrokontroléru byl podmíněn požadavkem na vysokou míru spolehlivosti při řízení výkonových toků a nutností obsluhovat několik komunikačních rozhraní s odlišnými časovými konstantami. Pro implementaci byla zvolena modulární struktura s využitím vrstvy abstrakce hardwaru (*Hardware Abstraction Layer* – HAL), což umožňuje oddělit nízkourovňové řízení periférií od samotné aplikační logiky.

Hierarchické členění kódu

Software je rozdělen do tří logických vrstev, které zajišťují separaci odpovědnosti a usnadňují budoucí rozšiřitelnost systému:

1. **Aplikační vrstva:** Obsahuje moduly `app_main` a `system_state`. Tato vrstva realizuje rozhodovací procesy algoritmu MPC (Model Predictive Control), spravuje globální stav systému a koordinuje předávání dat mezi komunikačními moduly.
2. **Komunikační vrstva:** Zahrnuje moduly `server_comm` a `inverter_comm`. Tyto moduly zapouzdřují složitost jednotlivých protokolů (HTTP nad TCP/IP a Modbus RTU). Moduly neprovádějí žádná řídicí rozhodnutí, pouze transformují požadavky aplikační vrstvy na sekvenci telegramů pro konkrétní fyzické rozhraní.
3. **Ovladačová vrstva:** Skládá se z nízkourovňových knihoven výrobce (STM32 HAL) a specifických ovladačů pro externí periferie (WIZnet ioLibrary). Zajišťuje přímou manipulaci s registry periférií SPI, UART a GPIO.

Časový management a datové toky

Klíčovým prvkem hierarchie je sdílená datová struktura `SystemState_t` definovaná v souboru `system_state.h`. Ta funguje jako centrální „bod pravdy“, kde jsou uložena veškerá aktuální data z měniče, stažený prediktivní plán i akumulací registry pro telemetrii.

Z hlediska časování je běh programu rozdělen na dvě hlavní časové domény s rozdílnou periodicitou:

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

- **Regulační smyčka (perioda 5 s):** V tomto intervalu dochází k periodickému vyčtení aktuálních dat ze střídače (stav nabití baterie, aktuální výkon), porovnání těchto hodnot s cílovým stavem z MPC plánu a následnému zápisu akčního zásahu do registru měniče. Pětisekundový interval představuje kompromis mezi dynamikou řízení a eliminací zbytečného namáhání komunikační sběrnice a paměťových prvků střídače.
- **Telemetrická smyčka (perioda 5 min):** Po každých 60 průchodech regulační smyčkou dochází k agregaci nasbíraných vzorků, výpočtu aritmetických průměrů a asynchronnímu odeslání dat na vzdálený server. Toto předzpracování dat přímo v mikroprocesoru je klíčové pro snížení datového toku a zajištění kvalitních, vyhlazených vstupů pro následné trénování neuronových sítí určených k predikci spotřeby a výroby.

3.7.2 Komunikační rozhraní se serverem

Konektivita se vzdáleným serverem je klíčovým prvkem systému, který umožňuje realizaci prediktivního řízení na základě externích dat (spotové ceny, předpověď osvitů). Pro zajištění síťové komunikace byl zvolen externí radič WIZnet W5500, který v sobě integruje hardwarový TCP/IP stack, čímž výrazně snižuje výpočetní zátěž hlavního mikrokontroléru.

Fyzická a transportní vrstva

Propojení mikrokontroléru STM32 s radičem W5500 je realizováno pomocí sériového periferního rozhraní (SPI). Komunikace probíhá v režimu *Full-Duplex* s frekvencí hodin 20 MHz. Softwarová integrace využívá knihovnu `ioLibrary_Driver`, která poskytuje abstrakci nad registry čipu a implementuje standardní rozhraní typu BSD Sockets.

Transportní vrstva využívá protokol TCP (Transmission Control Protocol) pro zajištění spolehlivého doručení paketů. V rámci šetření systémovými prostředky jsou využívány dva dedikované hardwarové sockety:

- **Socket 0:** Určen pro periodické odesílání telemetrických dat (HTTP POST).
- **Socket 1:** Určen pro asynchronní stahování aktualizovaného prediktivního plánu (HTTP GET).

Binární komunikační protokol

Z důvodu minimalizace režie přenosu a zjednodušení parsování na straně MCU byl pro stahování plánu navržen vlastní binární protokol. Oproti textovým formátům (např. JSON) umožňuje tento přístup přímé mapování přijatých bajtů do struktur v paměti RAM pomocí ukazatelů.

Struktura řídicího paketu (označeného jako *Action Payload*) se skládá z fixní hlavičky a variabilního počtu datových záznamů. Hlavička začíná čtyřbajtovým identifikátorem (Magic Word) "ACTN", následuje verze protokolu, časová značka (*UNIX Timestamp*) a

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

počet záznamů. Každý záznam o délce 6 B obsahuje index 15minutového intervalu, cílové SOC baterie, masku relé a požadovaný výkon spotřebiče. Pro zajištění integrity dat je každý záznam i celá hlavička opatřena kontrolním součtem CRC16 Modbus.

Odesílání telemetrie

Zatímco příjem dat probíhá v binární formě, odesílání telemetrie směrem k serveru využívá standardní formát JSON v rámci HTTP POST požadavku. Tento formát byl zvolen pro lepší kompatibilitu s backendovými systémy serveru, kde probíhá archivace dat a následné dotrénování neuronových sítí. Odesílány jsou zprůměrované hodnoty výkonu a stavu nabití baterie za posledních 5 minut, což poskytuje dostatečné rozlišení pro energetickou analýzu při zachování nízkého datového toku.

3.7.3 Datová integrace a předzpracování

Efektivní řízení energetických toků vyžaduje přesná a stabilní data. Vzhledem k tomu, že měřené veličiny, jako je okamžitý výkon střídače nebo proud tekoucí do baterie, podléhají dynamickým změnám a měřicímu šumu, není vhodné pracovat s jednotlivými okamžitými vzorky pro účely dlouhodobé predikce a archivace.

