

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Daniel Linda

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Chytré řízení fotovoltaického systému s baterií
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Daniel Linda
Osobní číslo: I22217
Studijní program: B0714A150008 Automatizace
Téma práce: Chytré řízení fotovoltaického systému s baterií
Zadávající katedra: Katedra automatizace a matematiky

Zásady pro vypracování

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a implementovat systém chytrého řízení fotovoltaického systému s bateriovým úložištěm, který bude optimalizovat energetické toky v domácnosti na základě cen na spotovém trhu s elektřinou, předpovědi spotřeby a výroby energie. V teoretické části student provede rešerši relevantních technologií a metod, které jsou využívány v oblasti chytrého řízení fotovoltaických systémů a bateriových úložišť. Součástí rešerše bude i přehled principů spotového trhu s elektřinou a metody predikce spotřeby a výroby energie na základě klimatických podmínek a spotřebitelských vzorců.

V praktické části student navrhne systém chytrého řízení, který umožní sledování a řízení energetických toků mezi fotovoltaickým systémem, baterií a dalšími spotřebiči v domácnosti. Řešení bude zahrnovat komunikaci s fotovoltaickým systémem pro sledování aktuální výroby a spotřeby a nastavování časových plánů nabíjení/vybíjení baterie na základě cen energie a předpovědi počasí. Systém bude také komunikovat s tepelným čerpadlem či podobnými zařízeními a přizpůsobovat jejich činnost aktuálním energetickým přebytkům nebo cenám energie. Součástí řešení bude webové rozhraní, které poskytne přehledný monitoring a možnost vzdáleného řízení systému v reálném čase.

V závěru práce student zhodnotí dosažené výsledky, přínos řešení pro optimalizaci energetických toků a nákladů a uvede možné návrhy na vylepšení systému. Zhodnocení bude zahrnovat i analýzu úspor a efektivitu navrženého systému.

Rozsah pracovní zprávy: cca 40 stran
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

VILIMEC, L. Řízení a regulace energetických zařízení. Skripta VŠB TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1853-5.
MAIXNER, Ladislav. Mechatronika: učebnice. Brno: Computer Press, [2006]. Učebnice (Computer Press). ISBN 80-251-1299-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Dominik Štursa, Ph.D.
Katedra informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: 15. prosince 2024
Termín odevzdání bakalářské práce: 16. května 2025

prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

LS.

Ing. Libor Kupka, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. ledna 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Chytré řízení fotovoltaického systému s baterií jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 15. 05. 2025

Daniel Linda v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Dominikovi Štursovi, Ph.D. za pomoc při zpracování a vedení mé práce. Také děkuji své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a implementací systému chytrého řízení pro domácí fotovoltaický systém s bateriovým úložištěm. Na základě analýzy relevantních technologií a principů byl navržen a implementován řídicí systém, který umožňuje monitorování a aktivní řízení toků energie mezi fotovoltaickým systémem s baterií, distribuční sítí a domácími spotřebiči. Systém dynamicky plánuje nabíjení a vybíjení baterie a upravuje provoz vybraných spotřebičů na základě spotřeby, cen a výroby energie. Součástí řešení je webové rozhraní pro vizualizaci energetických toků v reálném čase a pro vzdálené ovládání systému. Závěr práce hodnotí funkčnost a přínos navrženého systému, analyzuje jeho potenciál pro snížení nákladů na energie a zvýšení energetické efektivity a diskutuje možnosti dalšího rozvoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

chytré řízení energie, optimalizace, fotovoltaický systém, bateriové úložiště, spotový trh

TITLE

Smart Control of a Photovoltaic System with Battery Storage

ANNOTATION

This Bachelor's thesis deals with the design and implementation of a smart management system for a residential photovoltaic system with battery storage. Based on an analysis of relevant technologies and principles, a control system was designed and implemented that enables monitoring and active control of energy flows between the photovoltaic system with battery, the distribution grid and household appliances. The system dynamically schedules battery charging and discharging and adjusts the operation of selected appliances based on energy consumption, price, and production. Part of the solution is a web interface for real-time visualization of energy flows and for remote control of the system. The conclusion of the thesis evaluates the functionality of the designed system, analyzes its potential contribution to reducing energy costs and increasing energy efficiency, and discusses possibilities for further development.

KEYWORDS

smart energy management, optimization, photovoltaic system, battery storage, spot electricity market

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	11
ÚVOD.....	15
1 TEORETICKÁ ČÁST	17
1.1 Fotovoltaické systémy a bateriová úložiště	17
1.1.1 Princip fungování fotovoltaických panelů	17
1.1.2 Typy článků	18
1.1.3 Fotovoltaický panel.....	19
1.1.4 Druhy fotovoltaických střídačů	20
1.1.5 Technologie bateriových úložišť	22
1.1.6 Systém řízení baterie (BMS).....	24
1.2 Chytré řízení energetických systémů v domácnosti	25
1.2.1 Koncept Smart Home a Smart Grid v kontextu energetiky	25
1.2.2 Činnosti, metody a algoritmy řízení toků energie.....	25
1.2.3 Komunikační protokoly a standardy	26
1.2.4 Hardware pro řízení	27
1.3 Spotový trh s elektřinou.....	30
1.3.1 Princip fungování spotového trhu.....	30
1.3.2 Tvorba ceny a volatilita	32
1.3.3 Příležitosti pro domácnosti s FVE a baterií	33
1.3.4 Způsoby získávání dat o cenách	34
1.4 Predikce výroby a spotřeby energie.....	35
1.4.1 Metody predikce výroby FVE	35
1.4.2 Metody predikce spotřeby domácnosti	37
1.4.3 Význam přesnosti predikcí pro řízení	38
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
2.1 Realizace systému chytrého řízení.....	39
2.1.1 Architektura systému	40
2.1.2 Hlavní řídicí algoritmus	45
2.1.3 Další podpůrné programy	49
2.1.4 Webové rozhraní.....	50

2.2	Možné vylepšení	53
2.3	Analýza úspor a ekonomické efektivity.....	54
	ZÁVĚR	58
	SEZNAM PŘÍLOH.....	67

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: PLC Teco CP-1000 v rozvaděči chytré domácnosti	41
Obrázek 2: Fotovoltaický střídač s bateriemi	42
Obrázek 3: Převodník RS485/ETH.....	42
Obrázek 4: Schéma propojení systému.....	45
Obrázek 5: Přehledová stránka programu na web serveru PLC	52
Obrázek 6: Graf na web serveru PLC	53
Obrázek 7: Přehled vyúčtování odebrané energie	54
Obrázek 8: Přehled průměrných měsíčních spotových cen (Spotmarketindex, 2025)	55
Obrázek 9: Rozložení toků energie za leden 2025	56
Obrázek 10: Denní odběr a uložení energie za měsíc leden	57
Obrázek 11: Přehled průměrných denních spotových cen (Spotmarketindex, 2025).....	57
Tabulka 1: Porovnání nákladů a úspor za energii.....	55

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AGM: Absorbent Glass Mat (typ olověné baterie)

Ah: Ampérhodina (jednotka elektrického náboje, používaná pro kapacitu baterií)

API: Application Programming Interface (rozhraní pro programování aplikací)

ARIMA: Autoregressive Integrated Moving Average (statistický model pro analýzu časových řad)

BMS: Battery Management System (systém řízení baterie)

BT: Bluetooth (bezdrátová komunikační technologie)

CAN: Controller Area Network (sběrnice pro komunikaci v řídicích systémech, například mezi BMS a střídačem)

CMV: Cloud Motion Vector (vektor pohybu mraků, používaný při predikci FVE)

CO₂: Oxid uhličitý

CRC: Cyclic Redundancy Check (metoda kontroly chyb při přenosu dat)

ČEPS: Provozovatel přenosové soustavy v České republice

ČHMÚ: Český hydrometeorologický ústav

DC: Direct Current (stejnoseměrný proud)

DPH: Daň z přidané hodnoty

DWD: Deutscher Wetterdienst (Německá meteorologická služba)

EDC: Elektroenergetické datové centrum

EMS: Energy Management System (systém energetického managementu)

ERÚ: Energetický regulační úřad

ESP-IDF: Espressif IoT Development Framework (vývojové prostředí pro ESP32)

ETH: Ethernet (technologie pro počítačové sítě)

EUR/MWh: Euro za megawatthodinu (jednotka ceny elektřiny)

eV: Elektronvolt (jednotka energie)

FBD: Function Block Diagram (funkční blokové schéma – programovací jazyk pro PLC)

FVE: Fotovoltaická elektrárna / fotovoltaický systém

GEL: Gelled Electrolyte (typ olověné baterie s gelovým elektrolytem)

GFS: Global Forecast System (globální předpovědní systém počasí)

GPIO: General Purpose Input/Output (univerzální vstupně/výstupní porty)

GPS: Global Positioning System (globální polohový systém)

HTML: HyperText Markup Language (značkovací jazyk pro webové stránky)

HTTP: Hypertext Transfer Protocol (protokol pro přenos webových stránek)

HTTPS: Hypertext Transfer Protocol Secure (zabezpečená verze HTTP)

I/O: Input/Output (vstup/výstup)

IEC/EN 61131-3: Mezinárodní norma pro programovací jazyky PLC

IEEE 802.15.4: Standard pro bezdrátové sítě nízkého výkonu

IL: Instruction List (seznam instrukcí – programovací jazyk pro PLC)

IoT: Internet of Things (internet věcí)

IP: Ingress Protection (stupeň krytí)

JSON: JavaScript Object Notation (formát pro výměnu dat)

Kč/kWh: Koruna česká za kilowatthodinu (jednotka ceny elektřiny)

kW: Kilowatt (jednotka výkonu)

kWh: Kilowatthodina (jednotka energie)

kWp: Kilowatt-peak (špičkový výkon fotovoltaických panelů)

LAN: Local Area Network (lokální počítačová síť)

LD: Ladder Diagram (příčkový diagram – programovací jazyk pro PLC)

LFP: Lithium FerroPhosphate (lithium-železo-fosfátová baterie, LiFePO₄)

LiFePO₄: Lithium-železo-fosfátová (baterie)

Li-Ion: Lithium-iontová (baterie)

M2M: Machine to Machine (komunikace mezi stroji)

MBAP: Modbus Application Header (hlavička v protokolu Modbus TCP/IP)

MPP tracker: Maximum Power Point tracker (zařízení pro sledování bodu maximálního výkonu FVE panelů)

MQTT: Message Queuing Telemetry Transport (komunikační protokol pro IoT)

MWh: Megawatthodina (jednotka energie)

OASIS: Organization for the Advancement of Structured Information Standards (standardizační organizace)

OCPP: Open Charge Point Protocol (komunikační protokol pro nabíjecí stanice elektromobilů)

OPLC: Operator Panel PLC (PLC s integrovaným operátorským panelem)

OTE: Operátor trhu (organizátor krátkodobých trhů s elektřinou v ČR)

OZE: Obnovitelné zdroje energie

PAC: Programmable Automation Controller (programovatelný automatizační kontrolér)

PDS: Provozovatelé distribučních soustav

PLC: Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat)

Pmax: Jmenovitý (špičkový) výkon (fotovoltaických panelů)

RAM: Random Access Memory (operační paměť)

REST: Representational State Transfer (architektura rozhraní)

RISC-V: Reduced Instruction Set Computer V (architektura procesorových jader)

RS-485: Standard pro sériovou komunikaci

RTOS: Real-Time Operating System (operační systém reálného času)

RTU: Remote Terminal Unit (varianta protokolu Modbus pro sériovou komunikaci)

SARIMA: Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (sezónní autoregresivní integrovaný klouzavý průměr)

SARIMAX: Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Exogenous model (sezónní ARIMA s externími proměnnými)

SD: Secure Digital (typ paměťové karty)

SFC: Sequential Function Chart (jazyk pro popis sekvenčních úloh v PLC)

SoC: System on Chip (systém na čipu)

SOC: State of Charge (stav nabití baterie)

SOH: State of Health (stav životnosti baterie)

ST: Structured Text (strukturovaný text – programovací jazyk pro PLC)

STC: Standard Test Conditions (standardní testovací podmínky pro FVE panely)

TČ: Tepelné čerpadlo

TCP/IP: Transmission Control Protocol/Internet Protocol (sada komunikačních protokolů)

USB: Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)

V: Volt (jednotka elektrického napětí)

Wi-Fi: Bezdrátová síťová technologie

Wp: Watt-peak (jednotka špičkového výkonu FVE panelů)

XLS: Excel Spreadsheet (formát souboru tabulkového procesoru)

XML: Extensible Markup Language (rozšiřitelný značkovací jazyk)

ÚVOD

Současná energetika prochází rychlými změnami, které se vyznačují nejen proměnlivostí cen energií, ale především rozvojem technologií a rostoucím důrazem na dlouhodobě udržitelná řešení. V této souvislosti se fotovoltaické systémy a bateriová úložiště stávají stále dostupnějšími a lákavějšími technologiemi pro domácnosti. Jejich zavádění je poháněno jak snahou o snížení negativních dopadů na životní prostředí využíváním čisté sluneční energie, tak významným hospodářským důvodem – možností snížit náklady na elektřinu a zvýšit energetickou nezávislost domácností.

Samotné pořízení fotovoltaického systému a baterie však ještě samo o sobě nezaručuje dosažení největších možných úspor. Důležitým prvkem pro účinné využití těchto technologií je chytré řízení toků energie. Moderní domácnost vybavená FVE, baterií a případně dalšími spotřebiči, jako je tepelné čerpadlo nebo wallbox, představuje složitý malý energetický systém. Prostřednictvím chytrého řízení je možné tyto energetické toky (výrobu, spotřebu, ukládání, nákup/prodej) nejen sledovat, ale především aktivně optimalizovat.

Tato bakalářská práce se zaměřuje právě na dosažení co největších úspor a celkové hospodárnosti provozu domácího energetického systému pomocí zavedení chytrého řízení. Pro dosažení nejlepšího výsledku využívá navrhovaný systém současné informace z dynamicky se měnícího spotového trhu s elektřinou (denní trh) a pracuje s předpověďmi budoucí výroby energie z FVE a budoucí spotřeby domácnosti. Díky znalosti budoucích cen a předpovědím výroby a spotřeby může systém činit rozhodnutí: například výhodně nabíjet baterii levnou energií ze sítě, využívat uloženou energii během cenových špiček nebo přizpůsobovat provoz energeticky náročných spotřebičů aktuálním podmínkám.

Hlavním cílem práce je tedy nejprve provést přehled vhodných technologií (FVE, baterie), postupů chytrého řízení, zásad spotového trhu s elektřinou a metod předpovídání výroby a spotřeby energie. Na základě tohoto přehledu bude navržen a implementován ucelený systém chytrého řízení, který bude co nejlépe řídit energetické toky v domácnosti s FVE a baterií. Jeho implementace zahrne propojení a zajištění komunikace se všemi součástmi: fotovoltaickým systémem, baterií, vybranými spotřebiči i externími zdroji dat (spotový trh, předpověď výroby FVE). Součástí bude také vývoj přehledného webového rozhraní pro sledování a ovládání systému v reálném čase. Nakonec proběhne ověření funkčnosti celého řešení a podrobné zhodnocení jeho přínosů, zejména s ohledem na optimalizaci energetických toků, dosažené finanční úspory a celkovou efektivitu.

Práce je členěna následovně: Teoretická část se věnuje technickému popisu fotovoltaických systémů, bateriových úložišť, zásadám chytrého řízení, fungování spotového trhu a metodám energetických předpovědí. Praktická část podrobně popisuje návrh a implementaci systému, technickou realizaci, řídicího postupy, způsoby komunikace a následně dokumentuje jeho programovou realizaci, včetně tvorby webového prostředí. Závěrečná část představuje výsledky ověřování, provádí rozbor dosažených úspor a hospodárnosti, rozebírá omezení řešení a navrhuje možná budoucí vylepšení.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Fotovoltaické systémy a bateriová úložiště

Tato část se bude detailněji zaměřovat na jednotlivé části tvořící tyto technologie. Každá z těchto dvou technologií je schopna pracovat samostatně. Bateriové uložení může být využíváno například při výpadku proudu ze sítě jako záložní zdroj, nebo pro poskytování služeb výkonové rovnováhy. Fotovoltaický systém bez baterie stále vyrobí tu samou energii jako s ní, avšak bude omezená míra vlastní spotřeby energie v závislosti na profilu spotřeby v objektu (jak se kryje s aktuální výrobou ze solárních panelů). Přítomnost nějaké formy vytěžení přebytků (například nahřívání teplé užitkové vody) toto také ovlivňuje. Jejich spojením je ale možné dosáhnout efektivního využití energie nejen v domácnosti. Tím, že se energie z fotovoltaických panelů může ukládat do baterie, je možné ji maximálně využít pro vlastní spotřebu a minimalizovat tak potřebný nákup energie ze sítě, a to bez potřeby pokročilejšího řízení. Energií je zároveň možné využít k napájení jakéhokoliv elektrického spotřebiče i v době, kdy fotovoltaický panel nevyrábí žádnou energii.

