

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Disertační práce

Únor, 2018

Ing. Tomáš Hrůza

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

***EKONOMETRICKÝ MODEL
SMART GRID SÍTĚ***

Disertační práce

Ing. Tomáš Hrůza

2018

Doktorský studijní program: P 2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2601V013 Telekomunikační technika

Školitel: *Ing. Zdeněk Brabec, CSc.*

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení svého školitele Ing. Zdeňka Brabce, CSc. Předložená disertační práce a prezentované výsledky vznikly bez autorské spoluúčasti jiných osob.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady a zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Jako autor předložené disertační práce prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze,

.....

Ing. Tomáš Hrůza

ANOTACE

Primárním cílem předkládané disertační práce je přispět k rozvoji vyšší míry autonomie domácnosti a naplnit jednu z klíčových priorit Evropské komise v oblasti efektivního využívání elektrické energie u malooběratelů. Práce se zaměřuje na návrh koncepčního modelu inteligentní domácnosti s orientací na optimalizaci spotřeby elektrické energie na základě poptávky jednotlivých zařízení a nabídky od interních zdrojů domácnosti a dodávky z lokální distribuční soustavy. Pro potřeby optimalizačního mechanismu je zavedeno preferenční schéma využívající individuálních funkcí užítku u jednotlivých zařízení v daném čase. Aplikace ekonometrických principů teorie nabídky a poptávky a teorie užítku v navrženém modelu do oblasti návrhu algoritmu řízení a optimalizace spotřeby je jedním z klíčových přínosů této práce. Využití preferenčních schémat oproti tradičnímu přístupu hledání rovnováhy nabídky a poptávky na bázi ceny posouvá možnosti optimalizačních algoritmů více k objektivizaci individuálním potřebám.

Využívání obnovitelných zdrojů v rámci domácnosti, především fotovoltaických elektráren malého výkonu, přináší s sebou požadavek predikce objemu vyrobené elektřiny z těchto zdrojů za účelem optimalizace rozložení spotřeby v čase. Význam vhodné metody predikovat objem elektřiny vyrobené v obnovitelných zdrojích je dán jako důsledek vlastností těchto zdrojů, kdy objem výroby je závislý na geografických a meteorologických podmínkách. Tato práce definuje prognostickou funkci s využitím kubického spline na základě odhadu koeficientu růstu intenzity slunečního záření z předchozího časového intervalu. Prognostická funkce je využita pro odhad výroby z fotovoltaické elektrárny pro potřeby optimalizačního mechanismu. Aplikace kubické spline funkce pro účely prognózování vývoje intenzity slunečního záření je první využití tohoto matematického aparátu u obnovitelných zdrojů elektrické energie.

Klíčová slova: inteligentní domácnost, preferenční model, kubický spline, intenzita slunečního záření, obnovitelní zdroje energie, fotovoltaický zdroj

ABSTRACT

This thesis focus on contribution to the development of a higher level of household autonomy and to fulfill one of the European Commission's key priorities in the field of electricity efficiency in field of the small customers. Main goal of the thesis is the design of the conceptual model of smart household that is aimed at electricity consumption optimization based on demand and supply equilibrium. Supply and demand are realized by the household appliances. The power scheduling is formulated for multiple kind of appliances to maximize the social welfare. A preference matrix was proposed for optimization household consumption. The utility theory has been used in household preferences, which allows them to represent the value of single-use appliances in numerical value. Time preferences refers to a succession of time periods and the preferences matrix is individually assigned to each time period. The application of econometric principles of supply and demand theory and the utility theory to the design of an intelligent household model is a key contribution of the presented thesis. The thesis is the first application of this theory in electric consumption optimization as a complex system of preferences. The preference matrix leads to more individual settings for household preference settings, contributing to energy efficiency and energy savings. Defining time intervals for managing household consumption objectively considers the household's needs when using appliances.

Renewable resources have been developing intensively for the last decade. Their key constraint is the volatility of climate conditions over time. Efficient using of renewable resources requires the ability to predict production from these resources in time periods. The importance of a suitable method of predicting the volume of electricity produced in renewable sources is due to the properties of these sources, where the volume of production depends on geographic and climate conditions. The thesis focus on solar energy, since it is the predominant renewable energy source in residential households. This thesis defines prediction model that translates the solar intensity growth coefficient into solar energy harvesting prediction. The main prognostic function is designed as a cubic spline. The prognostic function is used to estimate the production from the photovoltaic resource for the household consumption optimization. The application of the cubic spline function for predicting the development of solar radiation intensity is the first use of this function for renewable energy resources.

Keywords: smart household, preferential model, cubic spline, solar irradiation, renewable resources, photovoltaic resource

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě poděkovat především své rodině, manželce Renatě a dcerám Tereze a Amálii, kteří mne podporovali během studia a při psaní mé disertační práce. Bez jejich trpělivosti bych nebyl schopen toto všechno zvládnout.

Dále bych chtěl poděkovat svému vedoucímu disertační práce Ing. Zdeňkovi Brabcovi, CSc. za příkladné vedení, přístup, poskytnuté rady a ochotu.

Obsah

1	ÚVOD	1
2	ZAMĚŘENÍ PRÁCE	2
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	4
3.1	FORMULACE PROBLÉMU	5
3.2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
3.3	VÝCHODISKA	8
3.4	PŘEDPOKLADY A VYMEZENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	10
3.5	STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE	10
4	STAV POZNÁNÍ	11
4.1	ZDŮVODNĚNÍ POTŘEBY VÝZKUMU	11
4.2	SMART GRID SÍŤ A INTELIGENTNÍ DOMÁCNOST	14
4.3	PŘEHLED MODELŮ ARCHITEKTURY INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI	16
4.3.1	<i>Základní architektura</i>	<i>16</i>
4.3.2	<i>Architektura multiagentních systémů</i>	<i>17</i>
4.3.3	<i>Dostupné komunikační technologie</i>	<i>18</i>
4.4	ŘÍZENÍ POPTÁVKY	19
4.5	SYSTÉMOVÝ MODEL DOMÁCNOSTI	20
4.6	ŘÍZENÍ INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI	22
4.7	PROGNÓZOVÁNÍ VÝROBY Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE	25
4.7.1	<i>Regresní funkce</i>	<i>26</i>
4.7.2	<i>Neuronové sítě</i>	<i>27</i>
4.7.3	<i>Analýza trendů na úrovni zátěže</i>	<i>27</i>
4.7.4	<i>Další přístupy</i>	<i>28</i>
5	VYMEZENÍ POJMŮ	29
5.1	AKTIVNÍ ZÁKAZNÍK	29
5.2	DOMÁCNOST	29
5.3	LOKÁLNĚ VYMEZENÁ SMART GRID SÍŤ	29
6	MODEL INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI	30
6.1	ARCHITEKTURA INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI	30
6.2	VYMEZENÍ	32
6.3	ANALÝZA	33
6.3.1	<i>Motivace</i>	<i>33</i>
6.3.2	<i>Preference a užitek</i>	<i>34</i>
6.3.3	<i>Zavedení preferenčního systému</i>	<i>34</i>
6.3.4	<i>Čas a časová preference</i>	<i>37</i>
6.4	PŘEDPOKLADY MODELU	38
6.5	NÁVRH MODELU	39
6.5.1	<i>Nabídka a poptávka</i>	<i>40</i>
6.5.2	<i>Energetický model</i>	<i>42</i>
6.6	KATEGORIE ZAŘÍZENÍ	44
6.6.1	<i>Zdroj elektrické energie</i>	<i>46</i>
6.6.2	<i>Zařízení pro akumulaci elektrické energie</i>	<i>46</i>
6.6.3	<i>Obecný spotřebič</i>	<i>48</i>

6.6.4	Vytápění, klimatizace a chlazení.....	49
6.6.5	Světelný zdroj.....	50
6.7	NÁVRH ALGORITMU.....	52
6.8	SHRNUTÍ.....	56
7	KOMUNIKAČNÍ MODEL.....	58
7.1	POŽADAVKY NA POPIS KOMUNIKAČNÍHO MODELU.....	59
7.2	POŽADAVKY NA SIMULAČNÍ PROTOKOL.....	60
7.3	POROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH NÁSTROJŮ.....	62
7.4	ARCHITEKTURA KOMUNIKAČNÍHO UZLU.....	62
7.5	SHRNUTÍ.....	64
8	PREDIKČNÍ MODEL PRO FOTOVOLTAICKÉ ZDROJE.....	65
8.1	CHARAKTERISTIKA MĚŘENÝCH DAT.....	66
8.2	ANALÝZA.....	67
8.2.1	Výběr vstupních dat.....	67
8.2.2	Korelační analýza průměrné denní teploty a intenzity slunečního záření.....	69
8.2.3	Chod intenzity slunečního záření.....	70
8.2.4	Kontrola dat.....	73
8.3	PREDIKTIVNÍ MODEL.....	76
8.3.1	Matematický aparát – kubický spline.....	76
8.3.2	Odvození modelu.....	77
8.3.3	Návrh prediktivního modelu.....	77
8.3.4	Analýza parametrů pro vybraný týden.....	78
8.3.5	Simulace.....	81
8.4	SHRNUTÍ.....	84
9	REKAPITULACE A ZHODNOCENÍ STANOVENÝCH CÍLŮ.....	86
9.1	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÍ CÍLŮ PRÁCE.....	86
9.2	VYMEZENÍ VLASTNÍHO PŘÍNOSU.....	88
9.3	NÁMĚTY NA DALŠÍ SMĚRY VÝZKUMU V DANÉ OBLASTI.....	89
10	ZÁVĚR.....	89
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	91
12	VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA.....	98
12.1	PUBLIKACE VZTAHUJÍCÍ SE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE.....	98
12.2	PUBLIKACE OSTATNÍ.....	99

Seznam použitých zkratk a termínů

<i>Zkratka</i>	<i>Význam zkratky</i>
AMI	Advanced Metering Infrastructure
DER	Distributed renewable energy (Distribuovaný zdroj obnovitelné energie)
DS	Distribuční soustava
DSM	Demand Side Management
ERÚ	Energetický regulační úřad
ES	Elektrizační soustava
FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HVAC	Heat, Ventilation, Air Conditioner (Vytápění, vzduchotechnika, ventilace, klimatizace a chlazení)
HVD	High Voltage Disconnect
HVR	High Voltage Reconnect
IoT	Internet of Things (internet věcí)
LDS	Lokální distribuční soustava
LDV	Low Voltage Disconnect
LVR	Low Voltage Reconnect
MAS	Multiagentní systém
MO	Maloodběř
NAP OZE	Národní akční plán pro energii z obnovitelných zdrojů
NAP SG	Národní akční plán pro chytré sítě
nn	Nízké napětí do 1 kV (podle ČSN 330010)
OM	Odběrné místo
OSI	Open System Interconnection
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PEV	Plug-in Electric Vehicle
PEZ	Primární energetický zdroj
PS	Přenosová soustava
SG	Smart Grid
TOU	Time of Use
VTE	Větrná elektrárna

Vysvětlení vybraných pojmů

Pojem	Vysvětlení
Diagram zatížení	Jedná se o časový průběh specifikovaného odebíraného výkonu během specifikované doby [1].
Distribuční soustava	Vzájemně propojený soubor vedení a zařízení o napětí 0,4 až 110 kV (s výjimkou vybraných vedení a zařízení 110 kV, která jsou součástí PS) sloužící k zajištění distribuce elektřiny ke konečnému spotřebiteli na vymezeném území České republiky. Zahrnuje zabezpečovací, informační systémy a telekomunikační techniku. Podle Energetického zákona je zřizována a provozována ve veřejném zájmu [2].
Hromadné dálkové ovládání	Jedná se o soubor zařízení sloužící k řízení elektrických spotřebičů, měření, případně jiným službám s využitím přenosu řídicích signálů tónovým kmitočtem po sítích DS [1].
Elektrická přípojka	Takové zařízení, které začíná odbočením od spínacích prvků nebo přípojnic v elektrické stanici a mimo ní odbočením od vedení přenosové nebo distribuční soustavy, a je určeno k připojení odběrného elektrického zařízení [3].
Elektrizační soustava ČR	Vzájemně propojený soubor veškerých zařízení potřebných pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek a přímých vedení. Dále ji tvoří systémy měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky.
Lokální distribuční soustava	Ohraničená energetická síť, která na základě udělené licence sama distribuuje elektřinu k odběratelům na vymezeném území [2].
Místo připojení	Místo v přenosové nebo distribuční soustavě, v němž je zařízení připojeno, a to přímo, prostřednictvím domovní instalace nebo prostřednictvím přípojky a domovní instalace [2].
Odběrné místo	Místo, kde je instalováno odběrné elektrické zařízení jednoho zákazníka, včetně měřicích transformátorů, do něhož se uskutečňuje dodávka elektřiny [2].
Provozovatel distribuční soustavy	Fyzická či právnická osoba, která je držitelem licence na distribuci elektřiny (uděluje ERÚ) [2].

Pojem	Vysvětlení
Provozovatel přenosové soustavy	Právnícká osoba, která je držitelem licence na přenos elektřiny. Zajišťuje provozování, obnovu a rozvoj PS a za tím účelem spolupracuje s provozovateli propojených přenosových soustav. Poskytuje přenos elektřiny, řídí toky elektřiny v přenosové soustavě, odpovídá za zajištění systémových služeb, provozuje a zřizuje vlastní telekomunikační síť, za nejnižší náklady obstarává podpůrné služby a elektřinu pro krytí ztrát a pro vlastní potřebu, obstarává regulační energii [2].
Předávací místo	Místo styku mezi distribuční soustavou a zařízením uživatele distribuční soustavy, kde elektřina do ní vstupuje nebo z ní vystupuje [2].
Přenosová soustava ČR	Vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 400 kV, 220 kV a vybraných vedení a zařízení 110 kV sloužící pro zajištění přenosu elektřiny pro celé území České republiky a propojení s elektrizačními soustavami sousedních států [2].
Řízení odběru	Využívání prostředků používaných v soustavě k ovlivňování velikosti a doby odbíraného výkonu [1].
Řízení výroby	Vydávání dispečerských pokynů výrobnám k zajištění určitých hodnot činného a jalového výkonu [1].
Vedení	Představuje soubor vodičů, izolačních materiálů a konstrukcí určených pro přenos elektrické energie mezi dvěma body elektrické sítě; mezi jejími uzly. Elektrické vedení je možné dělit na kabelové a venkovní [1].
Vedení 400 V	Vedení se jmenovitým napětím 400 V sloužící k rozvodu elektrické energie od transformátorů 22/0,4kV až do přípojkové skříně spotřebitele [1].
Výrobní elektřiny	Energetické zařízení pro přeměnu různých forem energie na elektřinu [2].