Metodika vzorkování a akumulace

Aplikační logika mikrokontroléru STM32 pracuje s fixní vzorkovací periodou $T_s = 5\text{ s}$. V každém tomto kroku je z měniče vyčteno aktuální SOC (State of Charge) a okamžitý výkon P_{inv} [W]. Tato data jsou primárně využita pro rychlou regulační smyčku, ale zároveň vstupují do procesu akumulace.

V paměti RAM jsou definovány akumulární registry v rámci struktury `SystemState_t`. Pro výkon je využit 32bitový celočíselný formát (`int32_t`), který zabraňuje přetečení při sčítání až 60 vzorků i při maximálních výkonech střídače (v řádu desítek kW). Pro stav nabití baterie je využita akumulace ve formátu `float` pro zachování přesnosti na desetinná místa.

Výpočet průměrných hodnot a telemetrický interval

Pro účely telemetrie a následného strojového učení (např. pomocí sítí LSTM na straně serveru) byl stanoven standardní interval odesílání dat $T_{tel} = 5\text{ min}$. Tento interval odpovídá přesně 60 vzorkům při pětisekundovém čtení. Po naplnění akumulárního bufferu provede mikrokontrolér výpočet aritmetického průměru podle vztahu:

$$P_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad ; \quad SOC_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SOC_i \quad (3.33)$$

kde $N = 60$ je počet vzorků v jednom telemetrickém okně. Tento proces digitální

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

filtrace typu dolní propust účinně vyhlazuje krátkodobé špičky způsobené například ná-
běhovými proudy spotřebičů, které by pro potřeby energetického plánování představovaly
nežádoucí artefakty.

Význam pro neuronové sítě

Předzpracování dat přímo v místě měření výrazně snižuje požadavky na propustnost ko-
munikačního kanálu a ukládací kapacitu databáze. Z pohledu následného zpracování dat
neuronovými sítěmi je tento krok klíčový, neboť sítě pro predikci spotřeby a výroby vy-
žadují „vyčištěná“ data se stabilním časovým krokem. Pětiminutové průměry představují
optimální rozlišení pro zachování trendů spotřeby domácnosti při současné eliminaci sto-
chastických vlivů, což vede k vyšší úspěšnosti konvergence modelů při učení.

3.7.4 Komunikace s fotovoltaickým měničem

Pro získávání reálných dat o stavu energetického systému a pro následné uplatňování
řídících zásahů je mikrokontrolér přímo propojen s hybridním fotovoltaickým střídačem
Solax. Komunikace je realizována prostřednictvím průmyslové sběrnice RS-485 za využití
protokolu Modbus RTU.

Fyzická vrstva a řízení toku dat

Základem fyzické vrstvy je asynchronní sériová linka (UART) mikrokontroléru, která je
převedena na diferenciální signál sběrnice RS-485 pomocí externího budiče (transceiveru).
Vzhledem k poloduplexní povaze standardu RS-485 musí mikrokontrolér striktně řídit
směr toku dat (příjem/vysílání). K tomuto účelu byl vyhrazen dedikovaný GPIO pin
(PA8), který ovládá piny *Driver Enable* (DE) a *Receiver Enable* (RE) na budiči.

Před odesláním dotazu je pin nastaven do logické jedničky (režim vysílání) a bezpro-
středně po odeslání posledního bytu je přepnut do logické nuly, aby byla sběrnice uvolněna
pro odpověď střídače. Komunikační parametry byly nastaveny na rychlost 19200 Bd, 8
datových bitů, bez parity a s jedním stop bitem (8N1), což odpovídá výchozí konfiguraci
střídačů Solax.

Vyčítání provozních dat

Sběrnice je provozována v architektuře Master-Slave, kde STM32 vystupuje v roli řídicího
uzlu (Master) a střídač jako podřízené zařízení (Slave s výchozí adresou 0x01). Vyčítání
telemetrických dat probíhá s periodou 5 s pomocí funkce 0x04 (Read Input Registers).
Pro potřeby řídicího algoritmu jsou z mapy registrů vyčítány především hodnoty stavu
nabití baterie (SOC) z registru 0x001C (Battery Capacity) a okamžitý výkon baterie z
registru 0x0016 (Batpower_Charge1).

Nativní vzdálené řízení a ochrana hardwaru

Klíčovým inženýrským aspektem nadřazeného řízení střídačů je eliminace opotřebení jejich vnitřních nevolatilních pamětí (EEPROM/Flash), které mají omezený počet cyklů zápisu. Běžné přepínání pracovních režimů měniče (např. vynucení manuálního módu) často zapisuje konfiguraci do EEPROM, což je při periodickém řízení v řádu sekund nepřijatelné.

Tento problém byl vyřešen využitím dedikovaného registrového bloku pro vzdálené řízení střídače Solax v rozsahu adres 0x007C až 0x0088. Tyto registry fungují čistě jako volatilní holding registry (RAM) a jsou navrženy pro kontinuální aktualizaci parametrů.

Podle specifikace výrobce vyžaduje střídač zápis tohoto bloku jako jeden ucelený rámec pomocí Modbus funkce 0x10 (*Write Multiple Registers*). Firmware mikrokontroléru STM32 v každém cyklu sestavuje a odesílá paket o délce 35 B, kterým hromadně konfiguruje chování střídače bez jakéhokoliv hardwarového opotřebení paměťových komponent.

3.7.5 Algoritmus rychlé smyčky řízení baterie

Hlavním úkolem aplikační vrstvy firmwaru je interpretace staženého prediktivního plánu a jeho transformace na fyzické řídicí zásahy. Tento proces probíhá v deterministické regulační smyčce s periodou 5 s. Na rozdíl od primitivního dvoustavového spínání využívá firmware pokročilé nativní rozhraní střídače pro cílení kapacity baterie.

Časová synchronizace a autonomní režim

Na základě aktuálního času (*UNIX Timestamp*) udržovaného interním RTC modulem algoritmus neustále vyhodnocuje, který z 96 patnáctiminutových kroků denního MPC plánu je aktuálně platný (index 0 až 95).

Pokud systém detekuje, že plán vypršel, nebo dojde k poruše síťové komunikace se serverem, firmware z bezpečnostních důvodů okamžitě deaktivuje vzdálené řízení zapsáním hodnoty 0 do registru 0x007C (*ModbusPowerControl*). Střídač v tom okamžiku plynule přechází do plně **autonomního režimu** (*Self-use*), kdy se interní EMS střídače stará o dům na základě lokálních senzorů. Tím je zajištěna stoprocentní záložní funkčnost domácnosti i při totálním selhání nadřazeného systému.