1.1.1 Princip fungování fotovoltaických panelů

Základem výroby elektřiny ze slunce je fotovoltaický jev, který nastává v polovodičových materiálech. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu solárních článků je křemík. (Mastný, 2011)

Fotovoltaický jev je fyzikální proces, při kterém dochází k přímé přeměně světelné energie (fotonů) na elektrickou energii (napětí a proud) v určitém materiálu. Je to základní princip, na kterém fungují solární (fotovoltaické) články a panely. (Kalásek, 2025)

Aby fotovoltaický jev nastal, musí mít fotony dopadajícího světla dostatečnou energii (pro křemík minimálně 1,12 eV, což odpovídá vlnové délce světla kratší než cca 1105 nm – tedy viditelné světlo a část infračerveného). Záření s delší vlnovou délkou (například mikrovlny) elektrony neuvolní. Jádrem solárního článku je velkoplošný P-N přechod, vytvořený na plátku křemíku spojením vrstvy typu P (s nedostatkem elektronů, "dírami") a tenké vrstvy typu N (s přebytkem elektronů). Mezi nimi vzniká elektrická bariéra. Když světlo dopadne na článek, uvolňuje elektrony z vazeb v křemíku. Klíčovou roli hraje P-N přechod, který funguje jako jednosměrný ventil: odděluje nově vzniklé volné elektrony a "díry". Elektrony se hromadí ve vrstvě N, zatímco díry zůstávají ve vrstvě P. Toto nahromadění oddělených nábojů vytváří mezi horním a spodním kontaktem článku elektrické napětí (u křemíku kolem 0,6 V). Pokud se tyto kontakty propojí vnějším obvodem se spotřebičem

(například motorkem), nahromaděné elektrony začnou tímto obvodem protékat jako elektrický proud a pohánět spotřebič. Energie světla se tak přímo mění na elektrickou energii, a to po celou dobu, co na článek dopadá světlo s dostatečnou energií. (Kusala, 2006)

1.1.2 Typy článků

Fotovoltaické články se dělí do různých kategorií podle krystalové struktury použitého křemíku nebo podle výrobní technologie (Krčmář, 2023a):

Krystalické křemíkové články

- Monokrystalické články

Monokrystalický křemík se vyrábí energeticky náročnou Czochralskiho metodou, která umožňuje vznik jediného velkého ingotu tažením monokrystalického zárodku z vysoce čisté taveniny. Tento ingot se následně řeže na tenké plátky (wafery), jež se dále upravují. Monokrystalické články mají jednolitou tmavou barvu (černou či tmavě modrou) a typický tvar čtverce se seříznutými rohy, což panelům dodává elegantní a kompaktní vzhled. (Donev et al., 2024)

Původně byly monokrystalické články vyráběny převážně z polovodičů typu P. V posledních letech však dochází k výraznému přechodu na polovodiče typu N, které umožňují dosahovat vyšší účinnosti a mají lepší výkonnostní charakteristiky (nižší degradace, lepší teplotní koeficient). (Solarnplus, 2024)

- Polykrystalické články

Polykrystalický křemík vzniká jednodušším procesem než monokrystalický – roztavený křemík se odlévá do formy, kde řízeně tuhne a vytváří strukturu složenou z mnoha menších krystalových zrn. Tento blok se pak řeže na typicky čtvercové plátky (wafery). Materiál tedy obsahuje četné hranice mezi krystaly, které způsobují defekty a vedou k nižší účinnosti článků ve srovnání s monokrystaly. Vzhledově jsou polykrystalické články charakteristické modrou barvou a viditelnou strukturou zrn na povrchu. (Poulek, 2010)

Tenkvrstvé články

- Amorfni křemík

Amorfni křemík je tenkvrstvá fotovoltaická technologie využívající nekystalickou formu křemíku. Jeho neuspořádaná struktura obsahuje mnoho defektů. Vyrábí se nanášením tenké vrstvy na skleněný substrát, což je velmi levné a vyžaduje minimum křemíku. Tato technologie má však nejnižší účinnost a trpí výraznou počáteční

degradací výkonu vlivem světla (~20 %), která se ale po několika měsících stabilizuje. (Donev et al., 2024)

Výhodou je dobrý výkon za špatných světelných podmínek. V současnosti se amorfni křemík používá hlavně pro nízkoenergetické aplikace jako kalkulačky a hodinky nebo ve specifických případech integrované fotovoltaiky. (Ifeoluwa, 2024)

- Tellurid kadmia

Článek se skládá z vrstvy sloučeniny kadmia, telluru a dalších materiálů. Velmi efektivně absorbuje světlo, a proto stačí jen velmi tenká vrstva k vyvolání fotovoltaického jevu. Za posledních zhruba 15 let prošla tato technologie výrazným rozvojem s nárůstem instalovaného výkonu z megawattů na gigawatty a více než zdvojnásobením účinnosti. (U.S. Department of Energy, 2025)

1.1.3 Fotovoltaický panel

Jednotlivé články poskytují relativně malé napětí (cca 0,5-0,6 V). Proto se pro dosažení požadovaného napětí a výkonu spojují sériově a paralelně do větších celků – fotovoltaických panelů. Články jsou zapouzdřeny mezi vrstvami ochranných fólií, krycím sklem (obvykle tvrzeným) a zadní ochrannou fólií nebo dalším sklem (u panelů sklo-sklo). Celé je to zasazeno do rámu (nejčastěji hliníkového), který zajišťuje mechanickou pevnost a umožňuje montáž. (Vobořil, 2016)

Základní parametry panelů:

Jsou udávány za přesně definovaných standardních testovacích podmínek (STC).

- Jmenovitý (špičkový) výkon (P_{max} nebo W_p)
Je základním parametrem udávajícím maximální elektrický výkon, který je fotovoltaický panel schopen dodat. Udává se v jednotkách watt-peak (W_p). Tento výkon je dán součinem napětí a proudu v bodě maximálního výkonu. (Bechník, 2014)
- Účinnost panelu
Vyjadřuje, jak efektivně dokáže panel přeměnit celkovou energii slunečního záření dopadajícího na jeho plochu na využitelnou elektrickou energii. Vyšší účinnost znamená, že panel dokáže z dané plochy získat více elektrické energie. (Krčmář, 2023b)
- Napětí v bodě maximálního výkonu
Hodnota elektrického napětí, při které panel dodává svůj maximální výkon (Bechník, 2014).
- Proud v bodě maximálního výkonu

Hodnota elektrického proudu, který panel dodává při maximálním výkonu (Bechník, 2014).

- Napětí naprázdno

Maximální hodnota napětí, kterou může panel generovat, když k němu není připojena žádná zátěž (Bechník, 2014).

- Zkratový proud

Maximální proud, který panelem může téct (Bechník, 2014).

- Teplotní koeficient

Udává, jak se mění napětí a proud se změnou teploty článků oproti testovací teplotě (25 °C) (Bechník, 2014).

1.1.4 Druhy fotovoltaických střídačů

Střídač, známý také jako invertor, je nezbytnou součástí fotovoltaické elektrárny. Jeho hlavním úkolem je přeměna stejnosměrného proudu, který vyrábějí panely, na střídavý proud vhodný pro běžné spotřebiče a distribuční síť. Ačkoliv výrobci často zdůrazňují maximální účinnost, tato hodnota sama o sobě není plně vypovídající, protože jí střídač dosahuje jen za ideálních podmínek. Pro reálný provoz je mnohem relevantnější tzv. evropská účinnost, která zohledňuje proměnlivou intenzitu slunečního svitu. Nejdůležitějším ukazatelem je však celkové množství energie, které střídač dokáže dodat do sítě či spotřebičům. K tomu zásadně přispívá kvalitní MPP tracker – elektronika, která rychle a přesně vyhledává bod maximálního výkonu panelů i při rychle se měnících podmínkách, jako je proměnlivá oblačnost. Účinnost tohoto sledování by měla přesahovat 99 %. Mezi další faktory, které ovlivňují výkon a spolehlivost střídače, patří přítomnost či absence transformátoru (beztransformátorové typy mají zpravidla vyšší účinnost, zatímco transformátorové poskytují bezpečnější galvanické oddělení), konstrukce s více výkonovými stupni (zvyšuje efektivitu při částečném zatížení a zvyšuje odolnost proti úplnému výpadku), kvalitní systém chlazení a odpovídající stupeň krytí (IP) pro dané umístění, a také pokročilé možnosti monitoringu pro snadnou kontrolu a diagnostiku systému. (Czech RE Agency, 2009)

Lze vybírat mezi jednofázovým nebo třífázovým provedením, s třífázovým provedením se pojí rozdělení na asymetrický nebo symetrický provoz. Symetrický střídač rozděluje vyrobený výkon rovnoměrně do všech tří fází, bez ohledu na aktuální spotřebu na jednotlivých fázích. Asymetrický střídač dokáže dodávat do každé fáze jiný výkon, přesně podle aktuální potřeby na dané fázi až do jeho maximálního podporovaného výkonu na jednu fázi. Je potřeba myslet na to, že tento výkon bývá zpravidla menší než maximální výkon střídače. Asymetrické

střídače jsou z důvodu fázového měření v České republice téměř nutností pro maximální využití energie v objektu. (Eaton, 2024)

On-Grid

Slouží k přímému dodání energie do distribuční sítě. Střídač musí zajistit, aby jím generovaný střídavý proud měl naprosto shodné napětí, frekvenci a fázový posun jako elektrická síť v místě připojení. Tato přesná synchronizace je nezbytná pro bezproblémovou a bezpečnou interakci mezi fotovoltaickým systémem a distribuční sítí, umožňující plynulé toky energie oběma směry. Tento střídavý proud je následně využíván pro okamžitou spotřebu v místě připojení (domácnosti, firmě) nebo je dodáván do distribuční sítě. V případě, kdy je spotřeba objektu vyšší než aktuální výroba fotovoltaického systému (například v noci nebo při nízkém slunečním svitu), je potřebný rozdíl energie automaticky a plynule doplněn odběrem z distribuční sítě. Při výpadku distribuční sítě systém přestane fungovat a objekt zůstane bez proudu stejně jako jakýkoli jiný objekt bez fotovoltaiky. (Eaton, 2024)

Ostrovní

Tyto střídače jsou navrženy pro autonomní fotovoltaické systémy, které nejsou připojeny k distribuční síti. Jejich klíčová schopnost je, že si samy generují potřebnou frekvenci a napětí střídavého proudu. Základní funkcí je komplexní správa energie v rámci izolovaného systému: řídí tok energie z fotovoltaických panelů, zajišťují nabíjení bateriového úložiště a dodávají stabilní střídavý proud pro napájení lokálních spotřebičů. (Eaton, 2024)

Hybridní

Hybridní střídače představují nejvšestrannější typ střídačů, které inteligentně kombinují vlastnosti a funkce předchozích dvou systémů. Mohou pracovat jak v režimu připojení k distribuční síti, tak v ostrovním režimu během výpadků sítě. Umožňují efektivně řídit ukládání a využívání energie v připojeném bateriovém úložišti. Systém monitoruje a řídí pohyb energie mezi čtyřmi klíčovými body: fotovoltaickými panely, bateriovým úložištěm, distribuční sítí a spotřebiči v objektu. Na základě aktuálních podmínek (výroba, stav nabití baterie, spotřeba v objektu, stav sítě) a uživatelsky definovaných priorit střídač dynamicky rozhoduje, odkud bude energie čerpána a kam bude směřována. Výhoda hybridních střídačů je jejich schopnost poskytovat záložní napájení. Při detekci výpadku distribuční sítě se střídač bezpečně odpojí od sítě a téměř okamžitě přepne na napájení vybraných zálohovaných okruhů v objektu. (Eaton, 2024)

1.1.5 Technologie bateriových úložišť

Bateriová úložiště energie jsou stále důležitější technologií pro moderní energetické systémy, jejichž význam roste zejména s rozvojem obnovitelných zdrojů, jako jsou fotovoltaické elektrárny. Jejich základní funkcí je ukládat elektrickou energii pro pozdější využití, čímž řeší klíčový problém fotovoltaiky – její přerušovanou výrobu závislou na slunečním svitu a z ní plynoucí nesoulad mezi produkcí a spotřebou. Bateriová úložiště umožňují efektivně zachytit přebytečnou solární energii vyrobenou během dne a dodávat ji v době, kdy fotovoltaické panely nevyrábějí (v noci, při špatném počasí) nebo při vysoké poptávce. Tímto způsobem maximalizují využití čisté solární energie a zvyšují energetickou soběstačnost uživatelů. (Beneš, 2024)

Zároveň poskytují energetickou nezávislost a záložní napájení, protože mohou dodávat energii i během výpadků distribuční sítě a zajistit tak chod vybraných spotřebičů. V kombinaci s chytrým řízením také umožňují optimalizovat náklady na energii, například ukládáním levnější energie ze sítě nebo účastí na podpůrných službách pro stabilizaci sítě, přičemž fungují jako vyrovnávací prvek mezi proměnlivou výrobou a spotřebou. V širším měřítku pak usnadňují integraci obnovitelných zdrojů do energetické soustavy tím, že pomáhají vyrovnávat jejich proměnlivou produkci a zvyšují stabilitu sítě, což je důležité i pro rozvoj energetiky v České republice. (Gogreenner, 2024)

Klíčové parametry (TLS, 2025):

- **Kapacita**
Pro energetická úložiště, jako jsou ta používaná s fotovoltaikou, je relevantním ukazatelem energetická kapacita v kilowatthodinách. Ta představuje celkové množství energie, které baterie může uložit a dodat, a vypočítá se jako součin jejího napětí (V) a jmenovité kapacity (Ah), dělený tisícem. Je zásadní rozlišovat mezi touto jmenovitou energetickou kapacitou a skutečně využitelnou kapacitou, která je v praxi vždy nižší. Důvodem je, že baterie se obvykle nevybíjejí úplně na 0 %, aby se chránily a prodloužila se jejich životnost. Kapacita bateriových úložišť se dimenzuje v závislosti na spotřebě objektu a požadované míře zálohování energie.
- **Výkon**
Výkon charakterizuje rychlost, s jakou může baterie dodávat nebo přijímat energii.
- **Životnost**

Udává, jak dlouho bude schopna efektivně ukládat a dodávat energii, než její kapacita nebo výkon klesnou pod přijatelnou úroveň. Měří se podle počtu provedených cyklů nabití/vybití nebo podle stáří baterie.

- Účinnost

Určuje energetické ztráty, ke kterým dochází během procesu nabíjení a vybíjení.

- Hloubka vybití

Udává, jaké procento jmenovité kapacity baterie je skutečně vybito během jednoho cyklu.

- Dalšími parametry jsou například hustota energie nebo rozsah teplotního použití.

Lithium-iontové (Li-Ion) baterie

Představují dominantní technologii v oblasti moderních bateriových úložišť, včetně aplikací ve fotovoltaických systémech. Vyznačují se vysokou energetickou hustotou (umožňují uložit značné množství energie v relativně malém objemu a hmotnosti), vysokou účinností přeměny energie (typicky přes 90 %), delší cyklickou životností ve srovnání se staršími technologiemi (například olověnými bateriemi) a relativně nízkým samovybíjením. Mezi hlavní nevýhody patří nižší vnitřní bezpečnost a vyšší riziko tepelného úniku při poruše nebo nesprávné instalaci. (Wigness, 2025)

Lithium-železo-fosfátové (LiFePO₄/LFP) baterie

Tyto baterie spadají pod kategorii lithium-iontových baterií, ale svými vlastnostmi se od většiny odlišují. Jsou obzvláště vhodné pro stacionární energetická úložiště, jako jsou domácí baterie pro fotovoltaické systémy. Jejich hlavní předností je vysoká bezpečnost, vyplývající ze stabilní chemické struktury, která je výrazně odolnější proti nebezpečnému tepelnému úniku ve srovnání s jinými Li-Ion typy a při případném rozkladu neuvolňují kyslík. Další klíčovou výhodou je mimořádně dlouhá cyklická životnost (2000 a více). LFP baterie také dobře snášejí vyšší provozní teploty a jsou ekologicky šetrnější, protože neobsahují problematický kobalt ani nikl. Mezi nevýhody patří nižší energetická hustota, což znamená, že jsou těžší a objemnější než jiné typy při stejné kapacitě, a také pokles výkonu při nízkých teplotách. Počáteční investice je ve většině případech vyšší než u alternativ, avšak toto je částečně kompenzováno jejich delší životností. (Zachary, 2024)

Olověné baterie

Olověné baterie představují nejstarší a nejzavedenější technologii dobíjecích akumulátorů, zahrnující jak údržbové zaplavené typy, tak bezúdržbové uzavřené varianty jako AGM a GEL. Jejich hlavními výhodami vždy byly nízká pořizovací cena a značná robustnost. Mají však řadu podstatných nevýhod: především nízkou energetickou hustotu, kvůli které jsou velké a těžké, krátkou cyklickou životnost čítající typicky jen několik stovek cyklů a omezenou doporučenou hloubku vybití (často jen do 50 %), aby se předešlo jejich rychlé degradaci. Zaplavené typy navíc vyžadují pravidelnou údržbu spočívající v doplňování destilované vody. V současnosti jsou pro většinu rezidenčních a komerčních fotovoltaických aplikací výrazně vytlačovány modernějšími lithium-iontovými bateriemi díky jejich celkově lepším parametrům. Olověné baterie však stále nacházejí uplatnění v některých nízkonákladových nebo specifických instalacích. (ECOFLOW, 2023)

1.1.6 Systém řízení baterie (BMS)

Jedná se o sofistikovaný elektronický systém, často realizovaný jako specializovaná deska s plošnými spoji, jehož primárním úkolem je dohled, řízení a ochrana baterií. Tento dohled se vztahuje jak na jednotlivé bateriové články, tak na celý bateriový pack. Jeho význam vzrostl s rozšířením lithium-iontových technologií, které vyžadují precizní řízení a ochranu pro zajištění bezpečnosti a dlouhé životnosti. (Křčmář, 2023c)

Základem je přesné a nepřetržité monitorování parametrů baterie, neboť bez spolehlivých dat nemůže BMS efektivně zajišťovat ochranu, řízení ani optimalizaci jejího provozu. Mezi sledované veličiny patří napětí, a to nejen celkové napětí bateriového packu, ale především napětí jednotlivých článků či modulů, což umožňuje detekovat jejich nerovnováhu a předcházet poškození přebitím nebo hlubokým vybitím. Dále monitoruje nabíjecí a vybíjecí proud a sleduje teplotu na různých místech baterie, protože teplota zásadně ovlivňuje výkon, životnost a bezpečnost. Také odhaduje stav nabití (SOC), což je procento zbývající energie, a stav životnosti (SOH), který popisuje míru degradace baterie oproti novému stavu. Monitoruje také rozdíly mezi články pro potřeby jejich aktivního nebo pasivního vyvažování (balancování). (Redway, 2023)

Komunikace je klíčová pro integraci a výměnu informací s ostatními částmi systému, jako je střídač, systém energetického managementu (EMS) nebo diagnostické nástroje. Typicky předává informace o aktuálním stavu, naměřených hodnotách, bezpečných provozních limitech (maximální nabíjecí/vybíjecí proudy) a alarmech či chybových stavech. Pro tuto komunikaci se

nejčastěji využívají standardní průmyslové protokoly, zejména CAN sběrnice nebo RS-485. (Liu, 2024)

1.2 Chytré řízení energetických systémů v domácnosti

Tato kapitola se zaměřuje na inteligenci, která tyto systémové komponenty propojuje a řídí. Právě chytré řízení umožňuje efektivně využívat potenciál těchto technologií, optimalizovat energetické toky a dosahovat cílů, jako jsou finanční úspory nebo maximální vlastní využití vyrobené energie.