Seznam obrázků

Obr. 1 Schématické zobrazení distribuce elektřiny	9
Obr. 2 Struktura disertační práce.....	11
Obr. 3 ICT propojuje fyzickou a business vrstvu architektury inteligentní sítě [24]	15
Obr. 4 Integrace mezi inteligentním domem a SG sítí [26]	17
Obr. 5 Základní prvky PowerMatcher clusteru [27].....	18
Obr. 6 Systémový model pro obnovitelné zdroje [41].....	20
Obr. 7 Blokované schéma domácí sítě [29]	23
Obr. 8 Hierarchický koncept komunikačních sítí [52]	24
Obr. 9 Průměrná roční globální intenzita slunečního záření pro země EU [54]	25
Obr. 10 Průměrné roční hodnoty globálního slunečního záření [56]	26
Obr. 11 Schéma inteligentní domácnosti.....	31
Obr. 12 Rozložení časových intervalů	41
Obr. 13 Systémový koncept energetického modelu, upraveno podle [43].....	43
Obr. 14 Funkční cyklus zařízení	45
Obr. 15 Princip prahových hodnot napětí pro regulaci akumulátoru	48
Obr. 16 Průběh preferenční křivky pro světelný zdroj.....	51
Obr. 17 Koncepční schéma inteligentní sítě	59
Obr. 18 Blokované komunikační schéma.....	63
Obr. 19 Příklad chodu teploty vzduchu a intenzity slunečního záření	68
Obr. 20 Příklad chodu vlhkosti vzduchu a intenzity slunečního záření	68
Obr. 21 Příklad chodu atmosférického tlaku a intenzity slunečního záření	69
Obr. 22 Bodový diagram korelace hodnot průměrné teploty a denní intenzity	70
Obr. 23 Intenzita slunečního záření – součtové řady odchylek	72
Obr. 24 Interpolace 4. řádu pro roční chod intenzity slunečního záření	72
Obr. 25 Vychýlené týdenní hodnoty	73
Obr. 26 Variační koeficient V_x po eliminaci vychýlených hodnot ($k=1,5$).....	74
Obr. 27 Denní hodnoty pro variační koeficient V_x a míru nesouměrnosti S	75
Obr. 28 Týdenní hodnoty pro variační koeficient V_x a míru nesouměrnosti S	75
Obr. 29 Procentní rozložení týdnů s počtem dní nad průměrnou hodnotou.....	76
Obr. 30 Denní profil pro 19.týden (charakteristiky x , Vx , d).....	79
Obr. 31 Četnost výskytu globálního maxima v čase T_v pro 19.týden	79
Obr. 32 Procentní přírůstek kumulované hodnoty pro I_{hod}	79
Obr. 33 Krabicový graf koeficientu růstu intenzity slunečního záření.....	80
Obr. 34 Krabicový graf hodinových průběhů intenzity slunečního záření.....	80
Obr. 35 Průměrný koeficient růstu pro časové pásmo 7:00 až 19:00	80
Obr. 36 Výstupy prediktivního modelu intenzity slunečního záření pro vybrané dny	83
Obr. 37 Výpočet prediktivního modelu pro rok 2008.....	83
Obr. 38 Výpočet prediktivního modelu pro rok 2010.....	83
Obr. 39 Ověření modelu (skutečné vs. teoretické hodnoty) pro rok 2016	84
Obr. 40 Ověření modelu (skutečné vs. teoretické hodnoty) pro rok 2017	85
Obr. 41 Vymezení vlastního přínosu disertační práce	90

Seznam tabulek

Tab. 1 Průměrná délka skutečného slunečního svitu v ČR	26
Tab. 2 Popis datových struktur	53
Tab. 3 Srovnání simulačních nástrojů	62
Tab. 4 Technická specifikace meteorologické stanice ČZU	67
Tab. 5 Hodnoty korelačního koeficientu (<i>Tv a Iden</i>) pro jednotlivé roky	70
Tab. 6 Průměrné dny nástupů a konců – průměrná teplota	71
Tab. 7 Průměrné dny nástupů a konců – intenzita slunečního záření.....	71
Tab. 8 Roční úhrn sluneční intenzity	75
Tab. 9 Počet dní za kalendářní rok pro <i>Iden</i> > <i>Iden</i>	76
Tab. 10 Vstupní data pro výpočet spline funkce.....	81
Tab. 11 Koeficienty M_i pro stanovení kubické spline funkce	81
Tab. 12 Průměrná chyba modelu pro období 2007 až 2015 (19. týden)	82
Tab. 13 Průměrná chyba pro jednotlivé hodiny v roce 2016 a 2017	83

1 ÚVOD

Technologie Smart Grid (SG) je v dnešní době jedním z velkých hybatelů energetiky. Očekávání od této technologie a služeb s ní spojených míří do oblasti efektivního využívání a distribuce elektrické energie od výroby ke koncovému spotřebiteli. Velkou pozornost představují oblasti úspor elektrické energie.

Pro popis pojmu Smart Grid lze využít některé definice vytvořené orgány, v jejichž odpovědnosti je mimo jiné i podpora jejich rozvoje.

***Smart Grid** je inteligentní síť využívající snímání stavu a měření veličin, integrované zpracování a digitální komunikaci tak, aby umožnila sledování, řízení a automatizaci plně integrované elektrické rozvodné sítě [4].*

***Smart Grid** je inteligentní síť, která používá digitální technologie ke zvýšení spolehlivosti, bezpečnosti a účinnosti (jak ekonomické, tak energetické) energetického systému od velkých zdrojů přes systémy dodávky koncovým spotřebitelům a s rostoucím počtem zdrojů distribuované výroby a akumulace elektrické energie [5].*

Evropská technologická platforma definuje technologie Smart Grid [6] vymezením rozsahu:

***Smart Grid** je taková elektrická rozvodná síť, která umožňuje vzájemnou koordinaci aktivit všech prvků, které jsou k ní připojené (zdroje, koncoví spotřebitelé a aktivní zákazníci s vlastní výrobou) s cílem účinně zajistit udržitelné, ekonomické a bezpečné dodávky elektřiny.*

Na základě výše uvedených vymezení pojmu Smart Grid lze tuto síť vnímat jako inteligentní síť, která zajišťuje transparentní a bezpečnou obousměrnou výměnu informací k zajištění dodávky elektrické energie od zdrojů ke spotřebitelům. Výměna informací umožňuje provozovateli přenosové soustavy efektivně řídit dodávku a přenos elektrické energie a zároveň poskytuje spotřebitelům větší kontrolu nad rozhodováním o jejím využívání.

Z jednotlivých přístupů k rozvoji SG je patrné, že má význam jak pro koncového spotřebitele, tak pro jednotlivé prvky elektrizační soustavy ze dvou hlavních důvodů, které jsou reprezentovány vyváženým chodem soustavy a vybalancováním mezi poptávkou a nabídkou elektrické energie s cílem efektivnějšího využívání elektrické energie. Nepřímo se tyto cíle podílejí na snižování znečišťování ovzduší v podobě oxidu uhličitého jako produktu využívání fosilních paliv při výrobě elektrické energie. SG sítě umožňují masivní budování malých zdrojů a jejich zapojování do elektrizační soustavy, protože technologie SG nabízí prostředky řízení soustavy v reálném čase a tímto způsobem reagovat bez zpoždění na změny ve výrobě a poptávce.

Rychlost rozvoje SG je přitom omezena výší investičních nákladů a časovými nároky pro její zavádění. Tato omezení přitom ovlivňují schopnost realizovat prioritní cíle jednotlivých států včetně EU v oblasti využívání obnovitelných zdrojů a omezování tradičních zdrojů elektrické energie. Jedním ze způsobů, jak dosáhnout efektivnějšího využívání elektrické energie v kratší době než představuje zavádění technické infrastruktury elektrizační soustava (ES), je zaměření se na koncového spotřebitele a poskytnout mu adekvátní prostředky, pomocí nichž bude na jedné straně schopen

řídít svou spotřebu elektrické energie a na straně druhé bude moci instalovat obnovitelné zdroje energie (OZE) malého výkonu bez nutnosti výrazně zasahovat do rozvodů elektrické energie v rámci vlastního odběrného místa. Předkládaná práce klade do popředí optimalizaci spotřeby koncových spotřebitelů bez potřeby významné změny ve struktuře skladby elektrických zařízení, které v každodenním životě využívá a zároveň, aby byl schopen využívat OZE nejenom pro pokrytí vlastní spotřeby elektrické energie, ale aby byl schopen její přebytky, v souladu s platnou legislativou, dodávat do lokální distribuční soustavy.

2 ZAMĚŘENÍ PRÁCE

Tato práce se zaměřuje na analýzu, syntézu a návrh modelu pro řízení spotřeby elektrické energie nízkého napětí na úrovni domácnosti s využitím prvků a vlastností inteligentních sítí. Pro vlastní práci bylo klíčové identifikovat vhodné postupy pro optimalizaci rovnovážného stavu mezi spotřebou a dodávkou elektrické energie z pohledu koncového odběratele.

Moderní přístupy k optimalizaci spotřeby elektrické energie přinášejí důraz na využití nových technologií zahrnující obnovitelné zdroje energie. Tato práce dává důraz na využití takových OZE zdrojů, které z pohledu geografických a klimatických podmínek jsou využitelné na území České republiky.

V rámci „Národního akčního plánu pro chytré sítě (NAP SG)“ byly ze strany Ministerstva průmyslu a obchodu ČR definovány priority pro ČR pro období 2015–2020 s výhledem až do roku 2040. Součástí NAP SG je i pojem „inteligentní sítě“, který je definičně vymezen tímto způsobem:

***Smart Grid** jako elektrické sítě, které jsou schopny efektivně propojit chování a akce všech uživatelů k nim připojených – výrobce, spotřebitele, spotřebitele s vlastní výrobou – k zajištění ekonomicky efektivní, udržitelné energetické soustavy provozované s malými ztrátami a vysokou spolehlivostí dodávky a bezpečnosti [7].*

Zavedení a využití inteligentních sítí představuje do budoucna technologické řešení s možnostmi pro zabezpečení spolehlivého provozu elektrizační soustavy. Dlouhodobý trend odklonu od výstavby velkých energetických zdrojů k malým decentralizovaným zdrojům bude vyžadovat schopnosti zabezpečení spolehlivé integrace těchto zdrojů do ES ČR. Z charakteru jejich umístění a výkonu těchto partikulárních zdrojů je patrné, že budou kladeny zvýšené požadavky na distribuční soustavy. Tyto trendy kladou důraz na nutnost užší koordinace výroby a přenosové soustavy včetně konkrétní distribuční soustavy, kam je daný zdroj připojen. Zajištění stability Elektrizační soustavy České republiky (ES ČR) bude vyžadovat od funkčnosti inteligentní sítě schopnost integrace řídicích prvků v rámci ES ČR. Koncovým spotřebitelům tato řešení poskytnou technologickou podporu pro zvýšení účinnosti využití elektrické energie a rozvoj pokročilých konceptů, jakými jsou chytrá města (Smart City) a elektromobilita. S rostoucí podporou a následným rozvojem decentrální výroby elektřiny bude docházet k silnému tlaku na optimalizaci využití distribuční sítě díky fyzické blízkosti výroby a spotřeby (v tomtéž odběrném místě, nebo v téže lokalitě), případně zlepšit řízení spotřeby v odběrném místě (místech) v závislosti na okamžitých schopnostech připojených zdrojů elektřiny. Zavedení inteligentních sítí umožní zapojit spotřebu i distribuovanou výrobu elektřiny do

decentralizovaného řízení a regulace soustavy (řízení malých domácích a lokálních zdrojů, selektivní řízení skupin spotřebičů, řízení akumulčních možností elektromobilů, virtuální elektrárny atd.) [8]. NAP SG si klade za cíl postupné zavedení inteligentních sítí do ES ČR.

Budoucí rozvoj v oblasti výroby elektrické energie vede k vyšší míře využívání obnovitelných zdrojů. Tento předpoklad vychází z primární strategie EU v oblasti ochrany životního prostředí a velké snahy zajistit snížení závislosti EU na dovozu primárních zdrojů energie. Tato strategie přináší změny v požadavcích na způsob provozování elektrizační soustavy a trhu s elektřinou. Výroba elektřiny postupně přestává být řízena poptávkou a spotřebou a je u OZE v podstatné míře závislá na přírodě (fotovoltaické elektrárny – FVE a větrné elektrárny – VTE). Integraci těchto decentralizovaných zdrojů lze řešit konvenčními způsoby, tj. silovou technologií, popř. vhodnou kombinací konvenčních řešení s novými technologiemi, které spadají do konceptu inteligentních sítí Smart Grid. Tento přístup je významný u přenosové soustavy (PS) a páteřních vedení distribuční soustavy (DS), představuje však nezbytně nutné investice do technologických řešení. Chování a motivace ke změně chování koncových spotřebitelů (maloodběratelů) pak může být vhodným doplněním těchto komplexních technologických řešení. Vhodnou kombinací obou přístupů lze docílit významného snížení investičních nároků na integraci predikovaného objemu decentralizované výroby. Masivní rozvoj decentralizované výroby elektřiny pak má vliv na klasické velké energetické zdroje. Tyto zdroje představují jádro ES ČR pro zajištění dodávky elektrické energie v době, kdy OZE nejsou schopny poskytnout plný výkon pro pokrytí poptávky odběratelů.