Řízení pomocí cílového SOC a komunikační Watchdog

Pokud je stažený MPC plán validní, firmware aktivuje režim řízení podle cílové kapacity zapsáním hodnoty 3 (*Enable SOC target control*) do registru 0x007C. V rámci téhož zápisu funkce 0x10 je do registru 0x0083 (*TargetSoc*) předána hodnota požadovaného stavu nabití baterie pro aktuální patnáctiminutový blok. Nízkourovňovou proudovou regulaci a výkonové toky (zda nabíjet ze sítě či vybíjet) již interně řídí rychlé vestavěné algoritmy střídače, což zvyšuje stabilitu celého systému.

Z hlediska bezpečnosti a robustnosti řešení je klíčovým prvkem integrace registru 0x0088 (*RemoteCtrlTimeOut*). Do tohoto registru firmware periodicky zapisuje hodnotu

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

30 sekund. Tento parametr slouží jako komunikační *Watchdog* přímo uvnitř střídače. Pokud by mikrokontrolér STM32 utrpěl softwarový kolaps, nebo by došlo k poškození lokální kabeláže RS-485, střídač po 30 sekundách bez příchozího Modbus paketu z bezpečnostních důvodů vzdálené řízení sám ukončí. Tento mechanismus eliminuje riziko, že by střídač zůstal zablokovaný v nežádoucím stavu (např. trvalé nucené vybíjení do sítě) při jakékoliv havárii nadřazeného mikrokontroléru.

3.7.6 Modularita a možnosti rozšíření systému

Při návrhu firmwaru i hardwarové desky plošných spojů (DPS) byl kladen velký důraz na modularitu a škálovatelnost. Ačkoliv je současná implementace primárně zaměřena na komunikaci se střídačem Solax a vzdáleným serverem, zvolená architektura s vrstvou hardwarové abstrakce (HAL) umožňuje snadnou integraci dalších akčních členů a senzorů bez nutnosti radikálních zásahů do jádra regulačního algoritmu.

Plynulá regulace výkonu (SSR a PWM)

Pro maximalizaci vlastního využití solární energie (tzv. *Self-consumption*) je systém softwarově i hardwarově připraven na řízení odporových zátěží, jakými jsou například topné spirály v bojlerech či akumulacích nádržích. K tomuto účelu lze využít pulzně šířkovou modulaci (PWM) generovanou vnitřními časovači mikrokontroléru, která plynule spíná externí polovodičová relé (*Solid State Relay* – SSR).

Tento přístup by umožnil řídicímu algoritmu směřovat přesné množství přebytečného výkonu do tepelné akumulace dříve, než dojde k nevýhodnému přetoku energie do distribuční sítě, případně využít záporných spotových cen k efektivnímu předeřevu teplé užitkové vody.

Diskrétní řízení a SG Ready rozhraní

Pro spotřebiče, které neumožňují plynulou regulaci výkonu, jsou k dispozici digitální výstupy ovládající klasická elektromechanická relé. Tato relé poskytují bezpotenciálové (suché) kontakty, které lze využít k blokování nebo naopak k nucenému spouštění bílé techniky.

Těmito výstupy lze rovněž přímo ovládat moderní tepelná čerpadla vybavená rozhraním *Smart Grid Ready* (SG Ready). Firmware může pomocí jednoduché logiky překládat příkazy z MPC plánu (např. vynucený chod při levné elektřině) do příslušných stavů na svorkách tepelného čerpadla.

Rozšířená sériová komunikace s HVAC

Kromě stávající sběrnice RS-485 vyhrazené pro komunikaci se střídačem lze v budoucnu systém rozšířit o druhou nezávislou sběrnici RS-485 pro komunikaci s klimatizačními jednotkami a systémy vytápění, ventilace a klimatizace (HVAC). V tomto případě by mikrokontrolér STM32 vystupoval v roli *Modbus Master* zařízení pro více uzlů (*Slave*)

3 NÁVRH A REALIZACE SYSTÉMU

současně, což by umožnilo komplexní řízení tepelného komfortu v domácnosti na základě prediktivních modelů domu.

Lokální diagnostika

Pro usnadnění instalace a detekci chyb bez nutnosti připojování diagnostického počítače byl firmware vybaven jednoduchým rozhraním člověk-stroj ve formě indikačních LED diod. Jejich logika je přímo navázána na stavový automat systému:

- **Network LED:** Indikuje stav spojení na fyzické vrstvě (Link Up) a úspěšnost periodického stahování dat ze serveru.
- **Inverter LED:** Potvrzuje integritu Modbus komunikace. Krátké bliknutí signalizuje úspěšné vyčtení registrů, trvalý svit či zhasnutí pak ztrátu komunikace (Timeout).
- **Error LED:** Aktivuje se při detekci kritické chyby, jakou je například přetečení paměti, selhání inicializace periferie nebo dlouhodobá neschopnost uplatnit regulační zásah.

4 Dosažené výsledky a diskuze

4.1 Ověření funkčnosti hardwarového a softwarového řešení

Pro ověření spolehlivosti a bezpečnosti navrženého systému byla po kompletaci prototypu desky plošných spojů provedena série funkčních testů. Cílem této verifikace bylo ověřit elektrickou stabilitu napájecích obvodů, integritu mikrokontroléru, bezchybnou obsluhu komunikačních rozhraní a správnou reakci systému na kritické chybové stavy.

4.1.1 Statická verifikace a oživení napájecí kaskády

Před osazením klíčových integrovaných obvodů a připojením k vnějším rozhraním byla provedena statická kontrola napájecí kaskády desky.

- **Měření napěťových hladin:** Po přivedení vstupního napájecího napětí z externího zdroje bylo pomocí digitálního multimetru ověřeno, že snížovací měniče dodávají stabilní napětí 3,3 V pro napájení mikrokontroléru STM32, ethernetového řadiče W5500 a dalších periférií, a 12 V pro budičí obvody výkonových MOSFETů.
- **Kontrola izolační bariéry:** Multimetrem byla rovněž ověřena galvanická izolace mezi digitální logickou částí desky a budičem sběrnice RS-485, což potvrdilo správné zapojení digitálního izolátoru a izolovaného DC/DC měniče.