1.2.1 Koncept Smart Home a Smart Grid v kontextu energetiky

Smart Home označuje domácnost s automatizací a ovládáním různých zařízení, včetně energetických systémů jako FVE, baterie či nabíjení elektromobilů, s cílem zvýšit pohodlí a úspory. Pro energetiku to znamená možnosti monitoringu spotřeby a výroby, automatického řízení spínání spotřebičů podle aktuální situace (například přebytků z FVE, cen energie) a optimalizace souhry systémů (například vytápění/chlazení a FVE). (Dvořák, 2023)

Na druhé straně Smart Grid představuje modernizovanou elektrickou síť s obousměrnou komunikací mezi všemi účastníky trhu, což umožňuje lepší integraci obnovitelných a malých distribuovaných zdrojů (včetně domácích FVE a baterií), aktivní řízení poptávky pro stabilizaci sítě a celkové zvýšení efektivity a spolehlivosti dodávek energie. (Poudel, 2025)

Propojením vznikne systém řízení energie (EMS), který spojuje chytrou domácnost s chytrou sítí a optimalizuje domácí spotřebu energie podle cen, vlastní výrobu z FVE a signálů ze sítě. Umožňuje domácnosti automaticky reagovat na dynamické ceny elektřiny posunem spotřeby, poskytovat síti flexibilitu a podpůrné služby, zejména při využití baterií nebo chytrého nabíjení. (Molek, 2023)

1.2.2 Činnosti, metody a algoritmy řízení toků energie

Systém řízení lze rozdělit na pět hlavních činností (Vilimec, 2008):

1. Sbírá a zpracovává data. Měří, ukládá a kontroluje provozní hodnoty a vede protokoly.
2. Chrání zařízení. Zabraňuje poruchám a výpadkům, zejména v mimořádných stavech.
3. Udržuje vybrané parametry na požadované úrovni během normálního chodu.
4. Zajišťuje řízení během mimořádného stavu.
5. Optimalizuje. Provádí výpočty pro zlepšení efektivity a ekonomiky.

Realizace těchto činností záleží na konkrétním typu energetického zdroje (Vilimec, 2008).

V řízení lze rozlišit dvě základní kategorie přístupů:

- **Jednoduché pravidlové řízení (Rule-Based Control)**
Základem je sada předem definovaných logických pravidel ve formátu "pokud-pak" ("if-then"). Řídící akce jsou spouštěny, když specifické měřené proměnné překročí stanovené prahové hodnoty. Tyto systémy jsou typicky bezpaměťové, což znamená, že rozhodnutí jsou založena pouze na aktuálním stavu systému, nikoli na historii nebo budoucích predikcích. Reagují na události až poté, co nastanou. (Péan, 2019) Pravidlo může znít například takto: IF (Výroba_FVE > Spotřeba_Domu) AND (SoC_Baterie == 100 %) THEN Zapni_ohřev_bojleru = TRUE.
- **Optimalizační řízení**
Patří sem metody, které využívají matematické techniky k nalezení nejlepší strategie pro provoz energetických zdrojů v určitém budoucím časovém období. Tyto systémy pracují proaktivně na základě předpovědi výroby, spotřeby a cen energie. Jejich cílem je například minimalizovat náklady na energii, snížit emise CO₂ nebo maximalizovat uživatelský komfort, a to vše při dodržení stanovených provozních a uživatelských omezení. Mezi používané metody patří například lineární programování, dynamické programování, heuristiky a modelově prediktivní řízení. Základním úkolem je tedy najít matematicky optimální posloupnost řídicích kroků pro energetické zdroje, aby bylo co nejlépe dosaženo stanoveného cíle v rámci daných podmínek. (GridX, 2025)

1.2.3 Komunikační protokoly a standardy

Aby mohly systémy chytrého řízení energie efektivně fungovat, je nezbytná jejich schopnost komunikovat jak s interními komponentami (jako jsou střídače, baterie, chytré elektroměry a řízené spotřebiče), tak s externími službami (například poskytovateli dat o cenách energií nebo předpovědi počasí). Tato komunikace využívá různé protokoly a standardy, které definují způsob přenosu a formát dat. Umožňují vzájemnou spolupráci různých zařízení, zajišťují spolehlivost a bezpečnost výměny dat.

Mezi hlavní zástupce patří:

- **Protokol Modbus**
Jedná se o jeden z nejstarších a nejrozšířenějších komunikačních protokolů v oblasti průmyslové automatizace. Jeho historie sahá až do roku 1979, kdy byl vyvinut společností Modicon. Vyznačuje se jednoduchostí, otevřeností a absencí licenčních poplatků. Modbus existuje hlavně ve dvou variantách: RTU pro sériovou komunikaci

(RS-232/485), který používá binární formát a CRC pro kontrolu chyb, a TCP/IP pro Ethernet, který zapouzdřuje Modbus data do TCP paketů, používá MBAP hlavičku a spoléhá na TCP/IP pro zajištění spolehlivosti přenosu. (Maple Systems, 2024)

- Protokol MQTT

Jde o odlehčený síťový protokol fungující na principu publikování a odebírání. Byl navržen speciálně pro komunikaci mezi zařízeními v prostředích s omezeními, jako je malá šířka pásma, vysoká latence nebo nespolehlivé sítě, což ho činí velmi vhodným pro aplikace internetu věcí (IoT) a komunikaci M2M (stroj-stroj). Umožňuje efektivní přenos malých zpráv s nízkou režii a typicky se používá pro odesílání telemetrických dat (například z čidel do cloudu) nebo pro příjem řídicích příkazů. Protokol vyvinuli v roce 1999 Andy Stanford Clarke a Arlen Nipper (IBM). Dnes je standardizován organizací OASIS a stal se jedním z dominantních komunikačních protokolů v oblasti IoT. (Prokosch, 2025)

- Protokol OCPP

Je navržen pro komunikaci v ekosystému nabíjení elektrických vozidel. Jeho hlavním účelem je standardizovat komunikaci mezi nabíjecími stanicemi a centrálními systémy správy. (Autonabíjení, 2022)

- Protokol CAN

Původně byl vyvinut pro automobilový průmysl, ale používaná se i v průmyslu a energetice. Je běžná pro komunikaci mezi BMS a střídačem v rámci bateriových systémů, kde zajišťuje rychlý a spolehlivý přenos kritických dat. (IPC2U, 2024)

- REST API

Jedná se o způsob komunikace pro webové služby. Řídicí jednotka posílá HTTP požadavky na server poskytovatele dat (například API operátora trhu OTE pro ceny, API meteorologické služby pro předpověď) a přijímá odpověď, obvykle ve formátu JSON nebo XML. (IBM, 2025)

1.2.4 Hardware pro řízení

Řídicí algoritmus a komunikační logika musí běžet na nějaké hardwarové platformě – řídicí jednotce. Volba této platformy závisí na složitosti algoritmu, požadovaném výkonu, počtu připojených zařízení, ceně a preferencích vývojáře. Pro domácí systémy řízení energie přicházejí v úvahu zejména následující typy hardwaru:

ESP32

Představuje velmi populární a cenově dostupnou řadu mikrokontrolérů (systémů na čipu – SoC), které jsou charakteristické především integrovanou Wi-Fi a často i Bluetooth konektivitou. Celý ekosystém ESP32 byl vyvinutý společností Espressif Systems. Přestože mají nižší výpočetní výkon než jednočipové počítače, jsou dostatečné pro mnoho jednodušších řídicích úloh, sběr dat a zejména pro aplikace v oblasti internetu věcí (IoT) a vestavných systémů. Mezi jejich klíčové výhody patří nízká spotřeba energie a nízká cena. Architektonicky jsou ESP32 nejčastěji postaveny na jednojádrových nebo dvoujádrových 32bitových procesorech Xtensa LX6 nebo LX7 s taktem až 240 MHz, ale novější varianty jako ESP32-C3, ESP32-H2 nebo ESP32-P4 využívají i jádra RISC-V. Některé specifické modely, jako ESP32-H2, navíc integrují podporu pro standard IEEE 802.15.4, což například umožňuje využití protokolu Matter, a rozšiřuje tak jejich uplatnění v mesh sítích pro chytrou domácnost či průmyslovou automatizaci. Programování probíhá typicky v jazycích C/C++ (s využitím frameworků jako Arduino nebo ESP-IDF) nebo v MicroPythonu. (Wilcher, 2024)

ESP32 obvykle neběží na plnohodnotném operačním systému, například Linuxu. Místo toho funguje buď přímo "na železe" (bare-metal) nebo častěji s operačním systémem reálného času (RTOS), jako je FreeRTOS, který je integrován v oficiálním vývojovém prostředí ESP-IDF. Použití RTOS umožňuje efektivní multitasking (současné zvládnání komunikace, senzorů a řízení) a podporuje i symetrický multiprocessing na dvoujádrových variantách pro vyšší výkon. Díky tomu je ESP32 s RTOS vhodnější pro časově kritické úlohy než Raspberry Pi s Linuxem, i když pro extrémně náročné nebo bezpečnostně kritické aplikace nemusí dosahovat robustnosti specializovaných systémů nebo PLC. (Gautam, 2025)

Raspberry Pi

Jedná se o velmi populární a cenově dostupný jednodeskový počítač s velkou vývojářskou komunitou. Nabízí dostatečný výpočetní výkon (díky vícejádrovým ARM procesorům a výrazně větší operační paměti RAM než mikrokontroléry, například až 8 GB u modelů Pi 4/5), širokou škálu rozhraní (GPIO, USB, Ethernet, Wi-Fi, BT) a snadnou programovatelnost. Běží na plnohodnotném operačním systému Linux (například Raspberry Pi OS), což usnadňuje vývoj, poskytuje přístup k mnoha knihovnám a zjednodušuje síťové služby. Je však méně vhodný pro úlohy v reálném čase, na rozdíl od ESP32 nebo PLC. Spotřeba energie je také vyšší. (Ultimate Systems, 2025)

Často se používá jako centrální jednotka chytré domácnosti, na které běží systémy jako například Home Assistant. To je bezplatný software navržený pro domácí automatizaci. Umožňuje uživatelům ovládat širokou škálu chytrých domácích zařízení z jediného systému. Umožňuje komunikaci mezi zařízeními různých značek, která by za normálních okolností nespolupracovala. (Davidson, 2023)

Programovatelné logické automaty

Programovatelné logické automaty (PLC) představují dominantní typ řídicích systémů v průmyslové praxi. Jejich klíčovou charakteristikou je uživatelská programovatelnost, která je usnadněna díky intuitivním a vizuálně orientovaným programovacím jazykům. Tyto jazyky, často grafické povahy, umožňují tvorbu řídicích algoritmů způsobem připomínajícím kreslení technických schémat (kontaktních, logických, blokových či stavových). Tato přístupnost rozšiřuje jejich použití i mezi odborníky bez hluboké programátorské specializace, jako jsou konstruktéři či projektanti automatizovaných systémů. Současné programovací jazyky pro PLC jsou standardizovány mezinárodní normou IEC/EN 61131-3, která definuje textové jazyky (IL, ST) a grafické jazyky (LD, FBD), spolu s prostředkem pro popis sekvenčních úloh (SFC). Někteří výrobci doplňují tuto nabídku o další jazyky, včetně jazyka C. Původně byly PLC koncipovány pro řešení logických úloh a náhradu reléových systémů. Dnes se však jejich aplikační možnosti výrazně rozšířily. Moderní PLC dokážou zpracovávat komplexní úlohy včetně numericky náročných regulačních algoritmů, simulací, diagnostiky a prvků umělé inteligence. Staly se tak univerzálními řídicími platformami. Jejich flexibilita je dále podpořena rozsáhlými komunikačními možnostmi, integrací průmyslových sběrnic a podporou komunikačních standardů. Pro zdůraznění těchto pokročilých schopností se někdy používá termín PAC. Z hlediska konstrukčního provedení se PLC obvykle dělí na kategorie: mikroPLC (malý počet vstupů/výstupů), kompaktní PLC (střední počet I/O) a modulární PLC (umožňující sestavení rozsáhlých systémů se stovkami až tisíci I/O různých typů a se specializovanými moduly). Existuje také varianta s integrovaným operátorským panelem, označovaná jako OPLC. (Maixner, 2006)

Senzory a převodníky

Kromě řídicí jednotky jsou potřeba i senzory pro získávání dat. Jde například o:

- Chytré elektroměry
Pro přesné měření celkové spotřeby domu nebo spotřeby/výroby na jednotlivých fázích.
- Proudové senzory

Pro měření proudu na konkrétních okruzích.

- Teplotní senzory

Pro monitoring teploty.

- Převodníky rozhraní

Například ETH na RS485 pro připojení Modbus zařízení k PLC.

1.3 Spotový trh s elektřinou

Jedním z hlavních vstupů pro pokročilé řídicí algoritmy, zejména ty optimalizační, jsou informace o cenách energie. Zatímco tradiční dodávky elektřiny pro domácnosti často probíhají za fixní ceny, stále větší význam nabývá spotový (denní) trh s elektřinou, kde se ceny mění na hodinové bázi v závislosti na aktuální nabídce a poptávce.

Tato kapitola se proto zaměřuje na principy fungování spotového trhu, specificky v podmínkách České republiky, kde je organizován Operátorem trhu (OTE, a.s.). (Zemková, 2020) Vysvětlí, jak se tvoří hodinové ceny, jaké faktory je ovlivňují a jaká je jejich typická proměnlivost. Rovněž bude popsáno, jaké příležitosti tento dynamický trh nabízí pro domácnosti vybavené fotovoltaickým systémem s bateriovým úložištěm.

1.3.1 Princip fungování spotového trhu

Jedná se o segment krátkodobých trhů s elektřinou. Umožňuje obchodování s elektřinou pro dodávku ve velmi krátkém časovém horizontu – typicky na následující den (denní trh) nebo dokonce v rámci téhož dne dodávky (vnitrodenní trh). Tyto spotové trhy hrají klíčovou roli v zajištění krátkodobé rovnováhy mezi nabídkou a poptávkou, umožňují účastníkům trhu flexibilně reagovat na aktuální podmínky a poskytují důležité cenové signály o momentální hodnotě elektřiny. (Krejcar, 2016)

Liší se tak od dlouhodobých kontraktů, kde je cena fixována na delší období (měsíce, roky). Ceny na spotovém trhu mnohem přesněji odrážejí aktuální situaci v energetické soustavě.