Nové technologie SG sítí přinášejí změnu tradičního pohledu na zákazníka, kdy se zákazník posouvá z role odběratele elektrické energie do role dodavatele elektrické energie do lokální distribuční soustavy. Spotřebitel elektřiny v rámci svého odběrného místa chce být nezávislý při rozhodování o zajištění svých energetických potřeb. S rozvojem inteligentních sítí se toto přání stává reálnějším a umožní získat větší svobodu při rozhodování o uspokojení svých potřeb elektrické energií. Právě aktivní zákazníci, kteří si instalují vlastní výrobu elektřiny, se vymykají zažitému vnímání významu zákazníka jakožto pasivního spotřebitele elektrické energie. Zákazníci tak již nejsou pouhými odběrateli elektrické energie, ale stávají se tzv. „prosumers“ (producer and customer). Bohužel v současné době neexistuje v českém jazyce příslušný pojem, proto budu v této práci používat místo něho pojem **aktivní zákazník**.

Vliv na rozšíření skupiny aktivních zákazníků mají v současné době dotační pobídky v návaznosti na zákon o podporovaných zdrojích energie [9] v platném znění. Lze usuzovat, že většina těchto zákazníků hledá především ekonomický prospěch plynoucí z poskytnuté dotace. S rozvojem technologií se však bude více zákazníků zajímat o další benefity, které může získat z této technologie jejím větším využíváním. Další efekt bude mít snížení ceny této technologie, která nebude pokrývána systémem dotací. Zde je velký prostor pro výzkum související s řízením prvků ve vlastnictví a výlučně zapojeným do nn rozvodů v rámci daného odběrného místa. Motivací pro zákazníky je snaha o vyšší efektivitu ve spotřebě elektrické energie a ke snížení závislosti na dodávce elektrické energie z DS. Rozšíření počtu aktivních zákazníků má vliv na lokální distribuční soustavu (LDS), kdy již nedochází pouze jednosměrným tokům elektrické energie z lokální distribuční soustavy ke koncovým zákazníkům, ale v okamžiku zapojení vlastního zdroje může z odběrného místa být dodávána elektrická energie do LDS.

Flexibilita má svůj význam pro udržení rovnováhy poptávky a nabídky v rámci ES jako celku. Větší míra využívání OZE v rezidenčním segmentu představuje riziko kolísání parametrů distribuční soustavy. Pro její optimalizaci bude zapotřebí do distribuční sítě zapojovat řídicí jednotky schopné flexibilně reagovat na tyto změny v reálném čase, aby bylo možné udržet dodávku elektrické energie v požadovaných parametrech. Důležitým požadavkem na vytváření konceptů inteligentních domácností bude rovněž zajištění integrace a spolupráce mezi inteligentní domácností a lokální distribuční soustavou za účelem stabilizace chodu soustavy.

Jedním z hlavních účelů systému řízení Smart Grid prvků pro domácnosti je zajištění efektivního balancování mezi požadavkem elektrické energie a její cenou v daném okamžiku vlastní spotřeby. Z tohoto důvodu se stále více zapojují do inteligentních budov i obnovitelné zdroje, které by měly být schopny poskytovat dostatek elektrické energie pro zajištění potřeby všech zařízení zapojených do elektrické sítě inteligentního domu.

Schopnost předvídat poptávku po elektrické energii je klíčovým nástrojem pro efektivní řízení distribuce elektrické energie na úrovni přenosové a distribuční soustavy a plánování kapacity jak obou soustav přenosu elektrické energie ke koncovým zákazníkům, tak plánování výrobních zdrojů (elektrárny). Při vzrůstajícím podílu obnovitelných zdrojů na celkové výrobě elektrické energie, je tato schopnost zásadní pro zajištění rovnovážné energetické bilance a schopnosti uspokojit poptávku jednotlivých odběratelů v čase jejího vzniku. Na úrovni inteligentních domů pak tato schopnost představuje řídit poptávku spotřebičů s ohledem na jejich užitnou funkci z pohledu dané domácnosti.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Práce je zaměřena na takové oblasti výzkumu, u nichž lze předpokládat přidanou hodnotu výsledků a kde je jednoznačná synergie s prioritami Evropské unie a České republiky v oblasti rozvoje inteligentních sítí. Při formulaci výzkumného problému byl kladen důraz na potenciál v podobě pokračujícího výzkumu.

Při stanovování cílů disertační práce je zdůrazněna formulace, k čemu má předložená práce dospět prostřednictvím vymezené výzkumné otázky. Prioritu pro formulaci cílů představují oblasti vymezené Státní energetickou koncepcí v podobě efektivního využití obnovitelných zdrojů energie a vytvoření prostředků pro dosažení úspor a efektivního využívání elektrické energie.

Klíčem, jak posoudit vlastní příspěvek, je do jaké míry lze prostřednictvím řešení výzkumného problému dosáhnout maximalizace energetické efektivity pro oblasti, které nás bezprostředně obklopují. Vlastním imperativem vymezení práce je domácnost, jako entita s velkou mírou autonomie ve svém rozhodování o způsobu využívání elektrické energie pro uspokojování vlastních potřeb.

Disertační práce je zaměřena na analytickou a syntetickou oblast. Obě dvě části se vzájemně doplňují tak, aby analytická část poskytla dostatečně objektivní zhodnocení stávajícího stavu vybrané oblasti zaměření výzkumu pro následné syntetické výstupy zaměřené na tvorbu vlastního modelu s využitím analýzy reálných dat dostupných z meteorologické stanice ČZU Praha [10].

3.1 FORMULACE PROBLÉMU

Priority EU v oblasti zvýšení efektivity spotřeby elektrické energie se zaměřují nejenom na velkoodběratele, ale zároveň i na maloodběratele. V současné době se EU soustředí na normativní omezování výkonu jednotlivých kategorií spotřebičů používaných v domácnosti a nastavování limitů příkonu pro konkrétní kategorie spotřebičů. Tento přístup vede ke snížení spotřeby pro konkrétní zařízení a v celkovém součtu spotřeby elektrické energie na úrovni odběrného místa, ale nedochází ke změně charakteru spotřeby elektrické energie v čase reprezentované odběrovým diagramem. To představuje pouze snížení charakteru zátěže lokální distribuční soustavy a následně přispívá ke snižování kapacity velkých zdrojů připojených do ES. Celý tento mechanismus může přinášet ve svém důsledku více nákladů na údržbu a zajištění dostupnosti výrobních zdrojů jako kapacitních záloh a nikoliv očekávané zvýšení efektivity spotřeby elektrické energie.

Omezování příkonu jednotlivých spotřebičů musí být v souladu se schopností na úrovni konkrétní domácnosti řídit si vlastní spotřebu elektrické energie. Tato schopnost je jedním z klíčových kroků ke zvýšení efektivity domácnosti v oblasti spotřeby elektrické energie. Důležité pro dosažení efektivity je schopnost domácnosti odložit v čase spotřebu u konkrétního zařízení tak, aby docházelo z pohledu odběru k rozložení špiček odběrového diagramu v čase. Zvýšení míry automatizace tohoto rozhodování zavádí předpoklady pro snížení celkového odběru a zároveň umožňuje efektivní rozložení zátěže v čase. Tím dochází nejen je snížení celkové spotřeby jednotlivých odběrných míst, ale i ke snížení požadavků na DS/LDS na dimenzování přenosové kapacity daného vedení a v neposlední řadě i ke snížení požadavků na celou infrastrukturu ES. Dimenzování na špičkové zatížení znamená zpětný efekt, kdy kapacita DS/PS může být po většinu doby nevyužívána, popřípadě může nastat opačný efekt u rychle rostoucích územních celků v nemožnosti připojit další OM do lokální distribuční soustavy.

Přestože se u domácích spotřebičů a osvětlení dosáhlo výrazného zlepšení jejich energetické účinnosti, spotřeba elektřiny v domácnostech v rámci EU se za posledních 10 let zvýšila o 2 % ročně [11]. Jedním z důvodů je vyšší úroveň komfortu a vybavení domácností a zároveň se jedná o důsledek zavádění nových druhů zařízení do domácností. Studie [12] provedená ve vybraných 12 zemích EU v rámci projektu REMOCED (Residential Monitoring to Decrease Energy Use and Carbon Emissions in Europe), podporovaného Executive Agency for Competitiveness and Innovation (EACI). Autoři studie dospěli k závěru, že informační a zábavní technologie používané domácnostmi jsou klíčovým přispěvatelem k poptávce po elektrické energii v rezidenčním sektoru. Spotřeba zařízení typu informační a zábavní technologie představuje 22 % celkové spotřeby všech spotřebičů domácnosti včetně osvětlení. Na základě odpovědného přístupu koncových spotřebitelů může evropský rezidenční sektor dosáhnout 48 % potenciálních úspor elektrické energie, které mohou být v důsledku nahrazení stávajících technologií a úpravou chování spotřebitelů. Studie doporučuje vhodná opatření ke snižování spotřeby v oblasti energetické účinnosti formou politických rozhodnutí a doporučení podporující transformaci trhu a změny v chování při výběru a provozu zařízení. Identifikovaná úspora elektrické energie představuje na základě srovnání nejúspornějších spotřebičů dostupných na trhu a potenciální úspory v důsledku změny chování domácností byly odhadnuty na 1300 kWh u domácnosti za rok.

Pokud by docházelo ke změně struktury jednotlivých spotřebičů u domácností, bude tato změna za úspornější spotřebiče časově limitována délkou obměny domácích spotřebičů, ke které dochází v sedmi až dvanáctiletých cyklech. Investiční náklady přepočítané na hlavu představují řádově 3000 Kč za rok na obnovu elektrických spotřebičů [13]. S ohledem na výši investičních nákladů a délku obměny energetických spotřebičů, celková efektivita využívání elektrické energie se bude zvyšovat pozvolně.

Vytvoření vhodného mechanismu pro řízení spotřeby domácnosti má dopad na optimální využití elektrické energie. Zde je cílem zajistit rovnoměrný odběr elektrické energie, aniž by vznikaly ztráty v důsledku nadvýroby elektrické energie a zároveň nedocházelo k omezování odběratelů. Odběr elektrické energie je závislý na její aktuální spotřebě a je v čase proměnný.

Předkládaná disertační práce se zaměřuje na výzkum v oblasti řízení inteligentních sítí v rámci residenčního segmentu vymezenými OM a rozvodem nn v rámci konkrétní domácnosti včetně spotřebičů připojených do sítě nn v rámci daného rozvodu nn. Zahrnuje jak pohled na způsob efektivního řízení interní poptávky po elektrické energii, tak na možnosti výroby elektrické energie v rámci vymezené domácnosti (zdroj je připojen do rozvodu nn za OM). Odběrné místo definujeme jako místo, kde je instalováno odběrné elektrické zařízení jednoho zákazníka, včetně měřicích transformátorů, do něhož se uskutečňuje dodávka elektřiny.

Řízení spotřeby na úrovni odběrného místa vede z pohledu spotřebitele ve svém důsledku ke snížení nákladů na elektrickou energii a k optimálnímu rozložení odběrné charakteristiky v čase. Benefity lze identifikovat i na straně mimo OM, a to v podobě minimalizace nákladů na výrobu elektrické energie (výrobci) a efektivní využívání kapacity PS/DS. Obchodníci, výrobci i distributoři elektrické energie mohou využívat motivačních faktorů ovlivňující chování spotřebitele v podobě individualizovaných tarifů anebo vhodným nastavením cenové politiky. Všechny tyto aspekty pak představují tlak na spotřebitele, aby upravil své chování. To může představovat významnou podporu při tvorbě návrhů modelů inteligentní sítě zaměřených na automatizaci rozhodovacích mechanismů na úrovni odběrného místa.

Doposud neodpovídá svému významu zájem odborné veřejnosti o oblast efektivnosti využití elektrické energie pro potřeby domácnosti jako celku, která je vymezena OM a zařízeními připojenými do vnitřní sítě nn (charakterově spotřebič, zdroj i akumulace elektrické energie) je hlavním motivátorem navrženého výzkumu. Trend současných výzkumů, které mají dopad na domácnost ve vnímání vymezení této práce, je směřován do energeticky úsporných budov, technologií obnovitelných zdrojů a chytrých měřicích přístrojů.

Přístupy zaměřené na snižování spotřeby na úrovni konkrétních spotřebičů vedou na jednu stranu k efektivitě konkrétního spotřebiče, ale na druhou stranu nevedou k optimalizaci charakteristiky spotřeby elektrické energie v čase. Přístup ve zvyšování účinnosti a efektivit jednotlivých spotřebičů by měl být systematicky využit v podobě zapojení těchto spotřebičů do inteligentní sítě domácnosti, kde by mělo dojít k většímu vzájemnému efektu.

Flexibilita je důležitá pro zajištění rovnováhy mezi poptávkou a nabídkou v systému inteligentní sítě domácnosti. Vyšší poměr využívání obnovitelných zdrojů (především FV zdroje) v rámci residenčního

segmentu, znamená zvýšení pravděpodobnosti kolísání dodávky elektrické energie v rámci inteligentní sítě domácnosti. To generuje potřebu daleko pružnější reakce prvků zapojených do inteligentní sítě na požadavky a výkyvy v dodávce elektrické energie.

Pro naplnění očekávání cílů EU je důležité, aby se zákazníci připojení do lokální distribuční soustavy aktivně zapojili do centrálních mechanismů koordinace chodu lokální distribuční soustavy. Tento požadavek očekává změnu role koncového zákazníka, jakož i změnu ve způsobu koordinace a řízení LDS s cílem efektivního využití existující zdrojů elektrické energie zapojené do DS a koordinaci s jednotlivými OM. Na úrovni technologií používaných pro řízení DS tento typ koordinace v tuto chvíli nelze implementovat z důvodu nedostatečné legislativy a absence vhodných zařízení včetně bezpečné a zajištěné komunikace.

Záměr realizovat výzkum v oblasti optimalizace poptávky a nabídky na systémové úrovni v rámci inteligentní domácnosti je s ohledem na výše uvedené argumenty silným motivátorem pro jeho vymezení.

VÝZKUMNÝ PROBLÉM, KTERÝ TATO PRÁCE ŘEŠÍ, JE NÁVRH MODELU ŘÍZENÍ INTELIGENTNÍ SÍTĚ DOMÁCNOSTI ZAMĚŘENÝ NA OPTIMALIZACI SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA BÁZI INDIVIDUÁLNÍ POPTÁVKY ZE STRANY JEDNOTLIVÝCH ZAŘÍZENÍ PŘIPOJENÝCH DO NN ROZVODŮ VYMEZENÉ ODBĚRNÝM MÍSTEM, DO NĚHOŽ JE ZAPOJENA SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNA S VÝKONEM DO 10KW.