4.1.2 Ověření integrity MCU

Po úspěšném elektrickém oživení byl realizován test základních hardwarových funkcí mikrokontroléru:

- **Komunikace s programátorem:** Mikrokontrolér STM32F411 byl úspěšně detekován vývojovým prostředím STM32CubeIDE prostřednictvím rozhraní SWD a programátoru ST-Link V2.
- **Test periferních linek (LED test):** Do paměti byl nahrán testovací firmware implementující časovač s nízkou periodou, který periodicky měnil logický stav vybraných GPIO pinů s připojenými indikačními LED diodami. Tímto testem byla ověřena správná frekvence interního krystalu i základní funkčnost vstupně-výstupních linek procesoru.

4.1.3 Verifikace komunikačních rozhraní

Dalším krokem bylo ověření datové výměny mezi serverem a MCU a následně mezi MCU a měničem.

- **Komunikace se serverem:** Prostřednictvím ethernetového řadiče W5500 a integrovaného TCP/IP stacku bylo navázáno stabilní síťové spojení s lokální sítí. Mikrokontrolér úspěšně inicializoval HTTP komunikaci a odeslal první testovací telemetrický balíček na vzdálený server, což bylo zpětně verifikováno výpisem z logu serveru.
- **Komunikace s hybridním měničem:** Prototyp byl fyzicky propojen pomocí krouceného páru (rozhraní RS-485) s komunikačním portem hybridního střídače SoLaX. Firmware implementující protokol Modbus RTU úspěšně vyčetl provozní data střídače (např. aktuální výkon FVE a stav nabití baterie). Následně byl proveden úspěšný test zápisu do registru $0 \times 007C$ (*ModbusPowerControl*), čímž se potvrdila plná schopnost nadřazeného mikrokontroléru měnit interní režimy střídače v reálném čase.

4.1.4 Test chování při výpadku komunikace

Z důvodu zajištění bezpečnosti provozu domácnosti a ochrany bateriového úložiště před neřízenými stavy byl simulován kritický výpadek konektivity.

Během aktivního vzdáleného řízení toku energií z mikrokontroléru byl fyzicky odpojen komunikační kabel sběrnice RS-485.

Cílem bylo ověřit, zda je správně nakonfigurován interní komunikační Watchdog střídače přes registr 0×0088 (*RemoteCtrlTimeOut*). Test potvrdil, že střídač po uplynutí definovaného limitu 30 s bez příchozího platného Modbus paketu automaticky zrušil režim vzdáleného řízení a bezpečně se přepnul do plně autonomního továrního režimu vlastní spotřeby (*Self-use*). Tento test prokázal, že případná hardwarová či softwarová porucha navržené řídicí jednotky nezpůsobí nestabilitu nebo ohrožení energetického subsystému domácnosti.

4.2 Analýza chování optimalizačního algoritmu v reálném provozu

Pro otestování funkčnosti optimalizačního algoritmu byl vytvořen dataset z období od 1. října 2025 do 30. dubna 2026. Toto období bylo zvoleno kvůli přechodu na patnáctiminutové intervaly spotových cen v říjnu 2025. Odpadla tak nutnost kombinovat hodinové a čtvrt hodinové ceny, což výrazně zjednodušilo zpracování dat.

Nejprve se stáhla provozní data ze Solax cloudu (import, export, výroba a spotřeba). Tyto hodnoty jsou vzorkovány s periodou 5 minut a, podobně jako při zpracování dat pro predikci výroby FVE (viz kapitola 3.3), reprezentují energii, nikoliv výkon. Následně byly k datasetu doplněny predikce výroby a spotřeby, které byly vygenerovány pomocí neuronové sítě a statických matematických modelů.

4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A DISKUZE

Poslední nezbytnou informací pro simulaci MPC byla spotová cena elektřiny. Získaný dataset bylo proto nutné převzorkovat na patnáctiminutovou periodu. Změnou pětiminutového rozlišení dat z měniče na hodinové a následným převodem na patnáctiminutové kroky dochází k určité ztrátě detailů. Vzhledem k tomu, že spotřeba ani výroba během jedné hodiny nevykazují extrémní výkyvy, lze tuto chybu zanedbat a předpokládat stabilní průměrný výkon.

Cílem následné simulace bylo ověřit chování algoritmu MPC v reálných podmínkách. Algoritmus v každém kroku využíval pro první okamžik skutečná data o výrobě a spotřebě, zatímco pro zbytek predikčního horizontu pracoval s odhady. Ke spotřebě predikované statickým modelem se přičítala korekce vypočtená z reálné spotřeby s postupným útlumem (podrobněji v kapitole 3.4). Výstupem MPC byl optimální akční zásah ve formě cílového stavu nabití baterie (SoC) pro následující krok. Tento iterační proces proběhl nad celým datasetem, což představovalo celkem 20 253 čtvrt hodinových kroků.

Chování optimalizačního algoritmu ilustrují grafy 4.1 a 4.2, které zachycují detailní průběh ve dvou vybraných týdnech (v lednu a v dubnu).

Graf 4.1 ukazuje rozdíl v přístupu k bateriovému úložišti během zimního období. Standardní řízení udržuje baterii na minimální kapacitě, jelikož nízká výroba z FVE nedokáže pokrýt spotřebu domácnosti. Naproti tomu algoritmus MPC baterii aktivně využívá k energetické arbitráži – nakupuje elektřinu v době nízkých spotových cen a vybíjí ji během cenových špiček.

V dubnovém týdnu (graf 4.2) je výroba FVE naopak vysoká a často převyšuje spotřebu. Spotové ceny navíc o víkendu klesají i do záporných hodnot, což činí inteligentní řízení ještě důležitějším. Z grafu je patrné, že v ranních hodinách algoritmus baterii nenabíjí, ale přednostně vybíjí, ačkoli výroba již převyšuje spotřebu. Akumulace energie se přesouvá až na poledne, kdy jsou tržní ceny nejnižší.