Patří sem:

- Denní trh

Funguje na principu aukce organizované den předem (D-1) pro dodávky na následující den (D). Aukce probíhá koordinovaně s ostatními propojenými evropskými trhy. Pro každou z 24 hodin dne D probíhá samostatná aukce. Účastníci podávají své nabídky na prodej (výrobci) a poptávky na nákup (dodavatelé, velcí spotřebitelé) pro každou hodinu následujícího dne, včetně objemu a ceny. Spárováním nabídek a poptávek se určí tzv.

marginální cena. Všechny nabídky prodeje s cenou nižší než marginální a všechny poptávky nákupu s cenou vyšší než marginální, jsou v dané hodině přijaty a uskutečněny za tuto marginální cenu. (Krejcar, 2016)

Výsledky aukce, tedy hodinové ceny a zobchodované objemy pro následující den, jsou zveřejňovány společností OTE na jejích webových stránkách kolem 13. hodiny. (ČEZ, 2025)

- Vnitrodenní trh

Tento trh umožňuje obchodování přímo v den dodávky, typicky několik hodin předem (v režimu H-1, tj. hodinu před dodávkou se obchodování pro danou hodinu uzavírá). Využívá se tzv. průběžné obchodování. Slouží účastníkům trhu k vyrovnání jejich pozic v případě neplánovaného přebytku nebo nedostatku energie krátce před samotnou dodávkou. (Krejcar, 2016)

- Blokovaný trh

Zde se kontinuálně obchodují standardizované denní bloky elektřiny (základní, špičkový, mimošpičkový) (Krejcar, 2016).

- Vyrovnávací trh

Obchodování s regulační energií určenou k vyrovnávání odchylek v soustavě. Jediným kupujícím je provozovatel přenosové soustavy. (Krejcar, 2016)

Na českém spotovém trhu s elektřinou působí několik klíčových subjektů, každý s jasně danou rolí. Ústředním organizátorem je OTE (Operátor trhu), který zajišťuje fungování krátkodobých trhů (denního a vnitrodenního), spravuje obchodní platformu, páruje obchody a zúčtovává odchylky jednotlivých účastníků. Výrobci elektrickou energii produkují a nabízejí ji na trhu k prodeji, přičemž musí co nejpřesněji predikovat objem své výroby. Jako prostředníci vystupují obchodníci a dodavatelé, kteří nakupují elektřinu na velkoobchodním trhu a následně ji prodávají koncovým zákazníkům, za jejichž odchylky od plánu nesou odpovědnost. Velcí spotřebitelé, typicky průmyslové podniky, svou poptávkou významně ovlivňují tržní ceny a mohou na trhu působit přímo nebo prostřednictvím dodavatele. O stabilitu a rovnováhu celé elektrizační soustavy pečuje ČEPS, který využívá regulační energii nakupovanou na vyrovnávacím trhu. Fyzickou distribuci ke koncovým spotřebitelům a měření spotřeby zajišťují provozovatelé distribučních soustav (PDS). Na celý energetický sektor pak dohlíží ERÚ, který stanovuje pravidla, uděluje licence a reguluje část cen energií. (Hrozek, 2016)

1.3.2 Tvorba ceny a volatilita

Jak již bylo zmíněno, cena na denním trhu je určena jako marginální cena – tedy cena nejdražšího zdroje, který musí být zapojen, aby pokryl poptávku v dané hodině. Tato cena je ovlivněna řadou dynamických faktorů, což vede k její značné volatilitě v čase.

Faktory ovlivňující cenu:

- Poměr nabídky a poptávky
Cena elektřiny se řídí tržním principem: vysoká poptávka nebo nízká nabídka cenu zvyšují, zatímco nízká poptávka a vysoká nabídka ji snižují. Výše poptávky určuje mezní cenu – při vyšší poptávce je nutné zapojit dražší zdroje, což ji zvyšuje, při nižší poptávce je efekt opačný. Poptávka kolísá během dne, týdne i roku. (Kuruc, 2024)
- Skladba výrobních zdrojů
Elektrárny se do sítě zapojují postupně podle svých provozních nákladů, od nejlevnějších (obnovitelné zdroje – OZE, jádro) po nejdražší (často plyn). OZE, jako vítr a slunce, mají téměř nulové náklady, a když hodně vyrábějí, vytlačují dražší zdroje a snižují výslednou mezní cenu. (Hicl, 2022)
- Počasí
Sluneční svit a rychlost větru přímo ovlivňují výrobu FVE a větrných elektráren. Vysoká výroba z OZE snižuje potřebu dražších zdrojů a tlačí cenu dolů. Teplota ovlivňuje poptávku po vytápění v zimě a chlazení v létě. (Hicl, 2022)
- Ceny emisních povolenek
Náklady na emisní povolenky jsou důležitou součástí ceny elektřiny z fosilních paliv (uhlí, plyn), protože tyto elektrárny musí za emise CO₂ platit. Cena povolenky se tak promítá do jejich nabídky na trhu. Jelikož právě tyto zdroje (zejména plynové) často určují konečnou mezní cenu elektřiny, má cena povolenek přímý vliv na její výši. Vyšší cena povolenek znamená dražší elektřinu, přičemž tento vliv může tvořit až kolem 30 % výsledné ceny, pokud je určujícím zdrojem plynová elektrárna. (Tramba, 2025)
- Propojení trhů
Propojení českého trhu s elektřinou s okolními zeměmi umožňuje, aby elektřina proudila přes hranice z levnějších do dražších oblastí, pokud to kapacity vedení dovolí. To vede k efektivnějšímu využití elektráren v regionu a ke sbližování cen mezi propojenými trhy. České ceny jsou tak výrazně ovlivněny situací v sousedních zemích, především v Německu. Pokud kapacity na hranicích nestačí, mohou se ceny jednotlivých trhů od sebe oddělit. (Kubišta, 2015)

- Ostatní

Patří sem ceny paliv, dostupnost výrobních zdrojů a omezení v distribuční síti.

Ceny elektřiny se během dne mění, kdy nejnižší bývají v noci a během dne při vysoké výrobě solárních elektráren, nejvyšší naopak v ranní a večerní špičce. Sezónně jsou ceny obvykle vyšší v zimě kvůli vytápění. Mohou nastat i extrémy jako jsou záporné ceny při velkém přebytku výroby (například větrné a slunečné víkendy), kdy se platí za spotřebu, nebo naopak velmi vysoké ceny při nedostatku elektřiny.

1.3.3 Příležitosti pro domácnosti s FVE a baterií

Pro domácnosti, které odebírají elektřinu za ceny navázané na spotový trh a zároveň disponují fotovoltaickým systémem s bateriovým úložištěm, se otevírají zajímavé možnosti pro optimalizaci nákladů a efektivnější využití energie. Chytrý systém řízení, který zná budoucí hodinové ceny a má k dispozici predikce výroby a spotřeby, může realizovat následující strategie:

- Cenově řízené nabíjení baterie ze sítě

Spočívá v tom, že systém identifikuje hodiny, kdy je cena elektřiny na spotovém trhu nízká nebo dokonce záporná (typicky v noci nebo při vysoké výrobě z obnovitelných zdrojů), a v tuto dobu levně nabije baterii přímo ze sítě. Tuto levně nakoupenou energii pak domácnost využije později, v době vysokých cen (například během večerní špičky), a nemusí tak draze nakupovat ze sítě. Obzvláště výhodné jsou záporné ceny, kdy dodavatelé fakticky platí za spotřebu elektřiny, což se stává častěji s rostoucím podílem OZE. Cílem je snížit náklady na energie využitím těchto cenových rozdílů. (Zilvar, 2023)

- Optimalizace využití vlastní výroby FVE

Systém se snaží maximalizovat spotřebu vlastní levné elektřiny přímo z FVE a energie uložené v baterii (ať už pochází z FVE nebo z levného nákupu ze sítě). Zároveň minimalizuje nákup drahé elektřiny ze sítě v době vysokých cen. Při provozu systém upřednostňuje přímou spotřebu z FVE. Pokud FVE vyrábí více, než se spotřebuje, energie se primárně ukládá do baterie. (Zilvar, 2023)

- Řízení spotřebičů

Systém může snížit náklady tím, že posune provoz energeticky náročných, ale časově flexibilních spotřebičů do doby, kdy je elektřina levná, zdarma nebo je přebytek

vyrobené energie. Jedná se například o ohřev vody v bojleru, provoz tepelného čerpadla nebo nabíjení elektromobilu. (Baroch, 2023)

- Povolení/zakázání prodeje energie do sítě

Patří sem zavedení komunitní energetiky, která umožňuje sdílení vyrobené elektřiny mezi více odběrnými místy. Energie se primárně spotřebuje nebo sdílí v komunitě, případné přebytky lze prodat nebo využít pro agregaci flexibility. Toto sdílení vyžaduje registraci u Elektroenergetického datového centra (EDC). Do agregace flexibility se domácnosti mohou zapojit prostřednictvím firmy (agregátora flexibility). Ta sdružuje schopnost mnoha malých zdrojů (jako jsou domácí baterie) krátkodobě měnit odběr či dodávku a nabízí ji jako službu pro stabilizaci sítě provozovateli přenosové soustavy (ČEPS). Agregátor pak na dálku řídí připojené baterie podle potřeb sítě a majitelům za tuto poskytnutou flexibilitu vyplácí finanční odměnu. (SolárníNovinky.cz, 2024) V případě, že je cena i po odečtení marže obchodníka vyšší než záporná, může systém přebytky prodávat do sítě. V opačném případě zakáže prodej a omezí výrobu. (Berdár, 2023)

1.3.4 Způsoby získávání dat o cenách

Informace o aktuálních spotových cenách elektřiny na českém velkoobchodním trhu pro denní trh jsou veřejně k dispozici. Pro chytré systémy řízení energií je klíčové mít k těmto datům spolehlivý automatizovaný přístup. Lze je získat několika způsoby:

- Oficiální zdroj – OTE, a.s.

Nachází se na webových stránkách OTE v sekci denního trhu, kde je lze prohlížet nebo stáhnout (například jako XLS, XML) a provést parsování webové stránky (web scraping). (Coderslab, 2024) Data jsou také poskytována přes strukturované XML služby nebo modernější API rozhraní, což je preferovaná metoda pro automatizaci. Přístup k těmto službám je však obvykle určen pro registrované účastníky trhu a může být zpoplatněn. (OTE, 2025)

- Alternativní zdroje dat

Existuje několik webových stránek a mobilních aplikací, které přebírají data od OTE a prezentují je ve velmi uživatelsky přívětivé formě, často s grafy a historickým vývojem. Zároveň je mohou poskytovat v různých formách pro stahování (například XML nebo JSON). (Domat, 2025)

Pro získání dat o budoucích hodinových spotových cenách je tedy nejlepší sledovat web OTE nebo jiné zdroje den předem po 14:00 nebo pravidelně kontrolovat dostupnost nových dat.

1.4 Predikce výroby a spotřeby energie

Kromě znalosti budoucích cen energií jsou zásadní také co nejpřesnější predikce budoucí výroby energie z fotovoltaického systému a budoucí spotřeby energie v domácnosti. Bez těchto predikcí by řídicí systém nemohl efektivně plánovat například nabíjení/vybíjení baterie nebo spínání spotřebičů tak, aby minimalizoval náklady nebo maximalizoval využití vlastní vyrobené energie.

Tato kapitola se proto věnuje metodám a přístupům, které se používají pro krátkodobou predikci (typicky na horizont několika hodin až dní) výroby energie z FVE a spotřeby energie v rezidenčním sektoru. Nejprve se zaměří na metody predikce FVE výroby, které typicky vycházejí z předpovědi počasí. Následně představí metody pro predikci spotřeby domácnosti, které zohledňují historická data a vzorce chování uživatelů. V závěru kapitoly bude zdůrazněn význam přesnosti těchto predikcí pro celkovou efektivitu chytrého řízení.

1.4.1 Metody predikce výroby FVE

Výroba elektrické energie z fotovoltaického systému je silně závislá na aktuálních meteorologických podmínkách, především na intenzitě slunečního záření dopadajícího na panely. Dalšími ovlivňujícími faktory jsou teplota panelů, případné zastínění, stav povrchu panelů (znečištění) a jejich technické parametry. (Silekro, 2025)

Existuje několik přístupů k predikci FVE výroby:

- Fyzikální přístup

Využívá fyzikální principy a meteorologická data (jako oblačnost, teplota, sluneční ozáření) k modelování přeměny slunečního záření na elektřinu. Tyto modely berou v úvahu specifika dané lokality, orientaci panelů a historická data. Častou implementací tohoto přístupu je využití satelitních snímků, které zachycují povrchové sluneční záření. Z těchto snímků se analyzuje oblačnost a odvozuje se index jasné oblohy, který udává poměr skutečného globálního horizontálního ozáření k teoretickému ozáření za bezmračné oblohy. Z tohoto se pak odvozuje ozáření na nakloněné panely a následně výkon FVE. (Iheanetu, 2022)

Při předpovídání pomocí satelitních dat se používají dva hlavní směry (Iheanetu, 2022):

1. Využití pouze časových informací: Predikce budoucího výkonu je založena na historických časových řadách dat o ozáření pro dané místo. Používají se metody jako perzistence, autoregresní modely nebo umělé neuronové sítě.
 2. Využití prostorových a časových informací: Tyto metody kombinují časové řady s informacemi z okolních oblastí zachycených na satelitních snímcích. Patří sem například analýza pohybu mraků (Cloud Motion Vector – CMV) nebo statistické modely (například autoregresní), které zahrnují data z okolních pixelů. Zahrnutí prostorových informací obecně vede ke zlepšení přesnosti předpovědi.
- Statistické techniky

Jsou založeny na analýze historických dat. Hledají statistické vztahy mezi vstupními proměnnými (jako jsou meteorologická data – oblačnost, teplota, vítr, vlhkost – nebo historický výkon FVE) a budoucím výkonem FVE. Mezi tyto techniky patří jak tradiční statistické metody (například regresní analýza), tak moderní přístupy umělé inteligence a strojového učení, jako jsou umělé neuronové sítě. (Iheanetu, 2022)

Statistické modely lze dělit podle několika kritérií (Iheanetu, 2022):

 - Podle modelu

Přímé modely předpovídají výkon FVE přímo z historických dat výkonu a dalších vstupů. Nepřímé modely nejprve předpovídají relevantní meteorologické veličiny (například sluneční ozáření) a v druhém kroku tento výsledek transformují na předpověď výkonu FVE.
 - Predikční horizont

Předpovědi se dělí podle délky období, na které se vztahují – od velmi krátkodobých (sekundy až minuty), přes krátkodobé (hodiny až dny, důležité pro provoz sítě), střednědobé (týdny až měsíc, pro plánování údržby) až po dlouhodobé (měsíce až rok, pro strategické plánování).
 - Rozsah predikce

Rozlišuje se předpověď pro jednu konkrétní FVE elektrárnu nebo regionální předpověď pro souhrn výkonu více elektráren v dané oblasti.
 - Typ výstupu

Deterministické metody poskytují jednu konkrétní hodnotu předpovědi. Probabilistické metody poskytují rozsah možných hodnot a jejich pravděpodobnost, čímž lépe vystihují nejistotu předpovědi.
 - Hybridní metody

Kombinují různé přístupy, nejčastěji fyzikální a statistické techniky, s cílem dosáhnout vyšší přesnosti předpovědi. Může jít také o kombinaci dvou různých fyzikálních nebo statistických metod. Hlavní nevýhodou hybridních metod je jejich vyšší složitost, protože zahrnují více než jednu techniku, a s tím spojené vyšší nároky na výpočetní zdroje. (Iheanetu, 2022)

Data pro meteorologickou předpověď potřebnou pro tyto modely lze získat z různých zdrojů, včetně veřejných meteorologických služeb (ČHMÚ, DWD, GFS), komerčních poskytovatelů nabízejících detailnější data, nebo online platforem a API (například OpenWeatherMap, Solcast, PV Forecast), které mohou poskytovat i přímo predikci slunečního záření či výroby FVE.

1.4.2 Metody predikce spotřeby domácnosti

Predikce spotřeby energie v domácnosti je náročnější než predikce výroby FVE, protože je ovlivněna širší škálou faktorů, zejména chováním obyvatel domácnosti, které může být nepravidelné a obtížně předvídatelné.

Faktory ovlivňující spotřebu domácnosti (U.S. Energy Information Administration, 2023):

- Zeměpisná poloha a podnebí
- Typ domu a jeho fyzikální vlastnosti
- Počet, typ a účinnost energetických spotřebičů v domácnosti a doba jejich používání
- Počet členů domácnosti
- Uživatelské profily a chování

Druhy metod predikce spotřeby:

- Jednoduché

Tyto metody představují základní techniky, které pro predikci využívají primárně historická data spotřeby. Patří sem jednoduchý klouzavý průměr, který počítá prostý průměr z posledních m hodnot, přičemž všechny mají stejnou váhu. Dále vážený klouzavý průměr, který také využívá okno m hodnot, ale každé přiřazuje specifickou, různou váhu. Třetí metodou je jednoduché exponenciální vyhlazování, které přiřazuje exponenciálně klesající váhy starším datům (největší váhu má nejnovější údaj) pomocí parametru α a hodí se pro data bez trendu a sezónnosti. Tyto jednoduché a rychlé metody slouží často pro krátkodobé predikce. (Lee, 2018)

- **Statistické modely časových řad**
 Predikce časových řad je užitečný nástroj pro předpovídání budoucích hodnot na základě vzorců v historických datech. Existují metody, které se snaží explicitně modelovat vnitřní strukturu časové řady, jako jsou autokorelace (závislost mezi hodnotami v různých časech), trendy a sezónní vzorce. Mezi tyto klíčové techniky patří model ARIMA, který je základním statistickým modelem právě pro zachycení těchto časových závislostí a trendů. Modely SARIMA a SARIMAX tento základní model dále rozšiřují: SARIMA specificky umožňuje modelovat i sezónní vzorce a SARIMAX navíc dokáže do modelu zahrnout také vliv externích proměnných. (Sacatani, 2024)
- **Modely strojového učení**
 Představují odlišný přístup k predikci. Místo explicitního definování matematické struktury časové řady se tyto algoritmy "učí" vzorce a komplexní vztahy přímo z dat. (Dou, 2023)
- **Hybridní přístupy**
 Vznikají kombinací dvou nebo více různých predikčních technik s cílem využít jejich individuální silné stránky a kompenzovat jejich slabiny (Ou Ali, 2024).