Právě zaměření na komplexní řízení spotřeby prostřednictvím vhodného konceptuálního modelu domácnosti je vnímáno autorem jako oblast, které má význam se v rámci vlastního výzkumu věnovat a přináší možnosti realizovat příspěvek k současnému poznání.

3.2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Na základě uvedené formulace výzkumného problému byly stanoveny cíle, které řeší předkládaná disertační práce. Hlavní cíle jsou dekomponovány do dílčích cílů za účelem zaměření se na podstatu výzkumné otázky a zároveň poskytují možnost jednoznačného vyhodnocení naplnění hlavních cílů práce. Dílčí cíle pomáhají stanovit charakteristiky inovačního přístupu autora k řešení výzkumného problému.

Hlavní cíl číslo 1.

NAVRHNOU KONCEPTUÁLNÍ MODEL INTELIGENTNÍ SÍTĚ DOMÁCNOSTI ZAMĚŘENÝ NA OPTIMALIZACI VYUŽÍVÁNÍ ZDROJŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE.

Tento cíl je zaměřen na

- domácnosti jako soustavy zařízení spotřebovávajících anebo dodávajících elektrickou energii propojených nn rozvodů vymezených jedním kontaktním místem propojující domácnost s distribuční soustavou;
- stanovení předpokladů a omezení modelu;
- určení charakteristik jednotlivých prvků;

- základní koncept komunikačního protokolu pro zajištění výměny informací mezi prvky inteligentní domácnosti.

K tomuto hlavnímu cíli se váží následující dílčí cíle:

Dílčí cíl číslo 1. A

Vytvoření popisného aparátu pro vymezení modelu.

Dílčí cíl číslo 1. B

Navrhnout způsob objektivního ohodnocování významu jednotlivých zařízení pro potřeby přidělování elektrické energie.

Dílčí cíl číslo 1. C

Zajistit efektivní balancování spotřeby elektrické energie s využitím omezujících podmínek pro vhodný mix výroby a dodávky elektrické energie na úrovni domácnosti.

Dílčí cíl číslo 1. D

Navrhnout základní architekturu komunikačního uzlu s ohledem na řídicí protokol inteligentní sítě domácnosti.

Hlavní cíl číslo 2.

VYTVOŘIT VHODNÝ PREDIKČNÍ MODEL PRO OBJEM VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE DODÁVANÉ Z FOTOVOLTAICKÉHO ZDROJE ZAPOJENÉHO DO INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI.

Tento cíl je vymezen

- domácností jako samostatné autonomní jednotky se zapojenou solární elektrárnou pro vlastní užití, popřípadě splňující technické a zákonné podmínky pro připojení do distribuční soustavy;
- návrhem výpočetně nenáročného postupu predikce s jeho využitím v modelu;
- schopností efektivně předvídat množství elektrické energie vyrobené v solární elektrárně instalované v rámci rezidenční nemovitosti;

K tomuto hlavnímu cíli se váží tyto dílčí cíle:

Dílčí cíl číslo 2. A

Analyzovat veličiny ovlivňující schopnost predikce množství vyrobené elektrické energie.

Dílčí cíl číslo 2. B

Navrhnout vhodný prediktivní model.

3.3 VÝCHODISKA

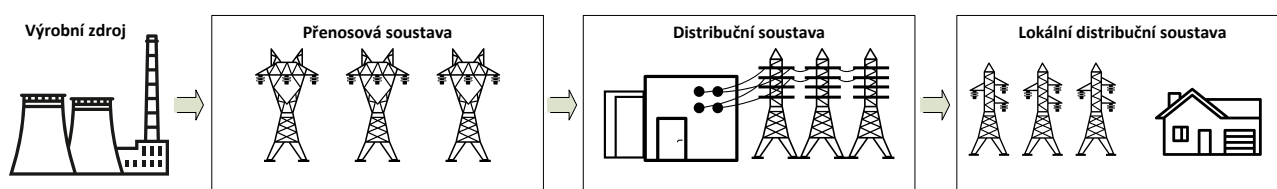
Pro účely této práce je důležité vymežit pojem domácnost. Při návrhu vlastní definice bylo využito charakteristiky publikované v článku [14], kde autoři **domácnost** definují následovně:

Každá domácnost patří k jedné územně správní jednotce (např. obec, město) a je náhodně umístěna na jeho katastrálním území. Domácnost je prostřednictvím jednoho bodu připojena do lokální distribuční sítě. Domácnosti mají řadu spotřebičů, které spotřebovávají anebo produkují elektrickou energii.

Spotřebič je pak autory definován jako zařízení, které patří právě do jedné domácnosti, kde je připojen k vnitřnímu elektrickému rozvodu. Způsob odběru elektrické energie spotřebičem v čase určuje jeho odběrovou charakteristiku. Každý spotřebič může mít různé stavy, které ovlivňují jeho profil energetické náročnosti.

Díváme-li se na domácnost jako na spotřebitele elektrické energie, můžeme domácnost charakterizovat podle [15] jako koncového (malo-)spotřebitele nakupujícího elektrickou energii od **dodavatele elektrické energie** prostřednictvím svého připojení k **lokální distribuční soustavě**. Domácnost má obvykle možnost volby výběru právě jednoho dodavatele na otevřeném trhu s elektřinou.

Schéma vazeb jednotlivých entit v rámci distribuce elektrické energie od výrobního zdroje po spotřebitele ukazuje Obr. 1 (upraveno podle [16]).



Obr. 1 Schématické zobrazení distribuce elektřiny

Evropská komise odhaduje celosvětový potenciál domácností v úspoře elektrické energie na úrovni okolo 27 % [17]. Vybrané zaměření výzkumné oblasti je v souladu s hlavními prioritami Evropské technologické platformy, která oznámila klíčové priority výzkumných témat v roce 2035. Jednou z priorit je právě oblast výzkumu zaměřená na rezidenční bydlení a inteligentní technologie směřující do zvýšení efektivity využití elektrické energie s názvem "Smart Retail and Consumer Technologies" [6].

Definici pojmu domácnost můžeme dále s využitím [18] rozšířit na **odběrné místo**, které odebírá elektrickou energii z lokální distribuční soustavy. Charakter odběrného místa je určen využitím odběrného místa, časovostí a charakterem odběru. Na základě přiřazení konkrétních hodnot jednotlivých charakteristik a výše roční spotřeby je odběrnému místu přiřazen **typový diagram dodávky**, tzv. **odběrový diagram**. Podle definice [18] lze pro účel našeho vymezení domácnost určit těmito charakteristikami:

1. Využití odběrného místa
2. Časovost
3. Charakter odběru

Prodejci elektrické energie [15] nakupují elektrickou energii na otevřeném trhu s elektřinou a prodávají ji koncovému spotřebiteli (domácnosti). Obvykle nevlastní technické prostředky jako jsou

zdroje elektrické energie a distribuční síť. Jejich zákazníci nemusí být připojeni k lokální distribuční síti stejného provozovatele distribuční soustavy.

Provozovatel distribuční soustavy [15] vlastní a provozuje distribuční síť. V tradičním prostředí, má provozovatel monopol na prodej elektrické energie pro všechny spotřebitele připojených k jeho síti. V plně deregulovaném prostředí je prodej elektrické energie pro koncové spotřebitele oddělen od provozu, údržby a rozvoje vlastní distribuční sítě. Ta pak poskytuje srovnatelnou službu přenosu elektrické energie v distribuční síti pro všechny prodejce.

3.4 PŘEDPOKLADY A VYMEZENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

V rámci disertační práce není posuzováno právní prostředí, které by umožňovalo integrovat řízení domácí inteligentní sítě s řízením lokální distribuční soustavy, popř. distribuční soustavy, se kterou je domácnost propojena prostřednictvím předávacího místa. V práci se striktně dodržuje soulad s platnou legislativou [2] a souvisejícími předpisy regulačních opatření v rámci České republiky. Toto omezení v současné době neumožňuje kooperaci mezi různými odběrnými místy při optimalizaci řízení poptávky.

Zaměření práce není orientováno na konkrétní technické řešení a nepředpokládá, že navržené mechanismy řízení optimalizace spotřeby elektrické energie v rámci inteligentní domácnosti budou omezeny konkrétním standardem ani konkrétním řešením.

3.5 STRUKTURA DISERTAČNÍ PRÁCE

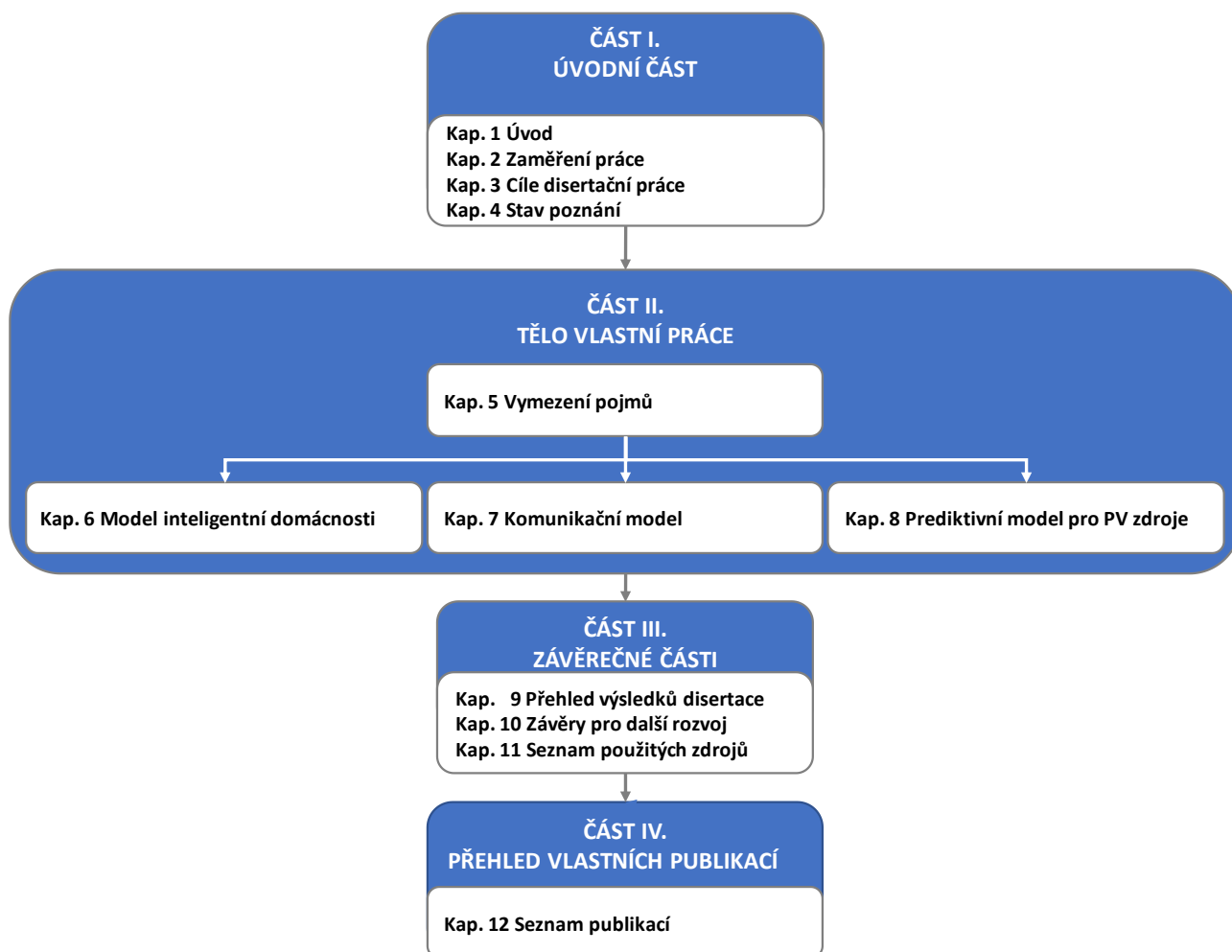
Vlastní řešení výzkumného problému je rozděleno do třinácti samostatných kapitol. Pro přehlednost je práce koncipována do čtyřech samostatných, navzájem provázaných částí, které odpovídají řešení vytyčených cílů zvoleného výzkumného problému. Tento přístup se snaží adresně přiřadit konkrétní cíle k jednotlivým částem vlastní práce. Jednotlivé části se skládají z kapitol, kde autor reprezentuje svůj přístup k řešení hlavních cílů. Schematicky je členění disertační práce zobrazeno na Obr. 2.

Práce je koncipována do následujících částí:

- **První část** – kapitoly 1, 2, 3 a 4 – představují **úvodní část disertační práce** zahrnující úvod do problematiky, stanovení zaměření vlastní práce a rekapitulaci současného stavu poznání identifikované oblasti výzkumu. Dále se zaměřuje na formulaci výzkumného problému a stanovují se hlavní a dílčí cíle práce. Zároveň se zde vymezují předpoklady realizace vlastní práce.
- **Druhá část** – kapitoly 5, 6, 7 a 8 – jedná se **tělo práce reprezentující výsledky vlastní práce**. Definují se zde klíčové pojmy pro následné rozpracování ve vlastním výzkumu. Vlastní výzkum vymezený hlavními cíli je rozpracován do kapitol, které obsahují komplexní a systematický přístup autora k výzkumnému problému s využitím současného stavu poznání. Jsou zde prezentovány výsledky původního přínosu autora.
- **Třetí část** – kapitoly 9, 10 a 11 – reprezentuje **závěrečnou část práce**, kde je provedena rekapitulace a zhodnocení stanovených cílů a shrnuje realizované výsledky z pohledu inovativnosti a přínosu k výzkumné oblasti práce. Poskytuje přehled vlastních inovativních

výsledků disertační práce a původnost přínosu doktoranda. Jsou zde identifikovány náměty pro následný výzkum v dané oblasti. Uvádí zároveň přehled zdrojů, které byly použity při formulaci problematiky a formulaci výzkumné otázky a při realizaci cílů práce.

- **Čtvrtá část** – kapitola 12 – poskytuje **seznam publikací autora**.



Obr. 2 Struktura disertační práce

4 STAV POZNÁNÍ

4.1 ZDŮVODNĚNÍ POTŘEBY VÝZKUMU

V roce 2016 publikovala Evropská komise seznam prioritních oblastí s cílem podpořit budoucí fungování evropského energetického systému s rostoucím podílem obnovitelných zdrojů. Mezi klíčové priority patří zvýšení energetické účinnosti a zvýšení počtu obnovitelných zdrojů na konečné spotřebě energie do roku 2030 [19].