4.3 Ekonomické zhodnocení a návratnost systému

Ekonomický přínos navrženého řídicího systému byl zhodnocen na základě simulace ze zimního a jarního období (od 1. října 2025 do 29. dubna 2026). Kapacita bateriového úložiště byla stanovena na 10,0 kWh. Jako referenční situace (tzv. baseline) sloužila domácnost bez fotovoltaické elektrárny (FVE) a baterie. Tato domácnost využívala standardní fixní tarif s cenou silové elektřiny 3,5 Kč/kWh (bez distribučních poplatků).

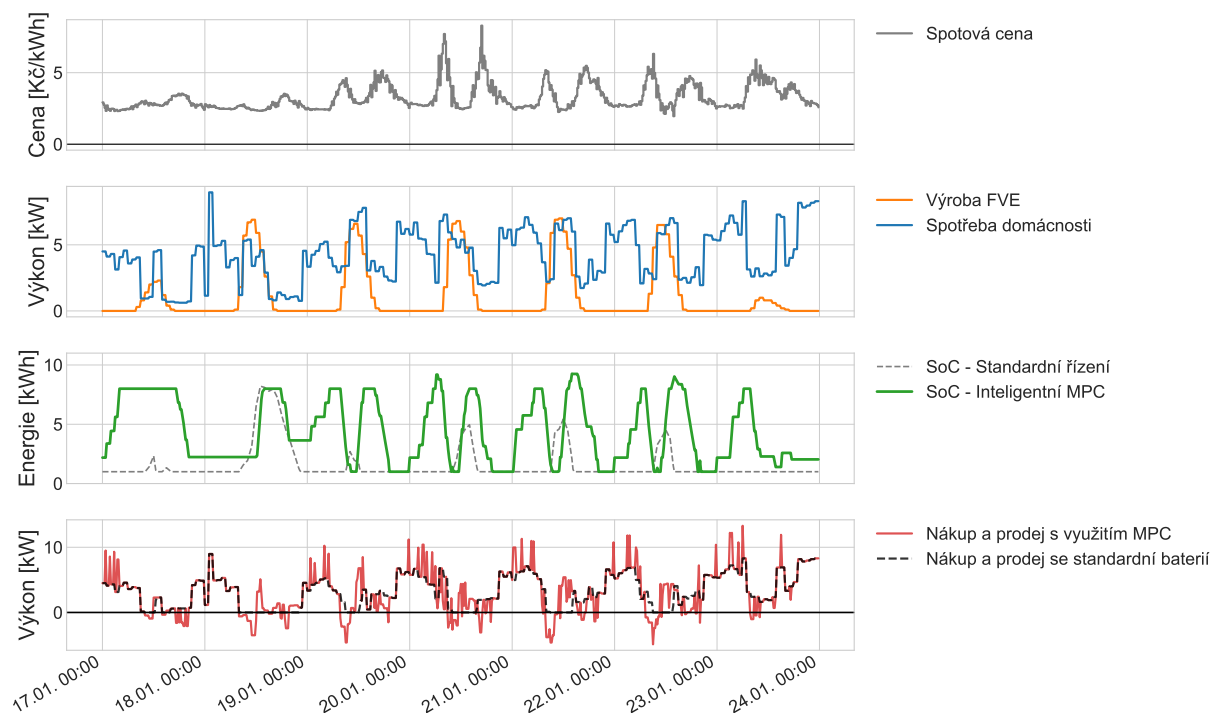
Dále se porovnávaly scénáře s fixním a spotovým tarifem, a to jak s fotovoltaickou elektrárnou, tak bez ní.

Vývoj kumulativních nákladů pro všechny testované scénáře ukazuje obrázek 4.3. Graf jasně ilustruje rostoucí rozdíl mezi fixními a spotovými cenami. Finanční úspora dosažená samotným chytrým řízením je v tomto celkovém měřítku méně výrazná.

Skok v grafu na přelomu října a listopadu 2025 je způsoben výpadkem sběru dat. Spotřebovaná energie se v datech načetla jednorázově, což způsobilo tuto vizuální odchylku. Jedná se o chybu v datasetu.

Celkové náklady za sledované období pro analyzované scénáře shrnuje následující výčet:

4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A DISKUZE

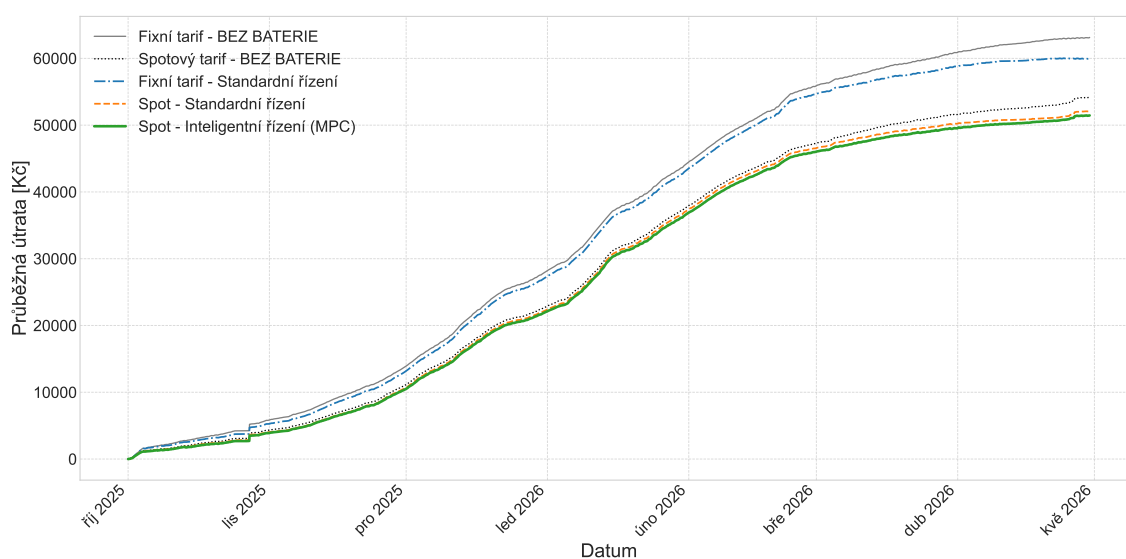


Graf 4.1: Porovnání zásahů MPC a standardního řízení baterie v lednovém týdnu.