1.4.3 Význam přesnosti predikcí pro řízení

Přesnost predikcí jak výroby FVE, tak spotřeby energie má zásadní dopad na efektivitu a ekonomický přínos systému chytrého řízení, zejména pokud využívá optimalizační algoritmy.

- **Dopady pro spotřebitele**
 Přesnější predikce výroby a spotřeby elektřiny jsou klíčové pro efektivní fungování systémů řízení energie v domácnosti. Umožňují těmto systémům lépe optimalizovat nabíjení a vybíjení baterie nebo provoz spotřebičů, což vede k přímému snížení nákladů pro uživatele bez negativního dopadu na komfort. (Müller, 2024) Také zvyšují spolehlivost řízení (Ma, 2023).
- **Dopady pro dodavatele energie a provozovatele sítí**
 Přesnost predikce přispívá k vyšší spolehlivosti dodávek, efektivnějším a včasným investicím do nových zdrojů, lepší odolnosti energetického systému vůči extrémním výkyvům počasí a celkově stabilnějšímu a ekonomičtějším provozu. Historické problémy s nepřesností zároveň vedly k vývoji a zlepšení samotných predikčních metod a modelů. (Tsuchida, 2024)

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Realizace systému chytrého řízení

Tato kapitola je věnována návrhu a implementaci konkrétního systému chytrého řízení. Pro vytvoření a testování algoritmu chytrého řízení byl vybrán rodinný dům s existující instalací fotovoltaické elektrárny, systémem chytré domácnosti ovládané programovatelným logickým automatem Tecomat a odběrem elektřiny dle hodinových spotových cen.

Hlavním cílem je optimalizace energetických toků v domácnosti s aktivním využitím dat ze spotového trhu s elektřinou a predikcí výroby a spotřeby energie pomocí řídicího algoritmu běžícího na centrální jednotce této chytré domácnosti.

Přínos tohoto systému spočívá v optimálním využití baterie pro pokrytí spotřeby v hodinách s vyšší cenou energie, řízeném nabíjení baterie ze sítě podle budoucí potřeby, prodeji přebytečné energie v nejvýhodnější době, zákazu dodávání energie do sítě v době, kdy to není výhodné a kompletním monitoringu a ovládání fotovoltaického střídače.

Je důležité zmínit, že ovládání spotřebičů, jako je například tepelné čerpadlo, je zde implementováno pouze jako doplňková funkce na využití přebytečné energie a nejlevnějších hodin (při nedostatečné kapacitě baterie). Je to z důvodu zachování uživatelského komfortu (pračka, sušička, myčka nádobí, varná deska, trouba a další spotřebiče se používají v různých částech dne bez ohledu na to, zda je levná energie nebo svítí slunce). Posun spotřeby těchto spotřebičů do optimálního času by způsobil značný zásah do fungování domácnosti. Proto je celý systém zaměřený zejména na práci s baterií a dodatečné využití přebytků.

Budou zde popsány tyto části:

- Celková architektura systému
Definování hardwarových a softwarových komponent, jejich vzájemných vazeb, určení protokolů a způsobů komunikace a toků dat v rámci navrženého řešení.
- Detailní popis řídicího algoritmu
Popis logiky a strategie, podle které systém rozhoduje o řízení baterie a vybraných spotřebičů na základě aktuálních a predikovaných dat a cen.
- Popis podpůrných částí
Rozbor pomocných částí algoritmu pro zajištění potřebných vstupních dat.

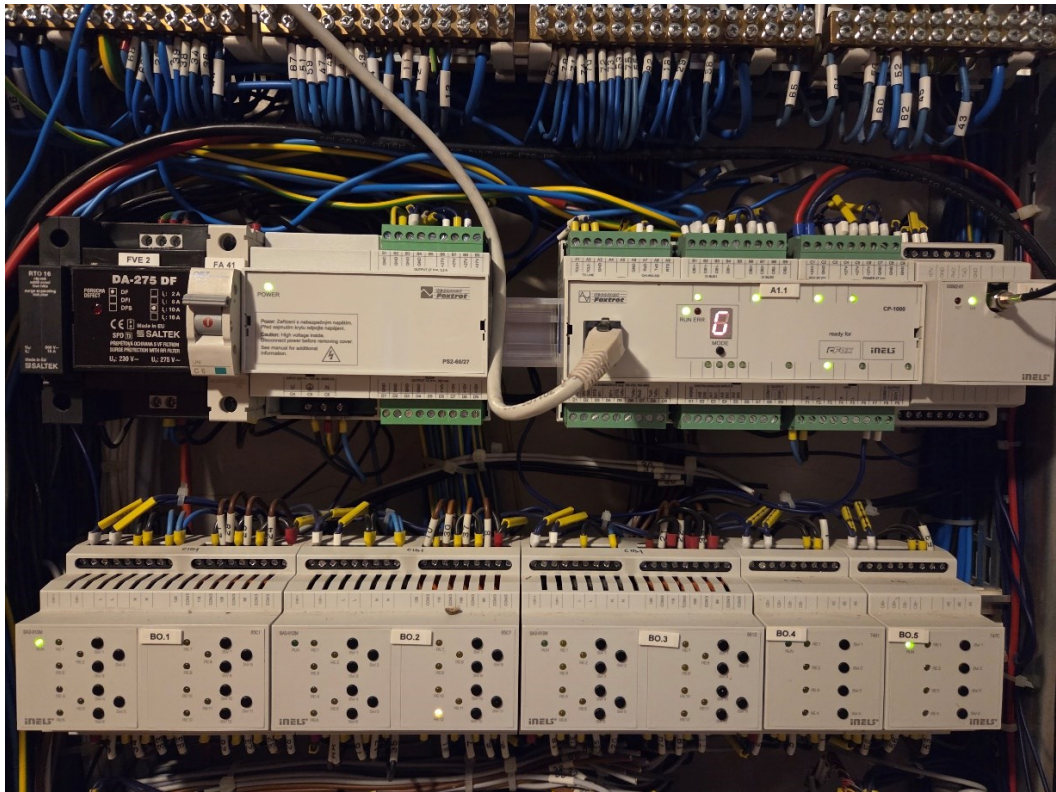
- Návrh webového rozhraní
Funkce a vizuální podoba uživatelského rozhraní pro monitorování a základní ovládání systému.

2.1.1 Architektura systému

Celý systém chytrého řízení energie má za úkol monitorovat a řídit energetické toky v domácnosti vybavené fotovoltaickou elektrárnou s bateriovým úložištěm a dalšími spotřebiči. Architektura systému je navržena jako kombinace programovatelného logického automatu pro hlavní řídicí logiku, predikce, komunikaci s energetickými komponentami, ukládání dat a hostování webového rozhraní, a jednodeskového počítače sloužícího jako jednoúčelová brána pro získávání cenových dat ze zabezpečených webových stránek.

Hardwarové komponenty:

- Programovatelný automat
Je použit jako primární řídicí jednotka a jedná se o model Teco Foxtrot CP-1000 (IceStudio.cz, 2016). PLC (viz Obrázek 1) je již využíváno v rámci existující instalace chytré domácnosti. Na této jednotce běží hlavní řídicí algoritmus (včetně predikcí spotřeby a získávání dat výroby a spotových cen energie), zajišťuje komunikaci se střídačem (přes převodník), provádí řízení energetických toků, ukládá provozní data a proměnné (se zálohou na SD kartu) a zároveň hostuje webové rozhraní pro uživatele vytvořené v Teco WebMaker (Teco, 2013). Spojení s lokální sítí LAN je zajištěno pomocí připojeného ethernetového kabelu do centrálního domácího switche (pro přístup k internetu). Napájení je řešeno specifickým zdrojem Teco PS2-60/27 (27,2 V DC).



Obrázek 1: PLC Teco CP-1000 v rozvaděči chytré domácnosti

- Jednodeskový počítač Raspberry Pi 4 model B
Jeho jediným úkolem je stahovat webovou stránku OTE s daty o spotových cenách (vyžadující HTTPS), které PLC CP-1000 nativně nepodporuje, a zpřístupnit stažený obsah pro PLC prostřednictvím lokálního webového serveru běžícího na HTTP protokolu. (IceStudio.cz, 2024) Napájení je zajištěno standardním adaptérem P2523 (5,1 V).
- Hybridní fotovoltaický střídač
Konkrétní typ je Deye SUN-10K-SG04LP3-EU 10 kW (viz Obrázek 2). Komunikuje fyzicky přes sériovou linku RS485 (Modbus RTU). Instalovaný výkon 9,6 kWp.



Obrázek 2: Fotovoltaický střídač s bateriemi

- Převodník Modbus RTU/TCP (viz Obrázek 3)

Je připojen k RS485 portu střídače Deye a zároveň k lokální síti ethernet. Jedná se o model Waveshare 2-CH RS485 TO ETH (B) (Waveshare, 2024). Umožňuje PLC komunikovat se střídačem pomocí protokolu Modbus TCP/IP přes síť ethernet. Napájení převodníku je zajištěno externím zdrojem Mean Well HDR-15-12 (12 V DC) na DIN liště.



Obrázek 3: Převodník RS485/ETH

- **Bateriové úložiště**
Jedná se o baterie Pytes V5° (celková kapacita 30 kWh, technologie LFP, nízkonapěťové). Baterie komunikuje přímo se střídačem prostřednictvím sběrnice CAN bus (přes integrovaný BMS baterie). PLC získává veškeré potřebné informace o stavu baterie (SoC, napětí, proud, teplota, stav BMS) zprostředkovaně od střídače.
- **Externí chytrý elektroměr**
Konkrétně třífázový Eastron SDM630 Modbus V3, který zajišťuje měření spotřeby domácnosti a toků energie do/ze sítě. Tento elektroměr je připojen ke střídači (přes Modbus RTU) a střídač následně poskytuje data z elektroměru (celková spotřeba, import/export energie) řídicí jednotce PLC. Kromě datového propojení se střídačem je také připojen k fázovým vodičům (L1, L2, L3) a neutrálnímu vodiči (N) hlavního domovního přívodu pro účely měření a vlastního napájení.
- **Tepelné čerpadlo**
Je řízené systémem prostřednictvím aktualizace interní proměnné.
- **Domácí router se switchem**
Slouží pro připojení PLC, Raspberry Pi a převodníku Waveshare RS485/ETH k lokální síti a internetu.

Softwarové komponenty:

- **Na PLC Teco CP-1000**
Vývoj probíhal v prostředí Mosaic, kde byla v jazyce ST také implementována hlavní řídicí aplikace. Ta využívá veřejně dostupné knihovny pro funkce jako Modbus TCP klient, HTTP klient, parsování XML/HTML a predikci výroby FVE.

Zahrnuje:

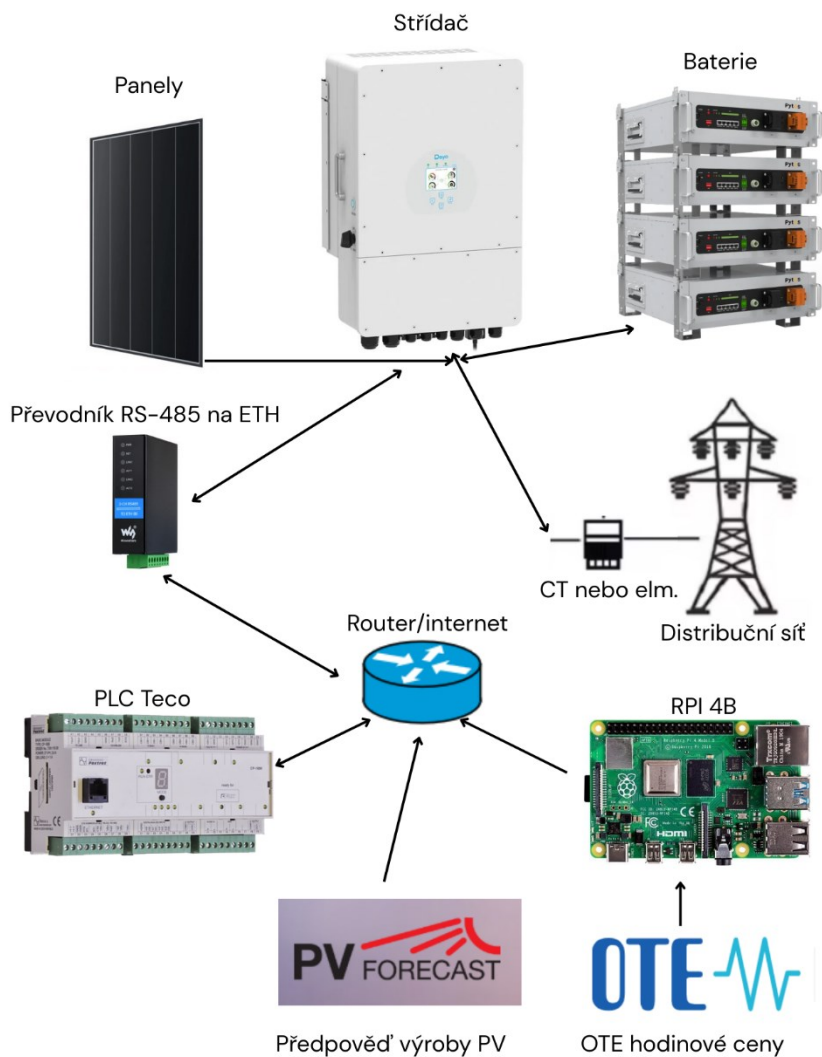
- Logiku řízení baterie
- Aktualizaci proměnné na spínání tepelného čerpadla
- Komunikaci se střídačem
- Komunikaci s lokálním webserverem na Raspberry Pi pro získání webové stránky s cenami
- Parsování HTML stránky (pomocí knihovny XmlLibEx) pro extrakci cenových dat (Teco, 2014)

- Modul pro predikci FVE výroby (využívající knihovnu PV Forecast) (IceStudio.cz, 2021a)
 - Modul pro predikci spotřeby (implementovaný vlastním algoritmem na základě předešlé spotřeby)
 - Ukládání provozních dat a zálohování/obnovu proměnných na/z SD karty (pomocí specifického mechanismu využívajícího {PUBLIC}, {OPEN_UP}, .pub soubor a funkční bloky fbSavePubVar/fbLoadPubVar) (IceStudio.cz, 2021b)
- Na Raspberry Pi 4
Jako operační systém byl použit Raspberry Pi OS.

Nástroje a skripty:

- Nástroj HTTrack Website Copier
Používá se pro stažení a zrcadlení obsahu webové stránky OTE s výsledky denního trhu (Roche, 2025).
- Lokální HTTP webový server
Je zajištěn pomocí vestavěného modulu http.server v Pythonu 3. Lokálně zpřístupňuje zrcadlený obsah stránky OTE v domácí síti přes HTTP protokol pro PLC. (Python Software Foundation, 2025)
- Plánovač úloh cron
Spouští nástroj HTTrack automaticky v určený čas (denně po 14:00, kdy OTE zveřejňuje výsledky) pro aktualizaci zrcadlené webové stránky OTE. (Dvořák, 2016)
- Vlastní Python skript
Spouští vestavěný HTTP server a nástroj HTTrack s vybranými parametry.

Přehledové schéma celého systému je uvedeno níže (viz Obrázek 4):



Obrázek 4: Schéma propojení systému

2.1.2 Hlavní řídicí algoritmus

Prediktivní algoritmus využívá koncept řízení podle cílového stavu nabití baterie a pracuje s predikcemi výroby FVE, spotřeby domácnosti, hodinovými spotovými cenami elektřiny a provozními omezeními s cílem minimalizovat náklady na nákup energie ze sítě a maximálně využít vyrobenou energii pro vlastní spotřebu.

Základní princip spočívá ve snaze zajistit, aby byla baterie na začátku každé hodiny nabitá alespoň na minimální požadovanou úroveň, která je nezbytná pro pokrytí budoucí predikované spotřeby (v hodinách, kdy se nevyplatí nakupovat ze sítě) a pro udržení definované bezpečnostní rezervy. Nabití potřebné energie pro dosažení tohoto cílového stavu je rozplánováno v co nejlevnějších hodinách v rámci predikčního horizontu.