Jedním ze způsobů, jak dosáhnout vytyčených cílů, je posílení role spotřebitele na trhu s elektrickou energií prostřednictvím možnosti výběru dodavatele a přístup k certifikovaným nástrojům pro srovnávání cen energií. Zvolené prostředky k naplnění prioritních cílů vede k větší snaze poskytnout spotřebitelům možnost řídit si vlastní spotřebu elektrické energie v rámci svého odběrného místa.

Větší podíl technologických možností bude akcelarovat metody a postupy pro řízení spotřeby na úrovni domácnosti prostřednictvím konkrétních spotřebičů a získávat schopnosti ve využívání informací o cenách energií dostupných na trhu, využívání optimálních sazeb a přímé iterace mezi LDS a OM. Napojení odběrného místa a distribuční sítě prostřednictvím chytrých měřicích přístrojů může podpořit vyšší rozvoj schopností dodavatelů elektrické energie účtovat spotřebu dynamicky, ale i snahu odběratele využívat levnější tarifní pásma prostřednictvím řízení vlastní spotřeby. K tomu, aby byl spotřebitel schopen reagovat v reálném čase na vlastní poptávku a tuto srovnávat s aktuálními cenami elektřiny (resp. reagovat na změny v tarifech v reálném čase) včetně vlastní výroby, bude nutné navrhnout vhodné metody řídicích mechanismů spotřeby domácnosti, které zajistí spotřebitelům vyšší efektivitu a zároveň zvýší energetickou účinnost v rámci spotřebičů zapojených v konkrétní domácnosti.

Evropská komise pokládá za významné umožnit zákazníkům vlastní výrobu elektřiny pro vlastní spotřebu. Mezi tyto výrobce se nemusí řadit pouze domácnosti, ale mohou zde být zahrnuty i veřejné budovy, popř. budovy, kde jsou umístěny provozy a kanceláře malých a středních podniků. Česká legislativa omezuje Energetickým zákonem [2] a působností Energetického regulačního úřadu dává možnost přebytky elektřiny dodávat do sítě za tržní cenu těm subjektům, pro něž se nejedná o jejich hlavní podnikatelskou aktivitu. Zachovají si ale stále status spotřebitele. Samovýrobcům by měly pomoci i klesající ceny solárních panelů na střechy a dalších malých zařízení pro výrobu elektřiny. Malým zdrojům do 50 kW instalované kapacity má být navíc umožněno jednodušší připojování do elektrické sítě. Tato úprava legislativy ČR v souladu s EU poskytuje možnosti pro domácnosti stávat se aktivním odběratelem (prosumer) tím, že využívají vlastní výrobu nejenom pro pokrytí vlastních potřeb. V kombinaci s dotačními pobídkami v oblasti zavádění OZE je toto další významný argument, proč oblast výzkumu v oblasti řízení spotřeby pro inteligentní domácnosti má potenciál k následné realizaci a přínosu k naplňování priorit Evropské komise.

V oblasti úspor tak, jak je vnímána EK prostřednictvím nastavených priorit, je energetická účinnost. Při její definici vychází EK ze základní premisy, že nejlepší energie je právě ta, kterou není potřeba vyrobit. Návrh přepracované směrnice o energetické účinnosti (Energy Efficiency Directive – EED) přináší celoevropsky závazný cíl pro zvýšení energetické účinnosti do roku 2030 o 30 %. Znamená to cíl pro jednotlivé členské země EU snížit svou spotřebu energie o 30 % oproti předpokládané spotřebě, se kterou počítá evropský scénář z roku 2007 [20].

Evropská komise odhaduje, že se bude muset v rozpětí let 2021 až 2030 investovat 75 miliard EUR ročně do energetické infrastruktury tak, aby došlo k naplnění cílů vytyčených v [19]. Odhaduje se, že až 80 % z této částky bude určeno na výrobu z obnovitelných zdrojů, sítí a rozvodné sítě.

Z pohledu budoucího provázání domácnosti a distribuční sítě na úrovni předávacího místa je úplná digitalizace distribučních sítí, včetně zavádění sítí Smart Grid a inteligentních měřicích systémů jedním ze základních předpokladů. Digitalizace DS/LDS může představovat další možnosti, jak zavádět nové služby s využitím fyzické infrastruktury DS/PS s cílem optimalizovat a spotřebu a zajistit vyrovnaný chod ES.

Připojení velkého množství lokálních výroben aktivních zákazníků do LDS vytváří velký tlak na decentralizaci zdrojů a jejich umístění blíž k místům spotřeby. Tento fakt opět vyžaduje větší míru

integrace řízení inteligentní domácnosti a LDS/DS. Bude vyžadováno, aby distribuční síť byla aktivním prvkem s možností připojení takových OM, které mají vlastní logiku chování a způsobu svého řízení.

Česká republika stanovila prostřednictvím vize státních priorit cíle, kterých chce dosáhnout v horizontu 30 let v oblasti rozvoje energetiky v ČR v dokumentu Státní energetické koncepce [13] v podobě naplňování politiky nezávislosti, bezpečnosti a udržitelného rozvoje v oblasti energetiky. Jedním z hlavních cílů je dosažení maximalizace energetické efektivity.

Dlouhodobým cílem ve stanoveném časovém horizontu je naplnit definovanou strukturu spotřeby primárních energetických zdrojů, kde by měl podíl obnovitelných zdrojů na celkové výrobě elektrické energie v ČR být na úrovni 15 až 16 %. Pro dosažení této cílové hodnoty z pohledu geografických a klimatických podmínek ČR bude důležité, aby došlo k masivní instalaci malých obnovitelných zdrojů do prostředí infrastruktury budov. Z pohledu vlastního zaměření této práce je tento cíl jedním z důležitých motivátorů, proč je práce zaměřena do této oblasti.

Státní energetická koncepce stanovuje pro kontrolu naplnění svých priorit sadu dílčích cílů s vazbou na realizaci hlavních cílů státní koncepce. Jedním z dílčích cílů, ke kterému se hlásí i předkládaná práce, je maximalizace efektivity spotřebičů energie. Jedná se o cíl se středně vysokou prioritou, směřující k maximalizaci úspor elektrické energie a dalších forem energie ve všech oblastech, cestou využívání energeticky úsporných spotřebičů. Do této oblasti patří podpora používání úsporných typů spotřebičů elektrické energie, podpora užití úsporných pohonných jednotek, dopravních prostředků, podpora technologicky pokročilých zdrojů tepla a dalších spotřebičů [13].

Evropská komise odhaduje celosvětový potenciál domácností v úspoře elektrické energie na úrovni okolo 27 % [17]. Předložený příspěvek zaměřený na tzv. „in-house grid“ je v souladu s hlavními prioritami Evropské technologické platformy, která oznámila vrcholné priority výzkumných témat v roce 2035. Jednou z priorit je oblast výzkumu "Smart Retail and Consumer Technologies" [6].

Domácnosti, segment malých a středních podniků a komerční budovy (vč. veřejných) spotřebovaly v roce 2016 celkově 61 % elektrické energie v rámci EU [11]. Současná architektura ES a způsob a zajištění přenosu elektrické energie ke koncovým odběratelům vnímá domácnosti jako na izolované a pasivní individuální jednotky vymezené odběrným místem (OM) a připojené k lokální distribuční soustavě (LDS) prostřednictvím přípojného místa. Takto vnímané vymezení je, při budoucím rozvoji inteligentních domácností s možností vlastní výroby elektrické energie z OZE, limitujícím faktorem pro zavádění nových technologií úsporných spotřebičů a podporující optimalizaci spotřeby elektrické energie. Autor vidí zásadní přínos této práce v oblasti návrhu vhodných mechanismů řídicích interní poptávku od jednotlivých zařízení, které jsou využívány domácnostmi. Tyto mechanismy vedou k úspoře elektrické energie a tím pádem k možnému omezení výroby z klasických energetických zdrojů a zároveň kladou zvýšené požadavky na řízení LDS/DS v oblasti koordinace řízení poptávky a nabídky s cílem zajistit bezpečnou a stabilní dodávku elektrické energie.

Evropská komise klade důraz na využití obnovitelných zdrojů energie a jejich podporu. Tento přístup je podpořen Směrnicí Evropské unie – Směrnice EU 2001/77/ES o podpoře výkupu elektřiny

z obnovitelných zdrojů energie. Česká republika si v souladu s touto směrnicí stanovila za cíl podpořit vědu a výzkum zaměřený do této oblasti a v souladu s realizací programů podpory výzkumu a vývoje v rámci Národního programu výzkumu (podle usnesení vlády č. 517 ze dne 22. 5. 2002) zajistit větší priority Státní energetické koncepce v obalech:

- efektivního využití obnovitelných energetických zdrojů,
- úspory a efektivní využití energie.

Státní energetická koncepce je provázána na územní energetické koncepce, které podle zákona č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií mají vycházet právě z ní. Jednotlivé územně správní celky pak v souladu se legislativním rámcem určují své priority v uvedených oblastech.

Předkládaná práce vychází z priorit stanovených pro realizaci programů podpory výzkumu a vývoje v uvedených oblastech. Příspěvkem práce je v oblasti efektivního využití obnovitelných energetických zdrojů v podobě predikce výroby ze sluneční elektrárny, a to jak pro potřeby řízení vlastní spotřeby domácnosti, tak zároveň pro potřeby balancování chodu lokální distribuční soustavy, ke které jsou dané zdroje připojeny. Návrh mechanismu řízení spotřeby elektrické energie inteligentní domácnosti formou optimalizace nabídky a poptávky postavený na preferenčním modelu je příspěvkem k řešení stanoveného cíle pro efektivní využití energie.

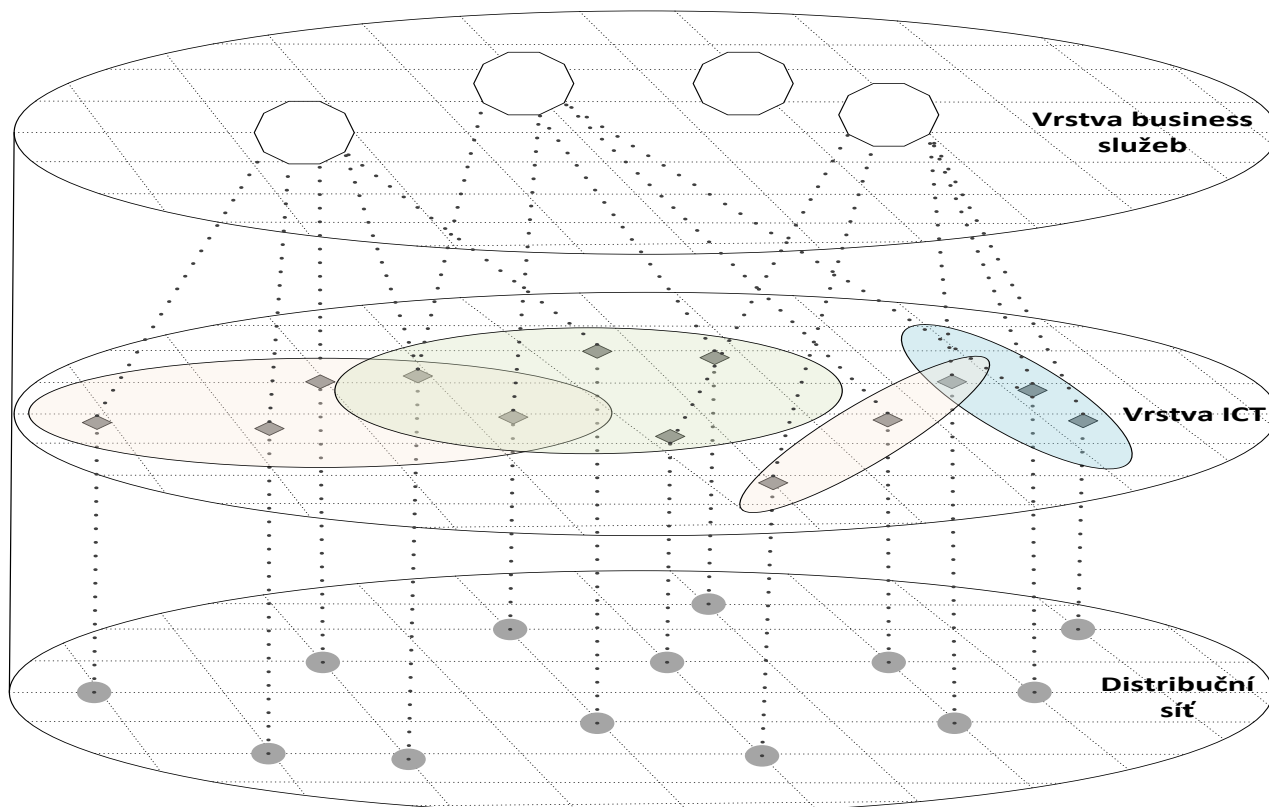
4.2 SMART GRID SÍŤ A INTELIGENTNÍ DOMÁCNOST

Výzkumná práce [21] definuje prvky Smart Grid sítě jako "Zařízení koncového uživatele využívající elektrickou energii k poskytování služby zákazníkovi". Článek [22] o řízení energetických systémů z pohledu koncových odběratelů stanovuje jako nejvhodnější motivační systém takový, který umožňuje odměňovat chování účastníků (odběratelů a dodavatelů elektrické energie), které je v souladu s vyváženým tokem elektrické energie v síti. Hlavní myšlenka tohoto článku je založena na využití motivačního faktoru v podobě nastavené ceny elektrické energie za účelem řízení toku elektrické energie v inteligentních sítích a optimalizaci chování zákazníků podle citlivosti na nastavenou sazbu.