Graf 4.2: Porovnání zásahů MPC a standardního řízení baterie v dubnovém týdnu.

4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY A DISKUZE



Graf 4.3: Porovnání vývoje kumulativních nákladů na elektrickou energii v průběhu simulace pro jednotlivé scénáře.

- Fixní tarif (bez FVE a baterie): **63 136 Kč**
- Spotový tarif (bez FVE a baterie): **54 182 Kč**
- Fixní tarif (s FVE a standardní baterií): **59 950 Kč**
- Spotový tarif (s FVE a standardní baterií): **52 080 Kč**
- Spotový tarif (s FVE a navrženým MPC řízením): **51 455 Kč**

4.3.1 Analýza úspor a vliv zimního období

Z výsledků vyplývá, že nasazení běžně řízené FVE s baterií přineslo u fixního tarifu úsporu pouze 625 Kč vůči referenčnímu stavu. Tento nízký přínos je způsoben minimálním slunečním svitem v zimních měsících. Bez možnosti obchodovat s energií (například nakupovat levnou elektřinu v noci) zůstává baterie přes zimu většinou nevyužitá.

Největší finanční úspory (přibližně 9 000 Kč) domácnost v tomto půlroce dosáhla pouhým přechodem z fixního na spotový tarif, a to i bez FVE. Průměrné ceny na denním trhu totiž v daném období nedosahovaly výše uvažovaného fixního tarifu.

4.3.2 Finanční přínos MPC algoritmu

Hlavním cílem práce bylo porovnat standardní režim střídače (snaha o maximální využití vlastní vyrobené energie) s navrženým MPC algoritmem na spotovém trhu. Celková úspora při použití MPC vůči referenčnímu stavu činila 11 681 Kč. Čistý finanční přínos plynoucí pouze z přechodu ze standardního řízení baterie na MPC představuje **625 Kč**.

Ačkoliv se tato částka může zdát nízká, je nutné ji hodnotit s ohledem na fyzikální omezení a nastavení optimalizátoru. Algoritmus totiž zohledňuje penalizaci za opotřebení baterie (wear cost) a reálné ztráty při přeměně energie (účinnost nabíjení a vybíjení

střídače). MPC algoritmus proto záměrně baterii nevyužívá, pokud jsou cenové rozdíly během dne příliš malé a nepokryly by ani opotřebení li-ion článků. K nákupu a prodeji dochází pouze tehdy, když cenové špičky s dostatečnou rezervou převýší tyto ztráty.

4.3.3 Návratnost hardwarového řešení

Pořizovací náklady na mikrokontrolér a potřebné periferie činí 1 200 Kč (výroba DPS 400 Kč + komponenty 800 Kč). Čistý zisk 625 Kč za zimní půlrok tak představuje velmi dobrý výsledek. Odhadovaná návratnost tohoto hardwarového modulu je jeden až dva roky.

Lze navíc předpokládat, že v letních měsících bude finanční přínos prediktivního řízení výrazně vyšší. MPC algoritmus dokáže letní přebytky energie uložit a prodat do sítě v době večerních cenových maxim. Běžný střídač by naopak tuto energii prodal neřízeně ihned po nabití baterie (typicky v poledne). V tuto dobu však bývají spotové ceny na trhu nejnižší, nebo dokonce záporné.

4.4 Možnosti dalšího rozvoje systému

Navržený a ověřený prototyp embedded systému prokázal svou funkčnost a schopnost realizovat prediktivní řízení v reálném čase. Jakožto u každého vývojového prototypu se však v průběhu testování projeví určité limity a nedostatky. Tato podkapitola se zaměřuje na analýzu těchto slabých míst a navrhuje konkrétní hardwarová a softwarová vylepšení pro budoucí generace systému.

4.4.1 Hardwarová rozšíření a lokalizace výpočtů

Mezi hlavní hardwarové limity současné verze desky plošných spojů patří absence rozhraní pro přímé připojení teplotních senzorů. Teplotní data jsou v aktuální konfiguraci plně závislá na externích datech. Pro přesnější řízení (např. sledování teploty TUV či teploty v domě) je žádoucí v dalším prototypu hardwaru integrovat rozhraní pro sběrnici 1-Wire. Toto rozhraní by umožnilo snadné a nízkonákladové připojení digitálních teplotních čidel (např. typu DS18B20) s minimálními nároky na GPIO linky mikrokontroléru.

Z hlediska celkové architektury představuje největší slabinu systému jeho vysoká závislost na stabilním připojení k internetu. Ačkoliv byl fail-safe mechanismus úspěšně ověřen (viz kapitola 4.1), při dlouhodobějším výpadku sítě přichází systém o možnost optimalizace a střídač pracuje pouze v autonomním režimu.

Budoucí rozvoj by měl směřovat k úplné lokalizaci výpočtů. Výkonový potenciál použitého mikrokontroléru STM32 (případně přechod na vyšší řadu STM32H7) by v kombinaci s optimalizací kódu umožnil implementovat řešič a zjednodušený predikční model přímo do firmwaru řídicí jednotky. Tím by se systém stal teoreticky zcela nezávislým na cloudovém serveru a tím by se zvýšila jeho robustnost a kybernetická bezpečnost.

4.4.2 Aktivní řízení výkonu FVE při záporných cenách

Dalším významným nedostatkem současného řešení je absence mechanismu pro aktivní omezování výkonu fotovoltaické elektrárny. V obdobích vysoké produkce z obnovitelných zdrojů a nízké poptávky dochází na denním trhu ke vzniku hluboce záporných cen elektrické energie. V těchto situacích je prodej přebytků do sítě ekonomicky ztrátový, nehledě na dodatečné poplatky obchodníkovi.

Ačkoliv se MPC algoritmus snaží těmto ztrátám předcházet vhodným načasováním nabíjení baterie, v případě jejího plného nabití a trvajících záporných cen současný systém nedokáže fyzicky omezit nebo zcela zastavit výrobu střídače. V budoucích verzích by proto měla být do řídicího algoritmu a komunikačního protokolu přidána funkce pro plynulou regulaci činného výkonu FVE (prostřednictvím specifických Modbus registrů měniče). MPC by tak získalo možnost v kritických momentech dynamicky snížit výkon panelů pouze na úroveň aktuální spotřeby domu, čímž by se zcela eliminovaly finanční ztráty z nechtěného exportu do sítě.