Pro optimální funkci je potřeba, aby predikce výroby a spotřeby byly co nejpřesnější. Periodickou aktualizací stavu a plánu nabíjení a vybíjení je zajištěna rychlá odezva na měnící se podmínky, které mohou nastat právě při nepřesných predikcích.

Jednou z výhod řízení baterie je možnost zabránění vybití v hodinách s nízkou cenou. Za normálních okolností by se jinak baterie vybíjela, jakmile by výroba nepokrývala spotřebu a kapacita by byla dostatečná. Tím by mohlo dojít k vybití dříve, než nastanou drahé hodiny (například večerní špičky). V situaci, kdy denní výroba nedosahuje spotřeby domácnosti, je třeba nalézt nejvýhodnější čas na dobití baterie a dobít jen tolik, kolik je potřeba na pokrytí budoucí spotřeby (v případě, že se to vyplatí – baterie se nebude dobíjet, pokud systém ví, že v době, kdy dojde kapacita, bude cena stejná nebo levnější). Tohoto bylo dosaženo následujícím způsobem:

Vstupy algoritmu:

- Aktuální data
Stav nabití baterie a čas.
- Predikovaná data
Hodinové predikce výroby FVE a spotřeby domu na horizont až 48 hodin.
- Cenová data
Hodinové spotové ceny elektřiny na aktuální a následující den.
- Konfigurační parametry
Kapacita baterie, spodní limit kapacity baterie, výkon střídače, cenová tolerance levných hodin, bezpečnostní buffer kapacity baterie, minimální cena prodeje a další.

Výstupy algoritmu (pro řízení baterie):

- Plán nabíjení ze sítě
Pole udávající, kolik kWh je potřeba aktivně dobít ze sítě v každé hodině plánovacího horizontu.
- Status baterie
Pole udávající plánovaný režim baterie (N – nabíjet, K – klid, V – vybíjet) pro každou hodinu. Tento status je klíčový pro nastavení střídače.
- Predikovaný stav baterie
Pole udávající predikovaný celkový stav nabití baterie (v kWh) na konci každé hodiny.

- Minimální požadovaný stav baterie
Pole udávající vypočtený minimální stav nabití (v kWh) potřebný na začátku každé hodiny.
- Skutečný přebytek energie
Pole udávající predikovaný přebytek energie z FVE (po pokrytí spotřeby a nabíjení baterie), který by směřoval do sítě nebo byl omezen.

Fáze algoritmu (prováděné periodicky jednou za minutu):

1. Inicializace a výpočet limitů
Jsou nulovány pracovní pole, je vypočtena využitelná kapacita baterie, stálá rezerva baterie a bezpečnostní buffer v kWh. Zároveň je určen efektivní plánovací horizont (do konce dnešního nebo zítřejšího dne) podle toho, zda už jsou dostupné ceny na následující den.
2. Výpočet minimálního požadovaného SOC
Algoritmus provede zpětný výpočet od konce horizontu k aktuální hodině. Pro každou hodinu h vypočítá, kolik energie musí být v baterii na jejím začátku, aby bylo možné pokrýt predikovanou spotřebu (která nebyla pokryta predikovanou výrobou) a zároveň aby na začátku následující hodiny $h+1$ bylo dosaženo minimálního požadovaného stavu kapacity baterie. Tento výpočet zohledňuje maximální vybíjecí a nabíjecí výkon měniče. Na konci horizontu je požadován stav kapacity baterie odpovídající spodnímu limitu navýšeného o bezpečnostní buffer.
3. Určení počátečního statusu (N/K/V)
Pro každou hodinu horizontu se určí základní status podle ceny. Hodiny s nejnižší cenou v horizontu jsou označeny jako N (nabíjet). Hodiny s cenou mírně vyšší (v rámci cenové tolerance) jsou označeny K (klid). Ostatní (dražší) hodiny jsou označeny V (vybíjet).
4. Simulace kapacity baterie
Provede se dopředná simulace vývoje kapacity baterie od aktuální hodiny do konce horizontu za předpokladu, že se baterie chová podle počátečního statusu (N/K/V). Zaznamenává se případné "podtečení" pod minimální kapacitu nebo "přetečení" nad maximální kapacitu baterie.
5. Iterativní dorovnávání deficitu
Algoritmus kontroluje, zda v některé hodině h vypočtený stav baterie (na začátku hodiny) klesl pod požadované minimum. Pokud ano, identifikuje potřebný doplněk

energie a hledá nejlevnější předchozí hodinu, která je levnější než hodina h (o více než cenová tolerance) a má volnou kapacitu měniče pro nabíjení. Nalezené množství energie je přidáno do plánu nabíjení. Před přidáním se provede "lookahead" bezpečnostní simulace, která ověří, zda toto dodatečné nabití nezpůsobí přetečení baterie nad maximální kapacitu v některé z následujících hodin až do hodiny h . Po každé změně v plánu nabíjení je přepočítán celý budoucí průběh kapacity baterie a cyklus se opakuje, dokud nejsou všechny deficity pokryty nebo dokud není dosaženo maximálního počtu iterací.

6. Finální určení statusu

Po dokončení dorovnávání se finálně určí status baterie pro každou hodinu. Pokud bylo v dané hodině naplánováno nabíjení, status je N. Pokud se nenabíjí, status se určí podle ceny (K pro levné hodiny v toleranci, V pro drahé).

7. Optimalizace posunu nabíjení

Zde dochází k další optimalizaci plánu tím, že se hledá nabíjení naplánované v dražší hodině a zkouší se ho bezpečně přesunout do levnější pozdější hodiny, kde je volná kapacita měniče. Bezpečnostní simulace ověřuje, zda tento posun neporuší minimální požadovanou kapacitu baterie v žádné mezilehlé hodině a nezpůsobí přetečení v nějaké hodině. Tento proces se opakuje, dokud jsou možné bezpečné posuny.

8. Zpracování přebytků

Pokud po všech předchozích krocích zůstává na konci horizontu energie v baterii nad rámec minimálního požadavku, algoritmus se jí snaží využít:

- Redukce nabíjení (N)

Hledá nejdražší hodiny, kde je stále naplánováno nabíjení (status N), a snižuje potřebné dobití v těchto hodinách, dokud se přebytek nespotřebuje nebo dokud není co redukovat. Opět se provádí bezpečnostní simulace, aby redukce nevedla k poklesu pod minimální kapacitu baterie v budoucnu.

- Změna klidu na vybíjení (K \rightarrow V)

Pokud stále zbývá přebytek, hledá nejdražší hodiny se statusem K a mění je na V, což umožní baterii pokrýt spotřebu v těchto hodinách místo nákupu ze sítě a dojde k maximalizaci vlastní spotřeby vyrobené energie. I zde probíhá bezpečnostní kontrola.

9. Aktivní prodej z baterie (volitelná fáze)

Pokud je povoleno prodávání energie z baterie a stále zbývá energie navíc, algoritmus hledá nejdražší hodiny (nad minimální cenou prodeje) a plánuje dodatečné vybití do

sítě. Bezpečnostní simulace ověřuje, že tento prodej neohrozí budoucí pokrytí minimální požadované kapacity baterie (s případným dodatečným bufferem prodeje).

10. Finalizace výstupů

Po dokončení všech optimalizačních kroků se finálně přepočítají pole predikovaný stav a skutečný přebytek. Výsledný plán nabíjení a status baterie jsou připraveny pro řízení střídače.

2.1.3 Další podpůrné programy

Komunikace se střídačem

Zajišťuje komunikace mezi PLC a střídačem prostřednictvím převodníku Waveshare pomocí protokolu Modbus TCP. Využívá standardní funkční bloky ModbusCmdTCP dostupné v prostředí Mosaic. Pro cyklické čtení všech potřebných registrů ze střídače a pro zápis řídicích parametrů byla definována rozsáhlá sada Modbus příkazů a implementována specifická sekvenční logika pro zápis, která ověřuje úspěšnost zápisu opětovným přečtením zapsaného registru před pokračováním, což zvyšuje robustnost řízení. Program také obsahuje logiku pro vynucené okamžité nabíjení baterie a realizaci požadavků hlavního řídicího algoritmu. Tyto požadavky jsou realizovány pomocí zápisu do registrů časového plánu střídače, omezení výroby a režimu.

Zpracování cen OTE

Tento program zodpovídá za získání a zpracování dat o spotových cenách. Pomocí funkčního bloku fbXmlPageParserFindTag (který interně využívá HTTP klienta) stahuje HTML obsah z lokálního HTTP serveru na Raspberry Pi. Následně tento HTML obsah parsuje, extrahuje hodinové ceny a datum platnosti cen pro ověření aktuálnosti. Extrahované ceny (původně v EUR/MWh) jsou přepočítány na Kč/kWh (s využitím globální proměnné ceny Eura) a uloženy do pole. Také provádí třídění cen pro případné další využití. Spouštění stahování a zpracování je řízeno časovými podmínkami nebo manuálním triggerem.

Predikce FVE výroby

Pro predikci výroby FVE jsou využity specializované funkční bloky PVF_Forecast a PVF_GetPower z knihovny PV Forecast. Blok PVF_Forecast zajišťuje komunikaci s externím API pro získání dat na základě zadaných parametrů (API klíč, GPS souřadnice). Blok PVF_GetPower následně z těchto dat a zadaných parametrů FVE systému (sklon, azimut,

instalovaný výkon, účinnost) vypočítá hodinovou predikci výkonu, která je uložena do pole. Spouštění stahování predikce je řízeno časovačem nebo systémovými událostmi.

Predikce spotřeby

Tento program využívá vlastní algoritmus pro hodinovou predikci spotřeby domácnosti na následující den. Jeho hlavní myšlenkou je rozdělit celkovou spotřebu na dvě složky: základní spotřebu domácnosti a spotřebu specifickou pro tepelné čerpadlo. Pracuje s historickými daty těchto dvou složek za posledních pět dní, která uchovává v hodinových intervalech. Každou hodinu zpětně odhaduje tyto složky na základě celkové naměřené spotřeby v dané hodině, zaznamenané doby běhu TČ a známé spotřeby TČ za daných podmínek. Samotná predikce pro následující den probíhá tak, že se pro každou hodinu nejprve vypočítá základní predikce (pro stálou spotřebu i TČ) jako vážený průměr historických hodnot. Výsledné hodinové predikce jsou nakonec ještě korigovány pomocí koeficientu, který porovnává celkovou reálnou spotřebu předchozího dne se součtem původních hodinových odhadů pro tentýž den, čímž se zpřesňuje celkový denní odhad.

Řízení TČ

Logika pro řízení je oddělena od hlavního algoritmu řízení baterie a využívá jeho výstupy a informace o ceně energie. Cílem je aktivovat TČ primárně v době přebytků FVE nebo nízkých cen energie, když se nabíjí baterie. Samotné zapínání a regulace výkonu je součástí existujícího programu chytré domácnosti. Nový řídicí algoritmus pouze nastavuje příslušné interní proměnné, které se předávají dál.

Ukládání a záloha dat

Používá se mechanismus pro zálohování a obnovu provozních proměnných (označených {PUBLIC} {OPEN_UP}) na SD kartu pomocí funkčních bloků fbSavePubVar a fbLoadPubVar, což zajišťuje uchování dat i po výpadku napájení.

2.1.4 Webové rozhraní

Webové rozhraní slouží jako primární prostředek pro interakci uživatele se systémem chytrého řízení energie. Vzhledem k tomu, že je implementováno pomocí nástroje Teco WebMaker a běží přímo na webovém serveru PLC Teco Foxtrot CP-1000, jeho návrh využívá možností této platformy.

Cíle webového rozhraní:

- Poskytnout uživateli přehledný monitoring aktuálního stavu systému
- Umožnit konfiguraci parametrů řídicího algoritmu a systému
- Nabídnout možnost základního manuálního ovládání vybraných funkcí střídače
- Zajistit vizualizaci klíčových dat pomocí grafů

Navržené funkce a obsah:

1. Přehledová stránka (viz Obrázek 5):

- Aktuální stav:
 - Výkon FVE [W]
 - Spotřeba domu [W]
 - Stav nabití baterie [%]
 - Výkon baterie (nabíjení/vybíjení) [W]
 - Tok energie do/ze sítě [kW]
 - Aktuální spotová cena elektřiny [Kč/kWh]
 - Předpokládaná budoucí spotřeba, přebytek a nákup energie [kWh]
 - Stav baterie a střídače
 - Stav predikcí a systému
- Denní souhrny:
 - Vyrobená energie FVE [kWh]
 - Spotřebovaná energie domu [kWh]
 - Energie dodaná do baterie / odebraná z baterie [kWh]
 - Energie nakoupená ze sítě / prodaná do sítě [kWh]
- Ovládání střídače
 - Nastavení časových plánů
 - Změna limitů baterie
 - Omezení dodávky do sítě
- Nastavení parametrů pro řídicí algoritmus
 - Kapacita baterie
 - Rezervy baterie
 - Cenové limity
 - Povolení prodeje

Předpověď výroby aktuální ■ Zákaz přetoků ■
 Ceny OTE aktuální ■

Aktuální data

	Přebytek energie	Potřeba dobít	Předpokl. spotřeba do konce	Kapacita bat. konec dne
dnes	1.8 kWh	0.0 kWh	8.8 kWh	15.8 kWh
zítra	0.0 kWh	0.0 kWh	23.5 kWh	6.0 kWh

	aktuální cena	aktuální předpoklad
	2.06 CZK/kWh	1.43 kWh

Kapacita baterie kWh

Min. SOC %

Vykon střídače kW

Rezerva bat. normal %

Rezerva bat. prodej %

Cenová tolerance N, K Kč

Min. cena prodeje Kč

Cena distribuce Kč

Poplatek dodavateli Kč

Ceny OTE

Předpověď výroby

Prodej z baterie

Aktualizace plánu

Plán řízení

Okamžité nabíjení baterie do %

Panely

Výkon W

Denní produkce kWh

Celková produkce kWh

Spotřeba

Aktuální W

CT metr W

Denní kWh

Baterie

Teplota °C

Kapacita %

Napětí V

Proud A

Výkon W

BMS

Kapacita %

Napětí V

Proud A

Nab. napětí V

Vyb. napětí V

Nab. proud limit A

Vyb. proud limit A

BMS alarm

BMS chyba

Další

Denní nákup kWh

Denní prodej kWh

Dnes do baterie kWh

Dnes z baterie kWh

Ovládání střídač

Zápis proveden ■

Komunikace Modbus

	Čas	povolení nabíjení	výkon	kapacita
Čas 1	0.00 hh.mm	Zakázáno	10000 W	10 %
Čas 2	4.30 hh.mm	Zakázáno	10000 W	10 %
Čas 3	5.00 hh.mm	Zakázáno	10000 W	10 %
Čas 4	6.00 hh.mm	Zakázáno	10000 W	10 %
Čas 5	13.00 hh.mm	Zakázáno	10000 W	10 %
Čas 6	15.00 hh.mm	Zakázáno	10000 W	10 %

Časy povolení

Zápis dat

Zapnutí měniče

Stav a režim měniče CT síť

Teplota °C

Dodávka do sítě 9600 W

Zero export vykon W

Nabíjecí proud baterie A

Vybíjecí proud baterie A

Nabíjecí proud baterie síť A

Kapacita nabíjení baterie síť %

Nabíjení baterie síť povoleno

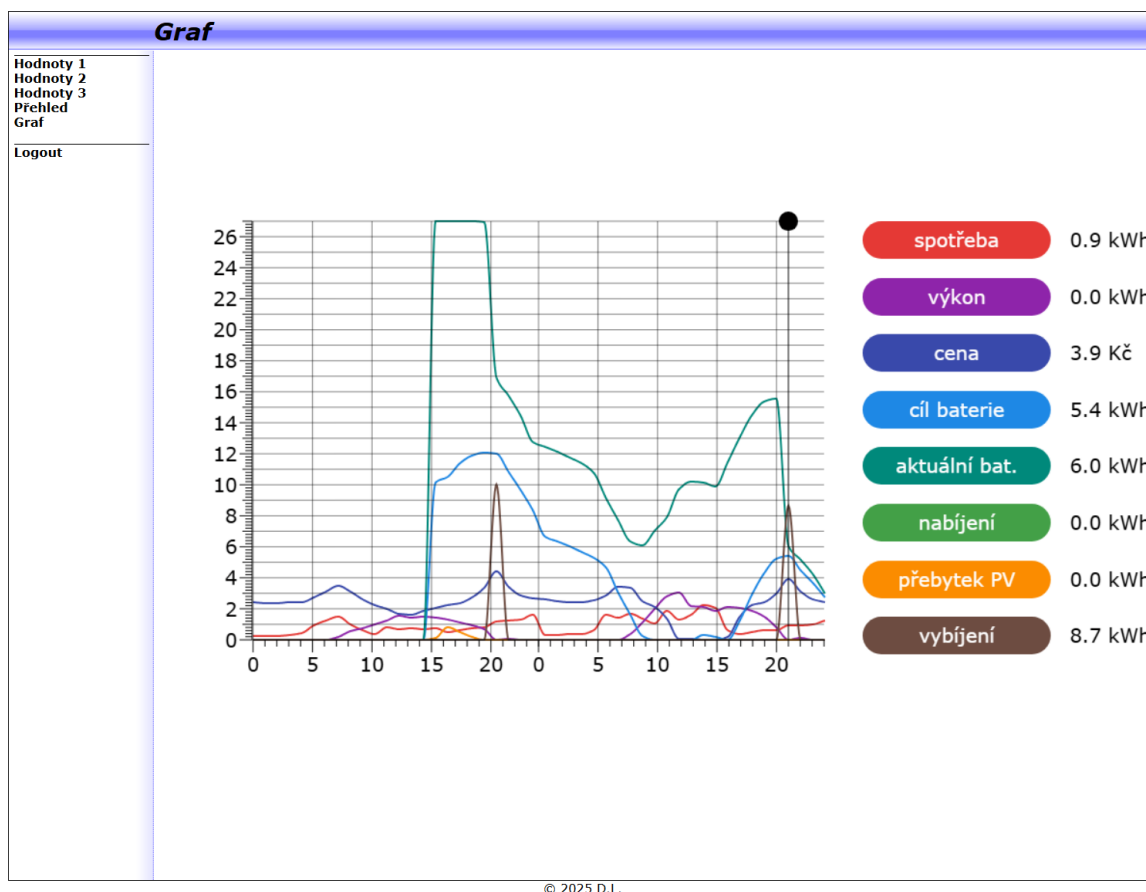
Obrázek 5: Přehledová stránka programu na web serveru PLC

2. Stránky s daty:

- Zobrazení dat v tabulkách pro následujících 24-48 hodin na 3 stránkách (z důvodu limitu maximálního počtu proměnných na jedné stránce):
 - Predikovaný průběh kapacity baterie se statusem
 - Plánované množství energie k dobíjení ze sítě
 - Predikovaný skutečný přebytek
 - Predikce výroby FVE a spotřeby
 - Spotové ceny
 - Další informace

3. Stránka s grafem (viz Obrázek 6):

- Zobrazuje veškerá data z tabulek v grafické podobě pro lepší vizualizaci plánu řízení. Možnost výběru konkrétních dat pro lepší přehlednost.