Inteligentní síť poskytuje možnosti monitorovat a řídit stav systému na úrovni konkrétních prvků zapojených do inteligentní sítě v reálném čase. Tento předpoklad by měl umožnit rozšíření možnosti monitorovat a kontrolovat větší celky na sebe navazujících inteligentních sítích. A to od sítí velmi vysokého napětí až na úroveň sítí nízkého napětí, kde nebyla doposud navržena vhodná technická řešení [23]. Rozšíření tohoto modelu na interní inteligentní síť domácnosti zajišťuje větší účinnost spolehlivosti dodávek elektrické energie a zvýšení efektivity jejího využívání. To umožňuje inteligentní systém řízení sítě a zlepšení celkové efektivity distribuce elektrické energie od zdroje ke koncovému spotřebiteli (v tomto případě zařízení připojené do SG sítě). To by mělo být klíčem k dosažení lepší rovnováhy mezi nabídkou a poptávkou v prostoru a čase.

Technická infrastruktura představuje pouze jednou z částí architektury SG sítě, významným prvkem zajišťující řízení celé sítě na základě definovaných pravidel orientovaných na DSM je reprezentován obchodním modelem. Právě obchodní model vytváří nad technologicky orientovanými vrstvami logiku celého propojení odběratelů a výrobců elektrické energie na principu dynamicky vznikajících

obchodních případů, tzv. mikro obchodů [24]. Obr. 3 znázorňuje koncepční rámec modelu SG sítě jako kombinaci technického vybavení, ICT systémů a dílčích obchodních modelů. Zatímco technologické vrstvy modelu představují nezbytnou infrastrukturu pro potřeby SG sítě, ekonomicky orientované pobídky jsou autonomní v rozhodování zda a jakým způsobem se jednotlivé prvky budou zapojovat do vlastního systému řízení SG sítě.



Obr. 3 ICT propojuje fyzickou a business vrstvu architektury inteligentní sítě [24]

Síťová komunikace podporuje výměnu informací mezi rozptýlenými a organizačně oddělenými stranami v rámci architektury (provozovateli LDS, DS a PS, výroby elektrické energie a spotřebiteli). Fyzická vrstva představuje páteř celého systému zajišťující distribuci elektrické energie mezi výrobou a koncovým spotřebitelem. Pro řízení vazeb mezi jednotlivými účastníky a zajištění efektivního využívání zdrojů s ohledem na poptávku je důležitá právě komunikační vrstva modelu, která zabezpečuje výměnu potřebných informací mezi jednotlivými prvky zapojené do SG sítě.

Spotřebiče, které jsou využívány v domácnosti, představují většinu spotřeby elektrické energie určené pro residenční segment. V budoucnosti by mělo být stále více těchto zařízení schopno přímého propojení se SG sítí. Měly by mít takové prostředky, které jim umožní monitorovat vlastní činnost a zároveň schopnost o svém používání informovat rozhodovací mechanismy řídicí vrstvy SG sítě. V konkrétních případech by měly být schopny zvyšovat nebo snižovat svoji spotřebu na základě kooperace s centralizovaným řízením LDS (popř. DS). Tyto vlastnosti přinášejí společný efekt úspory a efektivity ve využívání elektrické energie na úrovni residenčního segmentu.

4.3 PŘEHLED MODELŮ ARCHITEKTURY INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI

Současné přínosy SG sítí v oblastech zaměřených na technologie řízení spotřeby elektrické energie mají efekt i pro zvýšení schopností domácnosti pružně reagovat na svou spotřebu. Technologické změny související s prioritami EU zavádějí chytré elektroměry umožňující řídit a nastavovat hodinovou spotřebu v závislosti na reálných potřebách dané domácnosti. Přístup uvedený v práci [25] je založen na aktivních prvcích zahrnující interní správu spotřeby elektrické energie zahrnující zpětnou vazbu uživatele a zahrnující schopnosti tarify v reálném čase, inteligentní řízení spotřebičů a poskytování (technických a komerčních) služeb provozovatelům sítí a dodavatelům energie.

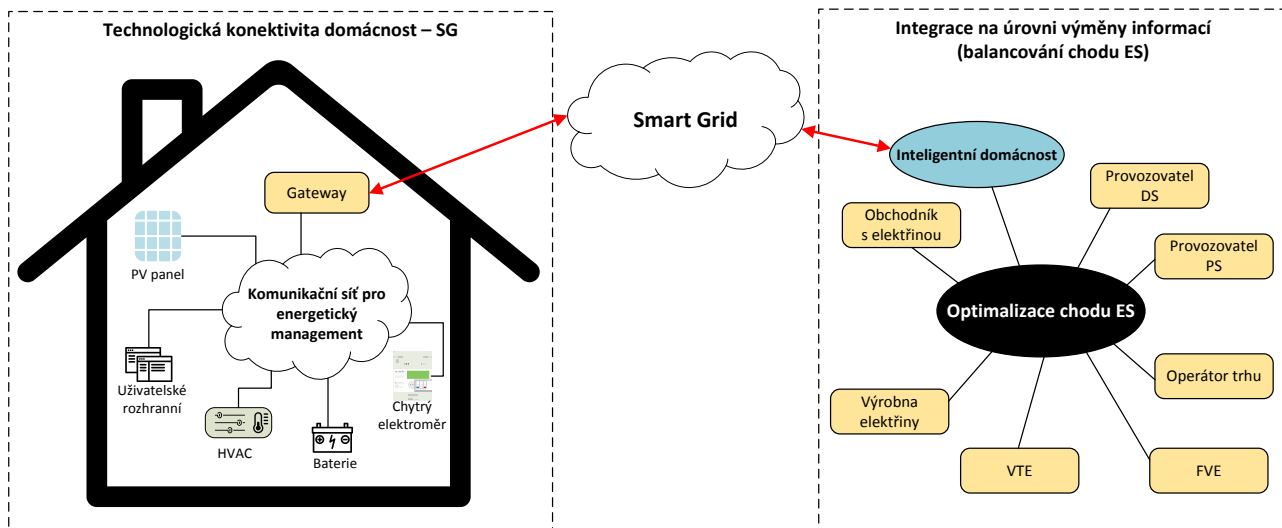
Inteligentní sítě se orientují na možnosti monitorovat a řídit stav systému na místní úrovni v reálném čase. Přístup k řízení lokální distribuční sítě může být od centralizovaného modelu až po decentralizovaný režim řízení dynamických požadavků individuálně vznikající v SG síti na úrovni přípojného bodu (OM), což může pro domácnosti představovat prostředek pro zlepšení vlastní efektivity ve využívání elektrické energie. Klíčovým faktorem pro dosažení efektivnější rovnováhy mezi nabídkou a poptávkou na úrovni koncových uživatelů je kombinace centrálního a decentrálního přístupu k řízení SG sítě včetně připojených prvků.

4.3.1 Základní architektura

Požadavky na komplexnost u řízení SG sítě vyžaduje aktivní přístup zapojených prvků s cílem zajistit jejich vzájemnou koordinaci. Systém by měl mít takovou architekturu, která bude podporovat komplexní interakce mezi agenty na základě vhodného komunikačního prostředku a řídicího protokolu.

V projektu [26] byl navržen model pojmenovaný „In-House architektura“, který se skládá z těchto klíčových prvků:

- inteligentní uzly / agenti, kteří vzájemně komunikují a realizují řídicí operace prostřednictvím komunikačního subsystému,
- vyhrazená komunikační brána do SG sítě (okolní prostředí),
- koncová zařízení provozovaná zákazníkem,
- měřící uzly,
- uživatelské rozhraní.



Obr. 4 Integrace mezi inteligentním domem a SG sítí [26]

Inteligentní síť je sama o sobě sítí decentralizovanou, kde je inteligence rozdělena do jednotlivých prvků SG sítě prostřednictvím jednotlivých zařízení k ní připojených. Tato zařízení mohou vykonávat samostatná rozhodnutí, aby rychle a efektivně reagovala na změny provozních stavů jednotlivých prvků a požadavky jednotlivých prvků.

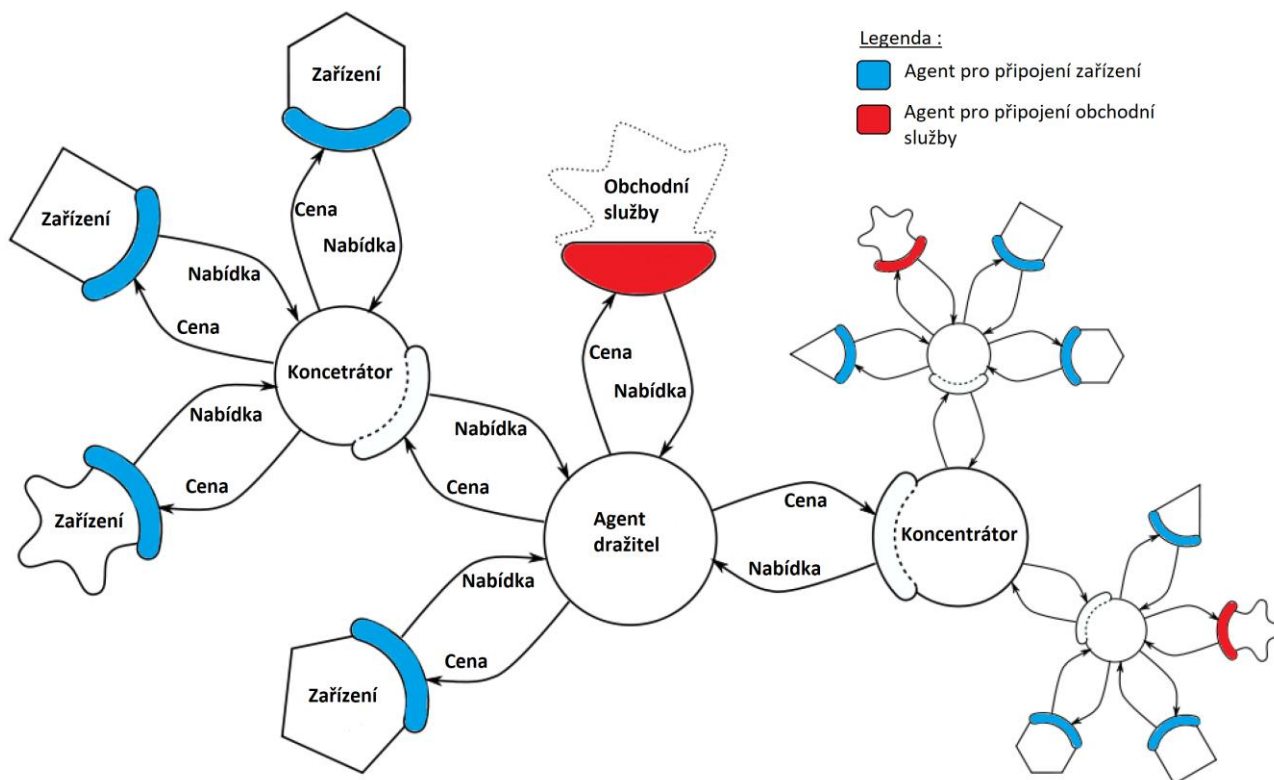
4.3.2 Architektura multiagentních systémů

Multiagentní systém (MAS) je systém skládající se z více interaktivních softwarových agentů. Softwarový agent je samostatný softwarový program, který vykonává funkci zástupce uzlu připojeného do SG sítě vůči ostatním uzlům sítě. Softwarový agent provádí úkoly související s účelem daného uzlu a reprezentuje znalosti konkrétního uzlu vůči celé SG sítí. Pro realizaci tohoto úkolu využívá informace o své činnosti, svém okolí a stavech sousedících uzlů. Svou funkčností bezprostředně ovlivňuje tu část topologie SG sítě, kde je uzel připojen. Důležitým atributem je schopnost uzlu komunikovat s dalšími subjekty (uzly) ve svém okolí a optimalizovat svou spotřebu nebo výrobu elektrické energie v kontextu daného segmentu SG sítě [27].

Studie [25] je zaměřená na SG sítě zahrnující budovy a zařízení jejich infrastruktury, které jsou představovány spotřebiči elektrické energie. Model zahrnuje chytrá města a infrastrukturu nutnou pro zajištění elektromobility včetně elektromobilů. Návrh je postaven na multiagentní architektuře, která umožňuje autonomně řídit spotřebu elektrické energie a její efektivní využívání na úrovni jednotlivých prvků a zároveň vzájemné koordinace prvků v případě zajištění jejich potřeb na dodávku nebo odběr elektrické energie.

V práci [27] je MAS definován jako systém řídicí energetické sítě. Architektura systému nazvaného PowerMatch rozšiřuje koncepci představenou v práci [25] s cílem navrhnout technické řešení zaměřené na návrh autonomních buněk. Model navrhuje koordinační mechanismus pro vyvažování poptávky a nabídky v klastrech distribuovaných zdrojů energie (DER). V clusteru PowerMatcher jsou agenti organizováni do logických stromů. Listy těchto stromů jsou tvořeny lokálními agenty, popřípadě jej může nahradit agent zastřešující funkčně k němu připojené uzly vůči SG sítí. Kořen stromu tvoří unikátní agent tzv. dražitel, který přijímá nabídky od jiných agentů (charakterově odběratel nebo výrobce/dodavatel elektrické energie) a realizuje přidělování zdrojů na základě jím

vytvárené cenotvorby. Jeho cílem je hledání rovnovážné ceny vzájemně ustanovené mezi zdroji a odběrateli elektrické energie. Ke zvýšení škálovatelnosti řešení mohou být do topologie SG sítě vkládány tzv. koncentrátory. Na Obr. 5 je uvedena schematická struktura clusteru. Dražitel po obdržení jednotlivých nabídek a poptávek je schopen stanovit optimální ceny a následně je sdělit ostatním agentům s cílem zrealizovat dodávku elektrické energie v rámci SG sítě. Tato dodávka je pak realizována mezi příslušnými agenty (uzly) prostřednictvím lokální distribuční soustavy.



Obr. 5 Základní prvky PowerMatcher clusteru [27]

Obdobně autoři práce [28] navrhli simulační model založený na softwarových agentech pomocí architektury MAS aplikované v rámci konceptu chytrého města (Smart City). Autoři popsali přístup k simulaci různých typů zařízení a vytvořili dynamickou infrastrukturu, která může částečně simulovat chování budoucí chytré sítě v rámci daného města.