4.4.3 Zvýšení přesnosti predikčních modelů

Simulace ukázaly, že finanční přínos MPC je přímo úměrný přesnosti matematických modelů výroby a spotřeby. Současný model vykazuje určité odchylky způsobené dynamickými změnami, které dopředná neuronová síť (MLP) nedokáže plně podchytit.

Pro odstranění tohoto nedostatku se jako ideální řešení jeví sběr dlouhodobějších provozních dat a následné natrénování pokročilejší architektury neuronových sítí, konkrétně rekurentních sítí typu LSTM (Long Short-Term Memory). Síť LSTM jsou navrženy přímo pro zpracování časových řad a dokážou v predikcích zohlednit historické trendy.

Kromě čistě fyzikálních a meteorologických veličin je nutné do budoucích predikčních modelů implementovat stochastický model chování obyvatel domácnosti. Spotřeba elektrické energie je extrémně závislá na aktuálním obývání domu (přítomnost členů domácnosti, odjezdy na dovolené, víkendové režimy). Integrace uživatelského kalendáře nebo adaptivního algoritmu pro detekci přítomnosti do účelové funkce MPC by zabránila zbytečnému akumulování energie do baterie v době, kdy je dům dlouhodobě bez odběru, a dále by zvýšila ekonomickou efektivitu celého systému.

5 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala návrhem a realizací systému pro inteligentní řízení energetických toků v domácnosti. Hlavním úkolem bylo vytvořit řešení, které optimalizuje nákup a prodej elektřiny podle aktuálních spotových cen. Lze konstatovat, že všechny stanovené cíle práce byly úspěšně splněny.

V rámci prvního cíle byl navržen a zkonstruován vlastní hardware. Řídicí jednotka využívá mikrokontrolér STM32F411 a ethernetový řadič W5500. Pro tyto součástky bylo vytvořeno schéma zapojení a následně i deska plošných spojů (DPS). Systém umožňuje napájení přes PoE. Spojení a komunikace s hybridním fotovoltaickým měničem probíhá spolehlivě přes sběrnici RS-485 pomocí protokolu Modbus RTU. Tím byla zajištěna přímá vazba na měnič a bateriové úložiště.

Druhý cíl zahrnoval vývoj softwaru pro celkové řízení. Architektura je rozdělena na lokální mikrokontrolér a vzdálený server. Serverová část je postavená na frameworku FastAPI. Pravidelně stahuje spotové ceny elektřiny a meteorologické předpovědi. Veškerá data se bezpečně ukládají v databázi SQLite. Mikrokontrolér následně z tohoto serveru získává hotové řídicí plány. Tyto plány rovnou aplikuje na měnič. Vytvořený software tak zajišťuje efektivní řízení s ohledem na stav baterie a aktuální ceny na trhu.

Třetím cílem bylo vytvoření samotného optimalizačního algoritmu. Zvolil se přístup prediktivního řízení na bázi modelu (MPC). Algoritmus běží na serveru a využívá optimalizační knihovnu CVXPY. Aby mohl MPC správně fungovat, byly vyvinuty dva predikční modely. Výrobu z fotovoltaiky odhaduje umělá neuronová síť typu MLP. Spotřebu domácnosti predikuje statistický model korigovaný klouzavým průměrem. Algoritmus díky těmto vstupům dynamicky rozhoduje o ukládání energie do baterie, jejím využívání nebo o nákupu a prodeji do sítě.

Celé řešení bylo ověřeno na datech z reálného provozu od října 2025 do dubna 2026. Testy potvrdily správnou funkci systému a schopnost minimalizovat náklady. Nasazení MPC algoritmu přineslo finanční úsporu 625 Kč oproti stejné domácnosti, která sice vlastní FVE a baterii, ale využívá pouze standardní autonomní řízení bez znalosti spotových cen. Jelikož testování probíhalo v zimním půlroce, kdy baterie bez možnosti inteligentní arbitráže převážně stagnuje, jedná se o výborný výsledek. V letních měsících lze očekávat úspory výrazně vyšší.

Podařilo se vytvořit funkční, spolehlivé a levné zařízení. Návratnost investice do hardware se pohybuje mezi jedním až dvěma lety. V budoucnu se nabízí prostor pro další vylepšení. Systém lze rozšířit o plný přesun výpočtů z cloudu přímo do lokálního mikrokontroléru. Dalším krokem může být také aktivní omezování výkonu solárních panelů v době záporných cen elektřiny.

Literatura

- [1] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a ostatní regulované ceny* [online]. 2025. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/>.
- [2] ČESKO. *Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)* [online]. 2000. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458>.
- [3] ČEPS, A.S. *Kodex přenosové soustavy* [online]. 2025. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.
- [4] OTE, A.S. *Roční zpráva o trhu s elektřinou a plynem v České republice za rok 2025* [online]. OTE, a.s., 2026 [cit. 2026-05-04]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocnizprava-o-trhu>.
- [5] ČESKO. *Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů* [online]. 2012. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165>.
- [6] ČESKO. *Zákon č. 261/2007 Sb., o stabilizaci veřejných rozpočtů, Část čtyřicátá sedmá: Daň z elektřiny* [online]. 2007. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-261>.
- [7] ČESKO. *Zákon č. 235/2004 Sb., o dani z přidané hodnoty* [online]. 2004. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2004-235>.
- [8] ČEZ DISTRIBUCE, A.S. *Podmínky distribuce elektřiny a ceníky* [online]. 2026. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-zakazniky/ceniky.html>.