Obrázek 6: Graf na web serveru PLC

2.2 Možné vylepšení

Celý systém spoléhá na kvalitní predikci výroby FVE a spotřeby domácnosti. Z toho důvodu by dávalo smysl predikci výroby porovnávat s předpovědí počasí a provádět úpravy na základě těchto údajů. Připojení čidla aktuálního osvětlení by také podpořilo lepší přesnost krátkodobé predikce. Pokud jde o spotřebu, bylo by možné osadit jednotlivé spotřebiče měřením spotřeby a na základě těchto detailních dat identifikovat typické vzorce jejich používání (například kdy a jak často běží pračka, myčka, sušička a s jakou spotřebou), což by umožnilo vytvářet přesnější profily spotřeby pro různé dny v týdnu nebo denní doby. Také by bylo možné předvídat očekávané spuštění konkrétních spotřebičů. Tím by se výrazně zpřesnila predikce, oddělila by se lépe základní spotřeba od proměnlivé a systém by mohl lépe reagovat.

Je také důležité zmínit, že Raspberry Pi zde plní pouze roli prostředníka pro překonání technického omezení PLC. Použitím novější generace PLC (například Teco Foxtrot CP-2000) by tato část nebyla potřeba.

2.3 Analýza úspor a ekonomické efektivity

Klíčovým hlediskem hodnocení implementovaného systému chytrého řízení energie je jeho ekonomický přínos. Tato část se proto zaměřuje na provozní úspory dosažené díky optimalizaci energetických toků s využitím spotových cen elektřiny a predikcí.

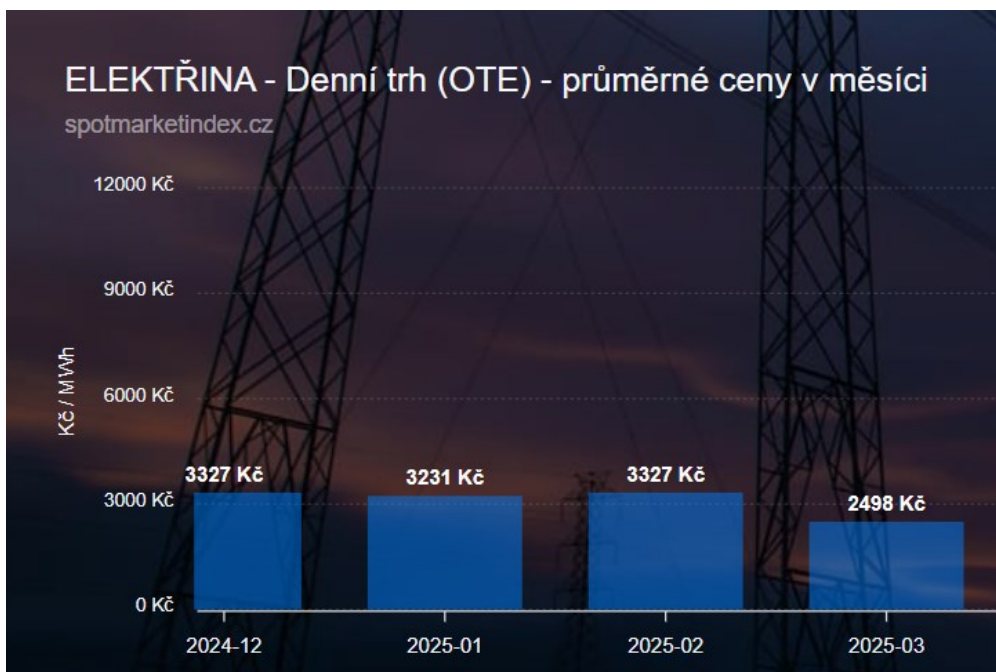
Funkčnost řešení byla testována provozem a sledováním od prosince roku 2024 na instalaci v navrhované domácnosti.

Základem pro tuto analýzu byla reálná data z měsíčních vyúčtování za energie (viz Obrázek 7), která udávají skutečné náklady na nákup elektřiny ze sítě při provozu systému. Tato vyúčtování, založená na spotových cenách, poskytují nejpřesnější obraz o finanční stránce provozu.

		*ceny bez DPH				
				množství	cena kWh	celkem
prosinec	do 11.	Cena za silovou elektřinu	D56d	0,31900 MWh	2 383,37590 Kč	760,30 Kč
	do 31.	Cena za silovou elektřinu	D56d	0,79100 MWh	2 066,28910 Kč	1 634,43 Kč
leden		Cena za silovou elektřinu	D56d	1,26600 MWh	2 374,92270 Kč	3 006,65 Kč
únor		Cena za silovou elektřinu	D56d	0,71700 MWh	2 900,40170 Kč	2 079,59 Kč
březen		Cena za silovou elektřinu	D56d	0,18900 MWh	2 128,85700 Kč	402,35 Kč

Obrázek 7: Přehled vyúčtování odebrané energie

Pro posouzení efektivity byly tyto reálné náklady porovnány s náklady vypočítanými pro základní scénář. Ten byl zvolen způsobem, že veškerá energie nakoupená ze sítě byla účtována na základě průměrné měsíční spotové ceny elektřiny pro daný měsíc (viz Obrázek 8). Rozdíl mezi reálnými náklady s chytrým řízením a simulovanými náklady základního scénáře pak představuje finanční úsporu dosaženou díky schopnosti systému optimalizovat energetické toky. Náklady nezahrnují platbu obchodníkovi a jedná se pouze o cenu za silovou elektřinu (obchodní část) bez DPH. Zároveň není zahrnuta amortizace baterie.



Obrázek 8: Přehled průměrných měsíčních spotových cen (Spotmarketindex, 2025)

System chytrého řízení dosáhl za období od prosince roku 2024 do března roku 2025 celkové úspory ve výši 2757,08 Kč na nákladech za silovou elektřinu (viz Tabulka 1). Tato úspora byla generována díky schopnosti optimalizovat nákup elektřiny podle hodinových spotových cen oproti scénáři, kdy by veškerá elektřina byla nakupována za průměrnou měsíční spotovou cenu.

Tabulka 1: Porovnání nákladů a úspor za energii

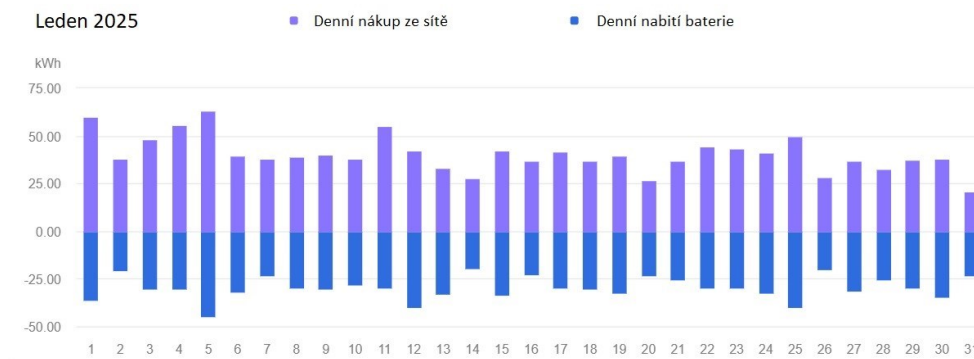
Měsíc	Spotřeba s řízením (kWh)	Prům. měs. spotová cena (Kč/kWh)	Prům. dosažená cena (Kč/kWh)	Náklady - základní scénář (Kč)	Náklady - s chytrým řízením (Kč)	Měsíční úspora (Kč)
Prosinec 2024	1110	3,327	2,157	3692,97	2394,73	1298,24
Leden 2025	1266	3,231	2,375	4089,85	3006,65	1083,2
Únor 2025	717	3,327	2,9	2385,46	2079,59	305,87
Březen 2025	189	2,498	2,129	472,12	402,35	69,77
CELKEM	3282	3,242	2,402	10640,4	7883,32	2757,08

Pro ověření, zda dosažení těchto výsledků bylo opravdu způsobeno nabíjením a vybíjením baterie, je možné se podívat na Obrázek 9, kde je znázorněn tok energie za měsíc leden. Spotřeba samotné domácnosti, dle údajů střídače, činila 1,3 MWh. Ta byla pokryta zčásti výrobou FVE (120 kWh), přímým nákupem ze sítě (340 kWh) a vybíjením baterie (850 kWh). Oficiální nákup energie od dodavatele byl 1,266 MWh. Odečtením přímého nákupu a vybíjení baterie od této hodnoty vznikne rozdíl 76 kWh. Ten je způsobený ztrátami při nabíjení baterií a zaokrouhlením dat střídače.

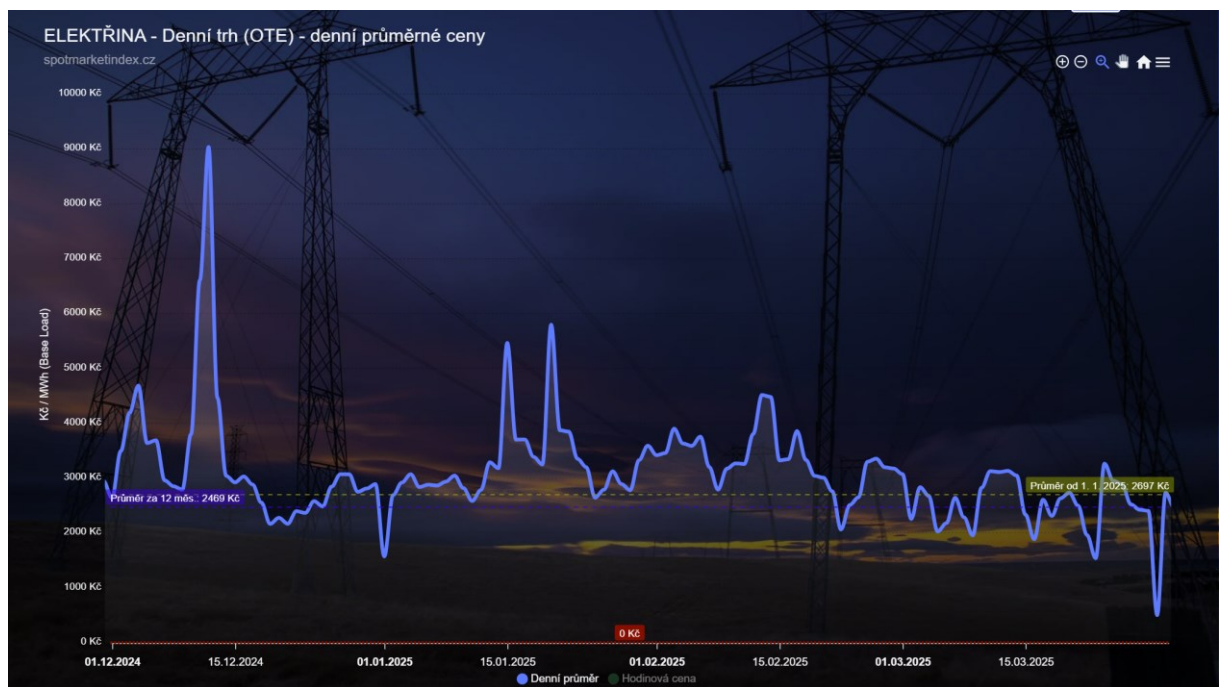


Obrázek 9: Rozložení toků energie za leden 2025

Rozložení spotřeby nakoupené energie bylo víceméně rovnoměrné v průběhu celého měsíce (viz Obrázek 10). Průměrný denní odběr ze sítě činil 40,8 kWh a do baterie bylo průměrně uloženo 29,5 kWh. Pokud se tato data porovnají s denními průměry cen (viz Obrázek 11), lze zjistit, že celková průměrná měsíční cena za kWh (s řízením) byla ve 30 dnech nižší. A to i s ohledem na to, že pro plné nabití baterie byly potřeba minimálně 3 nejlevnější hodiny (kvůli maximálnímu výkonu střídače).



Obrázek 10: Denní odběr a uložení energie za měsíc leden



Obrázek 11: Přehled průměrných denních spotových cen (Spotmarketindex, 2025)

Finanční úspory, kterých bylo dosaženo pomocí implementovaného systému, ukazují, že je tento způsob řízení ekonomicky efektivní. Inteligentní využívání baterie umožnilo přesunout odběr energie do cenově výhodnějších hodin. Také zajistilo její efektivní využití v zimních měsících, kdy by jinak zůstala téměř bez užitku. Systém tak naplnil svůj primární cíl – generovat ekonomický přínos optimalizací energetických toků.

ZÁVĚR

Bakalářská práce byla věnována návrhu a implementaci systému chytrého řízení fotovoltaického systému s bateriovým úložištěm v rodinném domě. Hlavním cílem bylo vytvořit funkční řešení, schopné aktivně optimalizovat energetické toky (snižovat provozní náklady domácnosti, maximalizovat vlastní spotřebu vyrobené energie) a poskytovat přehled celého systému s možností ovládání. To vše na základě dat ze spotového trhu s elektřinou, predikcí výroby, spotřeby energie a webového rozhraní.

V praktické části byl vytvořen řídicí systém, který obsahuje prediktivní algoritmus pro řízení baterie (nabíjení, vybíjení a pozastavení), komunikaci se všemi částmi FVE, zpracování dat a ovládání. Vše běží na PLC Teco CP-1000, který byl součástí chytré domácnosti použité pro realizaci. Chytré řízení se zaměřuje především na optimalizaci provozu bateriového úložiště, místo cíleného řízení spotřebičů, a to z důvodu zachování uživatelského komfortu. Je zde však využito ovládání tepelného čerpadla pro efektivní využití energetických přebytků a nejlevnějších hodin (při nedostatku kapacity baterie). Vestavěný webový server umožnil vytvoření přehledného uživatelského rozhraní.

Během čtyřměsíčního testovacího období (prosinec 2024 – březen 2025) byla ověřena funkčnost řešení. Analýza úspor, která porovnávala skutečné náklady s modelovým scénářem nákupu energie za průměrnou měsíční spotovou cenu, ukázala, že systém chytrého řízení dosáhl finanční úspory ve výši 2757,08 Kč (bez DPH, poplatků obchodníkovi a amortizace baterie). Toto potvrzuje, že je ekonomicky efektivní a dokáže snížit náklady pomocí optimalizace energetických toků. Baterie by se jinak v zimních měsících téměř nevyužívala a těchto úspor by se bez změn ve fungování domácnosti a spotřebičů nedalo dosáhnout.

Celý systém je založený na predikci spotřeby a výroby energie, což vyžaduje co nejpřesnější data. Přidáním čidla osvitů a porovnáváním údajů s předpovědí počasí by bylo možné zmenšit odchylky plánu výroby. Měřením spotřeby jednotlivých spotřebičů a identifikací vzorců používání by bylo možné dosáhnout lepšího oddělení stálé spotřeby od variabilní a předvídat spuštění. Vše vede k lepšímu rozhodování a optimalizaci systému.

Navržené řešení může být přínosné zejména pro domácnosti, které mají fotovoltaickou elektrárnu s baterií a odebírají elektřinu podle spotového denního trhu. Výhodou systému je, že od uživatelů nevyžaduje změnu jejich běžné denní rutiny ani snížení komfortu, jelikož optimalizace energetických toků probíhá automaticky bez nutnosti aktivních zásahů.