4.3.3 Dostupné komunikační technologie

Vhodné technologie pro realizaci řídicího protokolu pro komunikační sítě v rámci Smart Grid jsou uvedeny v přehledech [29] a [30]. Přehled architektury a bezpečnostních otázkách Smart Grid pro budování HAN sítí na základě výzkumného projektu realizovaného University of Pisa je shrnut v publikaci [31]. Autoři navrhuji využití pro realizaci bezdrátové sítě založené na technologii ZigBee. Z pohledu zaměření předkládané práce je důležité propojení na tento koncept architektury, do kterého autoři nejenom inteligentní měřiče, ale zároveň zástrčky nn rozvodů, do kterých se připojují zařízení využívaná domácnostmi.

Domácí síť využívá lokální síť vymezenou danou domácností s propojením do MAN, WAN, popř. by měla umožnit zajištěnou komunikaci mezi jednotlivými prvky s možností propojení na LDS za účelem výměny informací nutných pro řízení optimalizace spotřeby domácnosti. Integrace s příslušnou

komunikační sítě používanou pro řízení prvků LDS by mělo být prostřednictvím domácí brány, aby bylo zajištěno bezpečné propojení těchto sítí. Jak uvádí [29], nejvhodnější technologie využitelná v současné době pro sítě typu HAN představuje technologie Wi-Fi.

Smart Grid sítě vyžadují obousměrnou komunikaci za účelem výměny informací mezi zákazníkem a LDS. S využitím sítě typu HAN, kde dochází k výměně informací uvnitř inteligentní domácnosti, se dostává do popředí problematika bezpečnosti osobních informací podle nařízení Evropského parlamentu a Rady Evropské unie 2016/679 o ochraně fyzických osob v souvislosti se zpracováním osobních údajů a volném pohybu těchto dat – údaje o identifikujících zvyky domácnosti např. o času, kdy používá určité zařízení. Uvedené nařízení pohlíží na osobní údaje jako veškeré informace vztahující se k identifikované či identifikovatelné fyzické osobě. Otázkou návrhu bezpečnostní architektury pro HAN se zabývá práce [32]. Autoři navrhují logickou architekturu Smart Grid založenou na HAN s využitím stávajících referenčních modelů.

Pro praktické využití sítí HAN s ohledem na potřeby měření spotřeby a výměny informací mezi prvky Smart Grid sítě má význam optimalizační schéma pro přidělování přenosové kapacity s vazbou na LDS s integrovanými prvky AMI [33].

4.4 ŘÍZENÍ POPTÁVKY

Pokud je domácnost schopna v čase upravovat svoji spotřebu tím, že odsune užití zařízení na optimální časový interval, kdy je tarif cenově optimální, může u dynamické cenotvorby, kdy sazby se zvyšují nad paušální sazbu v předem stanoveném denním období špiček (Time of use – TOU), získat úsporu v nákladech na elektrickou energii v průměru mezi 5 a 10 %. Pokud však budou použity sazby zohledňující kritickou špičku denního odběru (Critical peak pricing – CPP), lze dosáhnout úspor až v rozmezí 20 a 30 % [34]. Tyto úspory jsou tvořeny pouze tím, že domácnost umí reagovat na změny v sazbě a zároveň umí vyhodnocovat, jaká zařízení jsou pro ni z pohledu významnosti akceptovatelná provozovat v době zvýšené sazby.

Předpokladem pro efektivní řízení poptávky a nabídky s využitím mechanismů řízení poptávky (DSM – Demand Side Management, někdy označován jako Demand Side Response, DSR) je vzájemné propojení jednotlivých prvků SG sítě s cílem zajistit vyvážený chod na úrovni lokální distribuční soustavy, distribuční soustavy a přenosové soustavy s integrací jednotlivých zdrojů (výroben) elektrické energie s flexibilitou na straně poptávky představuje významný prvek pro nákladově efektivní řízení SG sítí.

Řízení využívající mechanismy DSM pro oblast plánování kombinované výroby tepla a elektřiny představuje práce [35], mechanismy balancování poptávky a nabídky postavené na přístupu založeném na ceně elektrické energie pak shrnuje článek [36]. Pro SG sítě je důležitá schopnost řízení spotřeby s důrazem na decentralizaci optimalizace integrovaných energetických systémů budov, které je řešeno v práci [37].

Většina modelů DSM vychází z předpokladu, že poptávka je nepružná v krátkém časovém intervalu a dodávka objemem odpovídá poptávce. Problém optimalizace se omezuje na otázku hledání optima poptávky za minimální cenu [21]:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i \in S} c_i(p_i) \\ \sum_{i \in P} p_i = \sum_{j \in S} q_j \end{aligned} \quad (5-1),$$

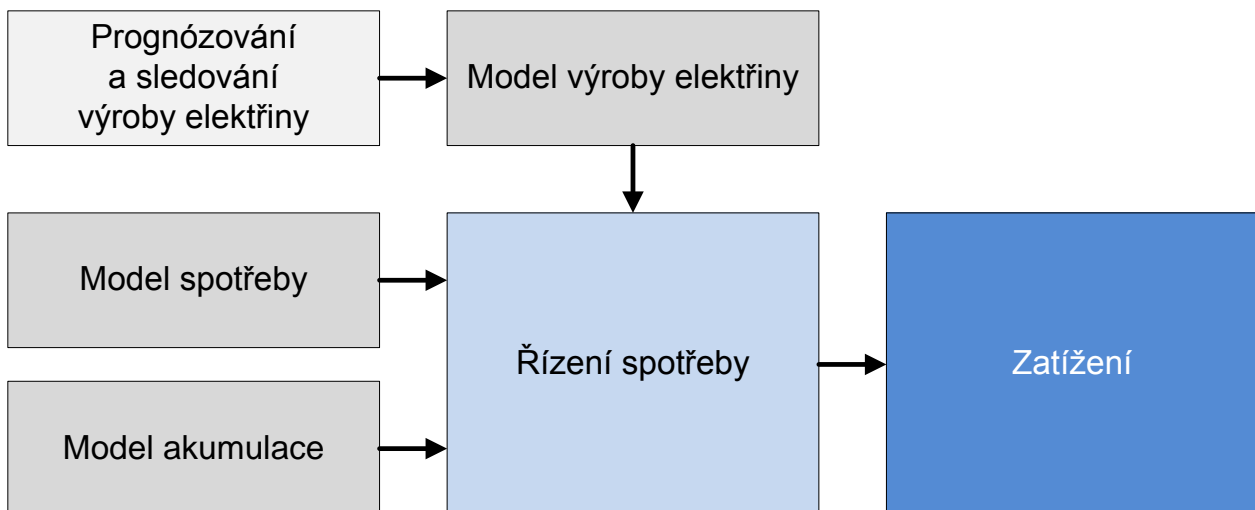
kde q_j je předpokládaná poptávka (požadavek) zařízení a_j pro daný časový interval zajišťující pokrytí požadavku zajištěné dodávky elektrické energie. Rozhodovací mechanismus DSM systému řeší optimalizační úlohu (5-1) a hledá takovou cenu dodávky od zařízení a_i , která odpovídá mezním výrobním nákladům tohoto zdroje.

Článek [27] definuje **reakci na poptávku** jako schopnost zařízení spotřebovávajících elektrickou energii měnit své operace v reakci na (cenové) signály od prodejce elektrické energie nebo být motivován upravit své chování na základě podnětů od provozovatele LDS v reálném čase.

Připojení jednotlivých zařízení připojených do inteligentní sítě domácnosti k systému řízení poptávky (DSM) je rozšířením koncepce inteligentního domu navrženého ve výzkumech provedených [27], [38] a [39]. Uvedené koncepty vycházejí ze schopnosti modelu predikovat u OZE průběh objemu vyrobené elektrické energie v čase a zároveň pro spotřebiče s velkým odběrem predikovat příkonu v čase tak, aby se pravděpodobnostně odhadl okamžik, kdy se požadavek na dodávku elektrické energie nejefektivněji naplní příslušným zdrojem, resp. dochází k balancování poptávky a nabídky při nejoptimálnější ceně. Práce [40] definuje standardizovaná systémová rozhraní pro zapojení prvků do SG sítí.

4.5 SYSTÉMOVÝ MODEL DOMÁCNOSTI

Základní koncept architektury připojení obnovitelných zdrojů v rámci inteligentních domů je uveden na Obr. 6, který vychází z práce [41]. Uvedený koncept jako základní předpoklad definuje nutnost zabezpečení kontinuální dodávky elektrické energie i v době, kdy OZE elektrickou energii nedodávají. Pro efektivní využití elektrické energie získané z OZE je součástí modelu zařízení pro akumulaci elektrické energie. Akumulace je využita pro ukládání přebytku elektrické energie, v okamžiku, kdy spotřeba je nižší než výroba z OZE zdrojů a následně je dodávána do nn rozvodů domácnosti v době, kdy OZE energii nedodávají, ale je vyžadována některým ze zařízení domácnosti. Uvedený koncept zahrnující akumulaci a OZE jako integrující článek inteligentní domácnost, vychází ze studií zveřejněných v článcích [42] a [43].



Obr. 6 Systémový model pro obnovitelné zdroje [41]

Autoři v práci [44] identifikovali pro architekturu inteligentních sítí využívaných v rámci inteligentních domů kritéria pro zabezpečení autonomního řízení spotřeby elektrické energie pro maximalizaci využití OZE:

- 1) definice architektonického rámce pro aplikace řídicí spotřebu, poptávku a nabídku elektrické energie na úrovni inteligentních domů s vazbou na inteligentní distribuční síť,
- 2) na úrovni komunikační sítě inteligentních domů stanovení datových standardů pro výměnu potřebných informací mezi jednotlivými prvky nebo pro účely řízení služeb na úrovni inteligentních domů,
- 3) komunikační rozhraní umožňující výměnu standardních datových a řídicích přenosů mezi prvky inteligentní inteligentních domů a mezi inteligentním domem a lokální distribuční sítí,
- 4) definice fyzického rozhraní (na úrovni HW parametrů a charakteristik) pro propojení inteligentní domácí sítě a inteligentní distribuční sítě, popřípadě rozhraní pro prvky zapojené v inteligentní domácnosti (spotřebiče) a distribuční síti s cílem zajistit přímou komunikaci mezi spotřebiči a distribuční sítí pro účely efektivního řízení spotřeby s ohledem na potřeby distribuční sítě,
- 5) zajistit automatické připojení nového zařízení využívající datové a komunikační rozhraní pro inteligentní síť,
- 6) zajistit výměnu informací (standardizovaným datovým rozhraním) mezi prvky inteligentní sítě (spotřebiče) a prvky distribuční sítě,
- 7) umožnit výměnu informací o aktuální ceně elektrické energie mezi inteligentní budovou a dodavatelem elektrické energie,
- 8) vybudovat základní rámeček modelů služeb a jejich řízení nad inteligentní sítí.

Předpokladem pro vyšší prosazení konceptu inteligentních domů v budoucnu jsou změny na úrovni legislativních a regulačních opatření, která by umožnila na úrovni územně správní jednotky (chytré město, region) realizovat distribuci přebytků elektrické energie mezi inteligentními budovami s využitím lokální distribuční sítě. Uvedený předpoklad vyžaduje rozšíření komunikace mezi jednotlivými inteligentními domy, aby bylo možné efektivně realizovat vzájemnou dodávku přebytků z výroben umístěných v inteligentních domech, popřípadě uskutečňovat obchodní procesy. Přebytky z výroby lze v rámci legislativy ČR dodávat formou zpětného prodeje do LDS pro instalované solární elektrárny s výkonem do 10 kW v souladu s požadavky Energetického zákona. Ostatní zdroje jsou pak vnímány jako samostatné výrobní podléhající jinému režimu v souladu s Energetickým zákonem a podmínkami provozovatele distribuční soustavy, popř. podmínkami provozovatele přenosové soustavy pro připojování výroben elektřiny do DS, popř. PS. S využitím tohoto konceptu lze propojovat individuální zdroje elektrické energie inteligentních budov a vytvářet virtuální výrobní, které pak mohou dodávat elektrickou energii do lokální distribuční soustavy v rámci geografického území, kde se nacházejí. Zapojení několika zdrojů do virtuálního

zdroje vyžaduje vytvoření komplexnější řídicího model na úrovni komunikace mezi inteligentními domy tak, jak navrhuje práce [45] a [46].

Řídicí logika inteligentního domu bude muset být schopna vzájemné výměny informací s externími objekty [44] jako představují např. OZE, operátor trhu, obchodník s elektřinou a provozovatel distribuční soustavy. Cílem této informační výměny je pro vlastní řídicí logiku inteligentního domu nalézt optimum mezi cenou, individuální funkcí užitku zohledňující okamžitou nabídku a poptávkou, kterou by měla být schopna řídit v reálném čase. Důležitým aspektem je, aby inteligentní domy byly schopny prostřednictvím modelu optimalizovat svou spotřebu elektrické energie a zároveň poskytovaly systémové možnosti pro zajištění vyrovnaného chodu sítě s ohledem na potřeby LDS/DS a zapojených výroben (zdrojů elektrické energie). Pro účely centralizované autority dohlížející, popř. zabezpečující vyrovnaný chod DS/PS je v modelu zaveden nezávislý operátor distribuční soustavy. Primárním úkolem nezávislého systémového operátora je v této koncepci udržování bezpečnosti a stability energetického ekosystému [15]. Ze základního pohledu je důležité realizovat s minimálním zpožděním obchodní transakce typu prodej-nákup (dodávka-odběr) elektrické energie na bázi efektivního rozhodovacího mechanismu, a to včetně sběru údajů z různých uzlů SG sítě v reálném čase.

V práci [47] autoři vybrali společné charakteristické znaky používaných definic inteligentních sítí:

- Inteligentní síť bude poskytovat rozhraní mezi spotřebiči a prvky distribuční soustavy, popřípadě přenosové soustavy (v závislosti rozsahu Smart Grid sítě);
- Inteligentní sítě by měly být alespoň částečně autonomní;
- Inteligentní sítě budou schopny optimalizovat provoz jednotlivých prvků připojených do distribuční soustavy;
- Inteligentní sítě budou podporovat lepší integraci distribuované výroby do přenosové a distribuční soustavy.

Požadavkem na zvýšení efektivity inteligentní budovy (domácnosti) je schopnost využívat obnovitelné zdroje (solární panely a větrné turbíny) s cílem optimalizovat svou spotřebu elektrické energie v čase. Tato optimalizace by měla být schopna na bázi rozhodovacích algoritmů určit, kdy vyrobenou elektřinu využívat, poskytnout / prodávat do distribuční sítě nebo uložit pro budoucí spotřebu. To opět předpokládá nutnost výměny informací mezi lokální distribuční sítí a dalšími zákazníky [48].