LITERATURA

- [9] ČEZ DISTRIBUCE, A. S. *Připojovací podmínky pro osazení měřicích zařízení v odběrných místech napojených z distribuční sítě nízkého napětí*. 2024. Technická dokumentace.
- [10] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2023*. Jihlava, 2023.
- [11] EU AGENCY FOR THE COOPERATION OF ENERGY REGULATORS (ACER). *Final Assessment of the EU Wholesale Electricity Market Design* [online]. 2022. [cit. 2026-03-09]. Tech. zpr. ACER. Dostupné z: <https://www.acer.europa.eu/>.
- [12] SQUEAKY CLEAN ENERGY LTD. *Understanding power markets: Merit order and marginal pricing* [<https://www.sqe.energy/insights/understanding-power-markets-merit-order-and-marginal-pricing>]. 2024. Squeaky Energy Insights.
- [13] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Vyhláška č. 408/2015 Sb., o pravidlech trhu s elektřinou* [online]. 2015. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-408>.
- [14] OTE, A.S. *Dokumentace k exportům dat a webovým službám* [online]. 2026. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/denni-trh>.
- [15] SPOTOVÁ ELEKTRINA. *API Dokumentace - Ceny elektřiny pro každou hodinu* [online]. 2026. [cit. 2026-03-09]. Dostupné z: <https://spotovaelektrina.cz/api>.
- [16] VEGA-GARITA, Victor; HEYDARZADEH, Mohsen; HOSSEINZADEH DADASH, Amirhossein; IMMONEN, Eero. The need for aging-aware control methods in lithium-ion batteries: A review. *Journal of Energy Storage*. 2025, roč. 132.
- [17] WANG, John; LIU, Ping; HICKS-GARNER, Jocelyn; SHERMAN, Elena; SOUKIAZIAN, Souren; VERBRUGGE, Mark; TATARIA, Harshad; MUSSER, James; FINAMORE, Peter. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. *Journal of Power Sources*. 2011, roč. 196, č. 8, s. 3942–3948.
- [18] WANG, Li; QIU, Jingyi; WANG, Xiaodan; CHEN, Long; CAO, Gaoping; WANG, Jianlong; ZHANG, Hao; HE, Xiangming. Insights for understanding multiscale degradation of LiFePO₄ cathodes. *eScience*. 2022, roč. 2, č. 2, s. 125–137.

LITERATURA

- [19] NAUMANN, Maik; SCHIMPE, Michael; KEIL, Peter; HESSE, Holger C.; JOSSEN, Andreas. Analysis and modeling of calendar aging of a commercial LiFePO₄/graphite cell. *Journal of Energy Storage*. 2018, roč. 17, s. 153–169.
- [20] SOLAX POWER NETWORK TECHNOLOGY (ZHEJIANG) CO., LTD. *Energy Storage Inverter Modbus TCP & RTU Communication protocols V3.24*. 2023. Communication Protocol Manual.
- [21] BIRKL, Christoph R.; ROBERTS, Matthew R.; MCTURK, Euan; BRUCE, Peter G.; HOWEY, David A. Degradation diagnostics for lithium ion cells. *Journal of Power Sources*. 2017, roč. 341, s. 373–386.
- [22] ANVARI-MOGHADDAM, Amjad; MONSEF, Hassan; RAHIMI-KIAN, Ashkan. A multi-objective optimization framework for coordinated energy management of interconnected microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020, roč. 114, s. 105393.
- [23] VÁZQUEZ-CANTELI, José R.; NAGY, Zoltán. Reinforcement learning for demand and energy management in buildings: A review. *Applied Energy*. 2019, roč. 235, s. 612–625.
- [24] REYNOLDS, Jonathan; REZGUI, Yacine; KWAN, Alan; PIRIOU, Monjur. Artificial neural networks for building energy prediction and control: A review. *Energy and Buildings*. 2018, roč. 158, s. 32–45.
- [25] ARABALI, Ahmad; GHOFrani, Mohammad; ETEZADI-AMOLI, Mehdi; FADALI, M. Sami. Genetic algorithm-based optimization approach for energy management. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2013, roč. 4, č. 2, s. 311–321.
- [26] YUCE, Baris; REZGUI, Yacine; MOURSHED, Monjur. ANN–GA smart appliance scheduling for optimised energy management in the domestic sector. *Energy and Buildings*. 2016, roč. 111, s. 311–325.
- [27] RAWLINGS, James Blake; MAYNE, David Q.; DIEHL, Moritz. *Model predictive control: theory, computation, and design*. Madison, Wisconsin: Nob Hill Publishing, 2017.

LITERATURA

- [28] DAGDOUGUI, Hanane; MINCIARDI, Riccardo; PAMPHILE, Alexandre; SACILE, Roberto. Models and algorithms for multiple microgrids energy management. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2012, roč. 42, č. 6, s. 905–917.
- [29] SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*. 2009, roč. 83, č. 5, s. 614–624.
- [30] REINDL, D. T.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A. Evaluation of solar radiation correlations. *Solar Energy*. 1990, roč. 45, č. 1, s. 9–19.
- [31] LIU, Benjamin Y. H.; JORDAN, Richard C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*. 1960, roč. 4, č. 3, s. 1–19.
- [32] RUMELHART, David E.; HINTON, Geoffrey E.; WILLIAMS, Ronald J. Learning representations by back-propagating errors. In: *Nature*. 1986, sv. 323, s. 533–536.
- [33] ALMONACID, Florencia; PÉREZ-HIGUERAS, Pablo; FERNÁNDEZ, Eduardo F.; HONTORIA, Leocadio. Application of multilayer perceptron artificial neural networks for forecasting the power output of a grid-connected photovoltaic plant. *Energy Conversion and Management*. 2014, roč. 77, s. 342–351.
- [34] HOCHREITER, Sepp; SCHMIDHUBER, Jürgen. Long short-term memory. *Neural Computation*. 1997, roč. 9, č. 8, s. 1735–1780.
- [35] QING, Xiangyun; LIU, Yanxia. Hourly solar irradiance forecasting using LSTM networks. *Renewable Energy*. 2018, roč. 123, s. 185–191.
- [36] HOLMGREN, William F.; HANSEN, Clifford W.; MIKOFSON, Mark A. pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*. 2018, roč. 3, č. 29, s. 884.
- [37] CAMACHO, Eduardo F.; ALBA, Carlos Bordons. *Model Predictive Control*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [38] SWALES, Andy. *Modbus application protocol specification v1.1b* [Modbus Organization]. 1999.

LITERATURA

- [39] STMICROELECTRONICS. *RM0433 Reference manual: STM32H743xl/753xl/750xB advanced Arm-based 32-bit MCUs*. STMicroelectronics, 2020. Rev 7.
- [40] LAI, Stefan. Tunneling in thin gate oxide MOS structures. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 1981, roč. 28, č. 9, s. 1110–1115.