POUŽITÁ LITERATURA

AUTONABÍJENÍ, 2022. Co je to nabíjení elektromobilů pomocí OCPP? *Autonabíjení* [online]. [cit. 2025-04-27]. Dostupné z: <https://www.autonabijeni.cz/go-e-2/--co-je-to-nabijeni-elektromobilu-pomoci-ocpp/>

BAROCH, Pavel, 2023. Zapomeňte na normální solární panely, teď frčí chytrá fotovoltaika. *Hrot24* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.hrot24.cz/clanek/zapomente-na-normalni-solarni-panely-ted-frci-chytra-fotovoltaika-Hafda>

BECHNÍK, Bronislav, 2014. Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. *TZB-info* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>

BENEŠ, 2024. Baterie pro fotovoltaiku: co jsou mýty, co marketing a na co si při výběru dávat skutečný pozor? *Pešek & Mudra* [online]. [cit. 2025-04-17]. Dostupné z: <https://www.pesekmudra.cz/blog-o-solarech/jak-vybrat-baterie-pro-fotovoltaiku-do-rodinného-domu/>

BERDÁR, Pavla, 2023. Prodávám přetoky. Co dělat, když je cena elektřiny záporná? *Deltagreen* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.deltagreen.cz/blog/prodavam-pretoky-co-delat-kdyz-je-cena-elekriny-zaporna>

CODERSLAB, 2024. Web scraping: k čemu slouží a kdo ho provádí? *Coders Lab IT Academy* [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://coderslab.cz/cz/blog/co-je-webscraping>

CZECH RE AGENCY, 2009. Fotovoltaický střídač – účinnost není vše. *TZB-info* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>

ČEZ, 2025. Informace k výrobnímu EANu. *Skupina ČEZ – Produktová sekce* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/nova-energetika/spotovy-produkt>

DAVIDSON, Adam, 2023. What is Home Assistant, how does it work, and what do you need to get started? *Pocket-lint* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.pocket-lint.com/what-is-home-assistant-how-does-it-work/>

DOMAT, 2025. Jak dostat do PLC spotové ceny elektřiny nebo předpověď počasí? Funkce Text Parser. *Domat Control System* [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://www.domat-int.com/cs/jak-dostat-do-plc-spotove-ceny-elektriny-nebo-predpoved-pocasi-funkce-text-parser>

DONEV ET AL., J.M.K.C., 2024. Types of photovoltaic cells. *Energy Education* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Types_of_photovoltaic_cells

DOU, Yibo, Shuwen TAN a Dongwei XIE, 2023. Comparison of machine learning and statistical methods in the field of renewable energy power generation forecasting: a mini review. *Frontiers in Energy Research* [online]. 2023-7-26, 11 [cit. 2025-05-03]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2023.1218603

DVOŘÁK, Jiří, 2016. Cron aneb jak na plánování úloh. *COOLHOUSING* [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.coolhousing.net/cz/cron-aneb-jak-na-planovani-uloh>

DVOŘÁK, Martin, 2023. Chytré technologie pro efektivní řízení energie. *Ris-s-kivano blog* [online]. [cit. 2025-04-18]. Dostupné z: <https://ris-s-kivano.com/blog/clanek-3.html>

EATON, 2024. Aplikační příručka FVE. *Eaton* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/circuit-breakers/spd-surge-protection/cz/aplik-prirucka-fve-2023-vr.pdf>

ECOFLOW, 2023. The Complete Guide to Solar Battery Chemistry. *EcoFlow US Blog* [online]. [cit. 2025-04-17]. Dostupné z: <https://blog.ecoflow.com/us/guide-to-solar-battery-chemistry/>

GAUTAM, Ashish, 2025. ESP32: The Ultimate Guide for Beginners and Enthusiasts. *Electronics For You* [online]. [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/esp32>

GOGREENNER, 2024. Explore Different Solar Energy Storage Systems and Their Pros and Cons. *Gogreener* [online]. [cit. 2025-04-17]. Dostupné z: <https://gogreener.com/solar-energy-storage-systems-and-their-pros-and-cons/>

GRIDX, 2025. Energy management system. *GridX* [online]. [cit. 2025-04-25]. Dostupné z: <https://www.gridx.ai/knowledge/what-is-an-energy-management-system>

- HICL, Jan, 2022. Vliv trhu na cenu zelené energie. *Deltagreen* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.deltagreen.cz/blog/vliv-trhu-na-cenu-zelene-energie>
- HROZEK, Dian, 2016. Účastníci trhu s elektřinou. *OEnergetice* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/trh-s-elektrinou/draft-ucastnici-trhu-s-elektrinou/>
- IBM, 2025. What is REST API? *IBM* [online]. [cit. 2025-04-27]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/think/topics/rest-apis>
- ICESTUDIO.CZ, 2016. CP-1000. *Teco Catalog* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://catalog.tecomat.cz/produkt/cp-1000#description>
- ICESTUDIO.CZ, 2021a. PV Forecast - předpověď počasí pro řízení FVE, HFVE. *Teco Wiki* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://wiki.tecomat.cz/clanek/pv-forecast-predpoved-pocasi-pro-rizeni-fve-hfve>
- ICESTUDIO.CZ, 2021b. Ukládání a načítání hodnot {PUBLIC} proměnných z/do souboru. *Teco Wiki* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://wiki.tecomat.cz/clanek/ukladani-a-načitani-hodnot-public-promennych-zdo-souboru>
- ICESTUDIO.CZ, 2024. CP-1000 a podpora protokolu HTTPS. *Teco Support* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://support.tecomat.cz/dotaz/cp-1000-a-podpora-protokolu-https>
- IFEOLUWA, Daniel, 2024. Thin-Film Solar Panels: How Efficient Are They? *IntegrateSun* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://www.integratesun.com/post/thin-film-solar-panels-how-efficient-are-they>
- IHEANETU, Kelachukwu J., 2022. Solar Photovoltaic Power Forecasting: A Review. *Sustainability* [online]. **14**(24) [cit. 2025-05-01]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: [doi:10.3390/su142417005](https://doi.org/10.3390/su142417005)
- IPC2U, 2024. CANbus in Action: Transforming Diverse Industrial Operations. *IPC2U Worldwide* [online]. [cit. 2025-04-27]. Dostupné z: <https://ipc2u.com/articles/knowledge-base/canbus-in-action-transforming-diverse-industrial-operations/>
- KALÁSEK, Tomáš, 2025. Co je to fotovoltaický jev? *FVE.info* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://www.fve.info/co-je-to-fotovoltaicky-jev/>

- KRČMÁŘ, Michal, 2023a. Komplexní průvodce různými typy solárních panelů. *Energosolar* [online]. [cit. 2025-05-13]. Dostupné z: <https://www.energosolar.cz/komplexni-pruvodce-ruznymi-typy-solarnich-panelu/>
- KRČMÁŘ, Michal, 2023b. Účinnost (solárních panelů). *Energosolar* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://www.energosolar.cz/ucinnost-solary/>
- KRČMÁŘ, Michal, 2023c. BMS (Battery Management System). *Energosolar* [online]. [cit. 2025-04-18]. Dostupné z: <https://www.energosolar.cz/bms-battery-management-system/>
- KREJCAR, Rostislav, 2016. Organizační uspořádání energetického trhu: Organizované trhy a bilaterální obchody. *Energetikainfo* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.energetikainfo.cz/33/organizacni-usporadani-energetickeho-trhu-organizovane-trhy-a-bilateralni-obchody-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqWeX-UDwEJOWr7pY9iJB-PVRYFLS2WAvA/>
- KUBIŠTA, Tomáš, 2015. Market coupling – propojování evropských energetických trhů. *OEnergetice* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/trh-s-elektrinou/market-coupling-propojovani-evropskych-energetickych-trhu/>
- KURUC, Jiří, 2024. Spotové tarify nezaručí levnější elektřinu. Proč jsou spotáři v létě nadšení a v zimě pláčou. *E15* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/spotove-tarify-nezaruci-levnejsi-elektrinu-proc-jsou-spotari-v-lete-nadseni-a-v-zime-placou-1420221>
- KUSALA, Jaroslav, 2006. SOLÁRNÍ ENERGIE. ČEZ [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/f8.htm>
- LEE, Y.W., K.G. TAY a Y.Y. CHOY, 2018. Forecasting Electricity Consumption Using Time Series Model. *International Journal of Engineering & Technology* [online]. 2018-11-30, 7(4.30), 218-223 [cit. 2025-05-03]. ISSN 2227-524X. Dostupné z: doi:10.14419/ijet.v7i4.30.22124
- LIU, Jessica, 2024. A Guide to BMS Communication Protocols. *MokoEnergy - Your New Energy Solution Provider* [online]. [cit. 2025-04-18]. Dostupné z: <https://www.mokoenergy.com/a-guide-to-bms-communication-protocols/>
- MA, Ping, Shuhui CUI, Mingshuai CHEN, Shengzhe ZHOU a Kai WANG, 2023. Review of Family-Level Short-Term Load Forecasting and Its Application in Household Energy

- Management System. *Energies* [online]. **16**(15) [cit. 2025-05-01]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en16155809
- MAIXNER, Ladislav, 2006. *Mechatronika: učebnice*. Brno: Computer Press. Učebnice (Computer Press). ISBN 80-251-1299-3.
- MAPLE SYSTEMS, 2024. Modbus Protocol Guide. *Maple Systems* [online]. [cit. 2025-04-27]. Dostupné z: <https://maplesystems.com/modbus-protocol/>
- MASTNÝ, Petr, 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04937-2.
- MOLEK, Tomáš, 2023. Energetická flexibilita chytrého domu (3/4). *OEnergetice* [online]. [cit. 2025-04-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/rychle-zpravy/energeticka-flexibilita-chytreho-domu-3-4/>
- MÜLLER, Renée, 2024. Energy Forecasting: The Key to Smart Energy Decisions. *Tibo Energy Software* [online]. [cit. 2025-05-01]. Dostupné z: <https://tibo.energy/blog/energy-forecasting/>
- OTE, 2025. Dokumentace Trhy. *OTE* [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/dokumentace/dokumentace-elektrina/dokumentace-trhy>
- OU ALI, Imane Hammou, Ali AGGA, Mohammed OUASSAID, Mohamed MAAROUFI, Ali ELRASHIDI a Hossam KOTB, 2024. Predicting short-term energy usage in a smart home using hybrid deep learning models. *Frontiers in Energy Research* [online]. 2024-9-5, **12** [cit. 2025-05-03]. ISSN 2296-598X. Dostupné z: doi:10.3389/fenrg.2024.1323357
- PÉAN, Thibault Q., Jaume SALOM a Ramon COSTA-CASTELLÓ, 2019. Review of control strategies for improving the energy flexibility provided by heat pump systems in buildings. *Journal of Process Control* [online]. **74**, 35-49 [cit. 2025-04-25]. ISSN 09591524. Dostupné z: doi:10.1016/j.jprocont.2018.03.006
- POUDEL, Yam Krishna a Rajiv KUMAR, 2025. Smart Grid Technologies Moving Toward Two-Way Communication in the Digital Age. *International Journal of Information and Communication Sciences* [online]. **10**(1), 1-12 [cit. 2025-05-05]. ISSN 2575-1719. Dostupné z: <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.ijics.20251001.11>
- POULEK, Vladislav a Martin LIBRA, 2010. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. *Elektro*. (3), 6-9. ISSN 1210-0889.

PROKOSCH, Tizian, 2025. MQTT Protocol Guide: Everything You Need to Know. *Cedalo* [online]. [cit. 2025-04-27]. Dostupné z: <https://cedalo.com/blog/complete-mqtt-protocol-guide/>

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2025. Http.server — HTTP servers. *Python documentation* [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/http.server.html>

REDWAY, 2023. Jaké jsou různé typy systémů správy baterií (BMS)? *Redway Tech* [online]. [cit. 2025-04-18]. Dostupné z: <https://www.redway-tech.com/cs/what-are-the-different-types-of-bms-in-battery/>

ROCHE, Xavier, 2025. HTTrack Website Copier. *Httrack* [online]. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://www.httrack.com/>

SACATANI, Sophia, 2024. ARIMA vs. SARIMA vs. SARIMAX. *Medium* [online]. [cit. 2025-05-03]. Dostupné z: <https://medium.com/@sophiamsac/arima-vs-sarima-vs-sarimax-03dd04fc7c66>

SILEKTRO, 2025. Kolik elektřiny vyrobí vaše FVE? Roli hraje nejen lokalita, sklon či orientace panelů. *Silektró Energy* [online]. [cit. 2025-04-30]. Dostupné z: <https://www.silektró.cz/kolik-elektriny-vyrobi-vase-fve-rol-hraje-nejen-lokalita-sklon-ci-orientace-panelu/>

SOLÁRNÍNOVINKY.CZ, 2024. Flexibilita a komunitní energetika: Nový směr pro český trh s elektřinou. *Solární Novinky* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/flexibilita-a-komunitni-energetika-novy-smer-pro-cesky-trh-s-elektrinou/>

SOLARNPLUS, 2024. N-Type vs P-Type Solar Cells: Understanding the Key Differences. *Solar N Plus* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://www.solarnplus.com/n-type-vs-p-type-solar-cells-differences/>

SPOTMARKETINDEX, 2025. Spot Market Index. *SpotMarketIndex* [online]. [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://spotmarketindex.cz/>

TECO, 2013. Nástroj WebMaker. *Tecomat* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: https://www.tecomat.cz/modules/DownloadManager/download.php?alias=txv00328_01_mos_aic_webmaker_cz

- TECO, 2014. Knihovna XmlLibEx. *Tecomat* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: https://www.tecomat.cz/modules/DownloadManager/download.php?alias=txv00378_01
- TLS, 2025. Understanding Key Performance Parameters of Energy Storage Batteries. *TLS Offshore Containers* [online]. [cit. 2025-04-17]. Dostupné z: <http://www.tls-containers.com/1/post/2025/01/understanding-key-performance-parameters-of-energy-storage-batteries.html>
- TRAMBA, David, 2025. Povolenky prodražují elektřinu a dusí průmysl. Pomohl by pokles ceny, ale to Evropská komise nechce. *Ekonomický deník* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/povolenky-prodrazuj-elektřinu-a-dusi-prumysl-pomohl-by-pokles-ceny-ale-to-evropska-komise-nechce/>
- TSUCHIDA, T. Bruce, Long LAM, Peter FOX-PENNER, Akhilesh RAMAKRISHNAN, Sylvia TANG, Adam BIGELOW a Ethan SNYDER, 2024. Electricity Demand Growth and Forecasting in a Time of Change. *Brattle* [online]. [cit. 2025-05-01]. Dostupné z: <https://www.brattle.com/insights-events/publications/electricity-demand-growth-and-forecasting-in-a-time-of-change/>
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2025. Cadmium Telluride. *Energy.gov* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride>
- U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2023. Use of energy explained. *U.S. Energy Information Administration (EIA)* [online]. [cit. 2025-05-03]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/homes.php>
- ULTIMATE SYSTEMS, 2025. ESP32 vs Raspberry Pi: Key Differences Explained. *Ultimate Systems Blog* [online]. [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://blog.usro.net/2025/04/esp32-vs-raspberry-pi-key-differences-explained/>
- VILIMEC, Ladislav, 2008. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1853-5.
- VOBOŘIL, David, 2016. Fotovoltaické elektrárny – princip funkce a součásti, elektrárny v ČR. *OEnergetice* [online]. [cit. 2025-04-14]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti/>
- WAVESHARE, 2024. 2-CH RS485 TO ETH (B). *Waveshare* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: [https://www.waveshare.com/wiki/2-CH_RS485_TO_ETH_\(B\)](https://www.waveshare.com/wiki/2-CH_RS485_TO_ETH_(B))

- WIGNESS, Sam, 2025. Types of Solar Batteries in 2025: A Comprehensive Guide. *Solar.com* [online]. [cit. 2025-04-17]. Dostupné z: <https://www.solar.com/learn/types-of-solar-batteries/>
- WILCHER, Don, 2024. A Guide for the ESP32 Microcontroller Series. *DigiKey* [online]. [cit. 2025-04-28]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/maker/blogs/2024/a-guide-for-the-esp32-microcontroller-series>
- ZACHARY, William, 2024. LiFePO4 vs Lithium Ion: A Comprehensive Comparison. *Vatrer* [online]. [cit. 2025-04-17]. Dostupné z: <https://www.vatrerpower.com/blogs/news/lifepo4-vs-lithium-ion-a-comprehensive-comparison>
- ZEMKOVÁ, Barbora, 2020. OTE: Co o operátorovi trhu s elektřinou potřebujete vědět? *Elektrina* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/ote-operator-trhu>
- ZILVAR, Jiří, 2023. České baterie umí automaticky obchodovat na burze a snižovat účet za elektřinu. *TZB-info* [online]. [cit. 2025-04-29]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/25462-ceske-baterie-umi-automaticky-obchodovat-na-burze-a-snizovat-ucet-za-elektrinu>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Kód programu ZIP

PŘÍLOHA A: Kód programu ZIP

Celý vytvořený projekt v prostředí Mosaic. Hlavní jazyk kódu je ST.