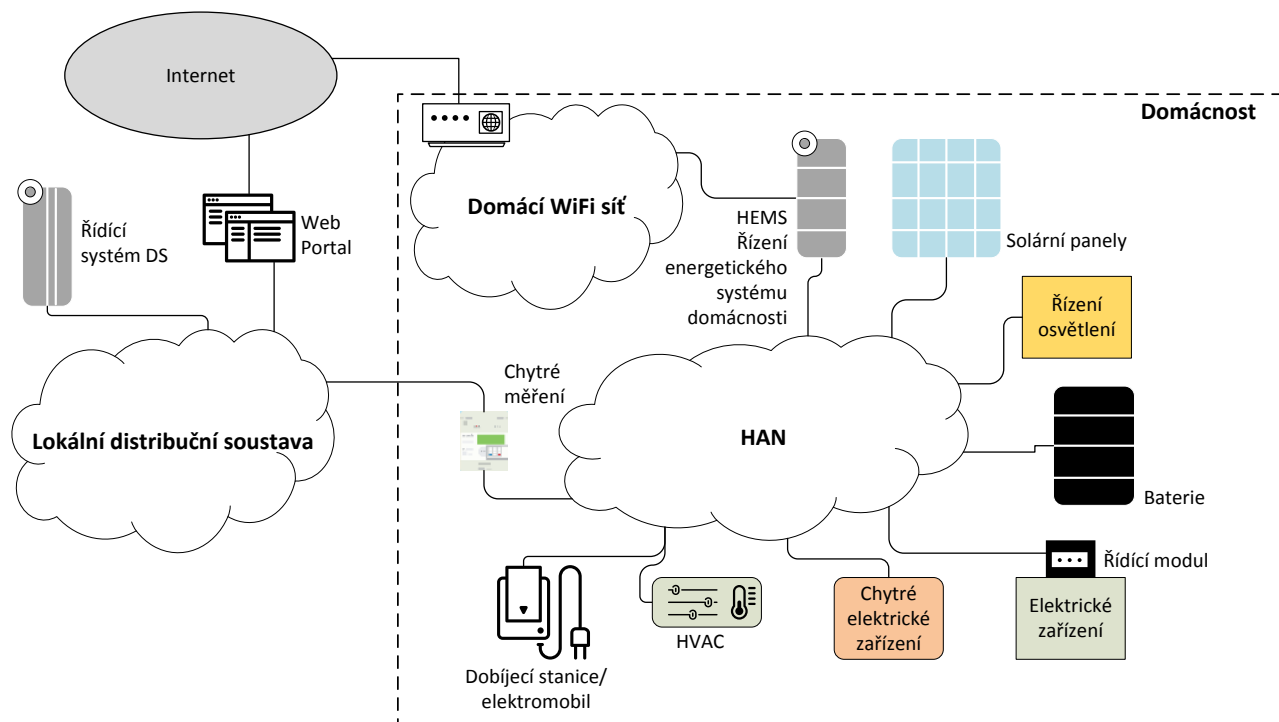
4.6 ŘÍZENÍ INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI

Architekturou SG sítí se zabývají například monografie [49], [50] nebo [51], které mají přesah i do inteligentních sítí využitelných v rámci inteligentní domácnosti. Identifikují možnosti technické integrace prvků zapojených do inteligentní sítě a zároveň poskytují přehled o způsobu řízení těchto sítí. Důležitým aspektem je, že definují hierarchický koncept architektury, která umožňuje vytvářet samostatné sítě na úrovni domácností, oblastí, do kterých jsou jednotlivé domácnosti zapojeny, ty

následně propojovat do sítí inteligentních měst a regionů. Nejvyšší vrstvu architektury pak představuje ES, kde dochází k propojení velkých zdrojů elektrické energie s PS a DS.

Pro zvolenou oblast řešení má význam [52], kde je navržen koncept architektury specializovaných sítí pro přenos dat s využitím v inteligentní domácnosti s vazbou na koordinační a řídicí mechanismy SG sítí vyšší úrovně. Autoři zavádějí několik úrovní komunikačních sítí, které vytvářejí vzájemně propojené celky s cílem zajistit výměnu informací mezi jednotlivými prvky SG sítě. Základní úroveň je představována domácí sítí (HAN – Home Area Network), do které jsou propojeny zařízení v domácnosti. HAN zabezpečuje bezpečnou komunikační vrstvu pro výměnu informací mezi zapojenými prvky. Právě koncept HAN sítě lze využít pro zabezpečení řízení optimalizace elektrické energie na úrovni domácnosti. Jednotlivé HAN sítě jsou propojovány do vyšších celků v podobě tzv. oblast sousedících sítí (NAN – Neighbouring Area Network). Nad každou NAN pro účely řízení SG sítě je vybudován tzv. lokální koncentrátor, který zabezpečuje koordinaci a řízení jednotlivých podřízených sítí typu HAN a zároveň přestavuje propojovací bod do širokopásmové sítě WAN. V rámci WAN je pak centralizována řídicí jednotka a komunikace v rámci ES s cílem optimalizovat její provoz. Využívat prostředků HAN je autory doporučováno pro vytváření systémů řízení energie na úrovni domácnosti (tzv. HEMS – Home Energy Management System).

Uvedený koncept autoři navrhují využít pro vytváření autonomních mechanismů, které jsou zaměřeny na optimalizaci spotřeby domácnosti. Popřípadě jej považují za přínosný při rozvoji internetu věcí (IoT) aplikovatelný pro domácí použití. Schematicky je domácí komunikační síť zobrazena na Obr. 7.

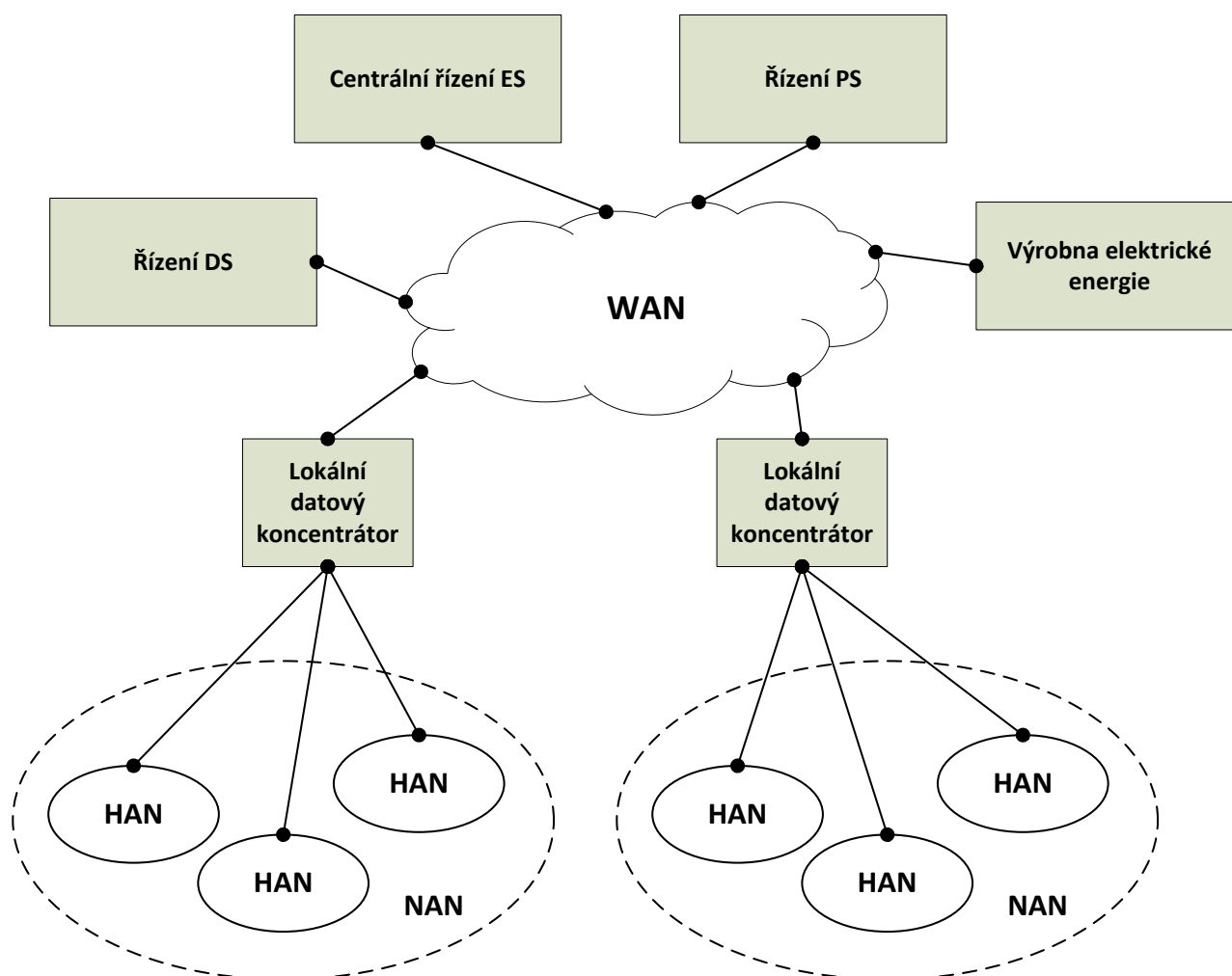


Obr. 7 Blokové schéma domácí sítě [29]

Právě autonomie, kterou představuje HAN síť, poskytuje vhodné prostředí pro zajištění komunikace uvnitř inteligentní domácnosti a nezávisle na vyšších vrstvách hierarchického konceptu umožňuje zajistit vlastní řízení s případným rozhraním mezi HAN a lokálním koncentrátorem na úrovni NAN

sítě. Tato struktura by mohla představovat potenciální pro rozvoj komunitní spolupráce a koordinaci při optimalizaci spotřeby na úrovni dané komunity připojené do LDS.

Propojení jednotlivých úrovní komunikační sítí je pak uvedeno na Obr. 8.



Obr. 8 Hierarchický koncept komunikačních sítí [52]

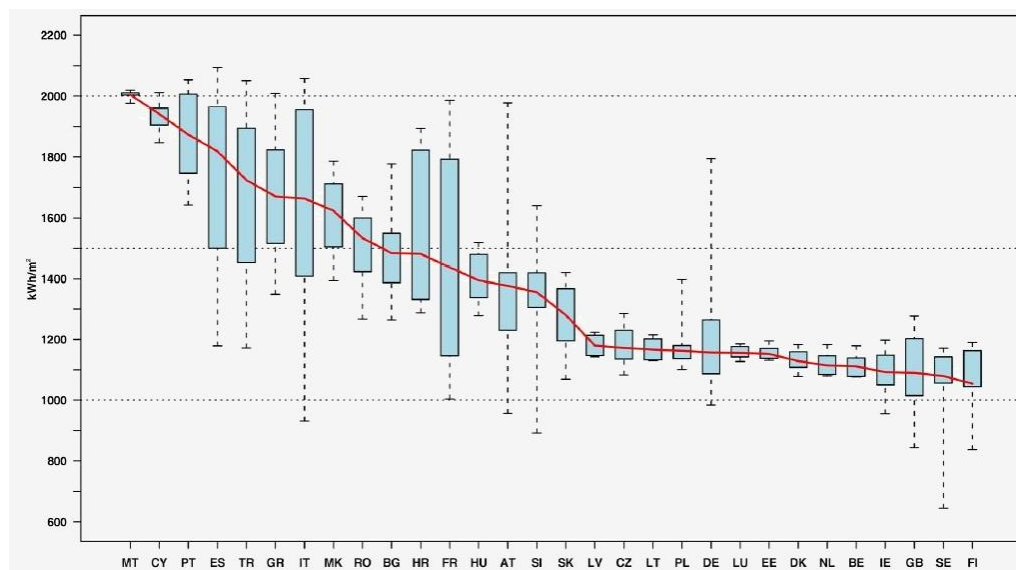
Jako perspektivní v rámci rozvoje domácích zařízení jsou definovány koncepty s názvem „Home Plug and Play“ a „Universal Plug and Play“ [53]. „Home Plug and Play“ je navržen jako průmyslový standard pro určité typy zařízení, které se automaticky připojí do prostředí inteligentní domácnosti a jednotlivé funkce jsou individualizované pro potřeby řízení daného zařízení. Druhý koncept představuje univerzální rozhraní, které poskytuje pouze základní funkce. Tyto koncepty stanovují požadavky na zařízení, aby bylo možné tato zařízení propojit s inteligentní domácností. V prvním rozšíření je navržena standardizace z pohledu vybavení zařízení výhodným komunikačním rozhraním tak, aby s nimi mohla inteligentní síť komunikovat a dále pak standardní rozhraní pro připojení do rozvodné sítě nn v domácnosti. Zároveň je zde navrženo, aby jednotlivá zařízení bylo možné programovat s využitím technologie Web Service Definition Language za účelem umožnit rozvoj aplikací využívající tato zařízení, a to jak z pohledu otevřeného prostředí pro vývoj řídicích systémů pro domácnosti, tak pro správu a konfiguraci těchto zařízení.

4.7 PROGNOZOVÁNÍ VÝROBY Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE

Pro zvýšení účinnosti využití obnovitelných zdrojů (OZE) na úrovni rezidenčního bydlení je důležité, aby domácnost uměla v čase plánovat svoji spotřebu elektrické energie a zároveň měla možnost prognózovat množství elektrické energie vyrobené na úrovni vlastních OZE. V podmínkách ČR jsou nejvíce využívány fotovoltaické zdroje. Na vstupní straně je možno měřit aktuální spotřebu, provádět její porovnávání s odběrovým diagramem, zároveň měřit a vyhodnocovat charakteristiky okolního prostředí a ty opět porovnávat s historickými daty. Na základě těchto informací by měl systém řízení inteligentní sítě domácnosti mít schopnost rozhodovat o zapínání jednotlivých spotřebičů, popřípadě posunout v čase jejich zapnutí na vhodnější okamžik s ohledem na užitnou funkci těchto spotřebičů. Prediktivní modely by měly poskytovat schopnost učení na základě charakteristického chování domácnosti a jednotlivých spotřebičů a tuto schopnost zpřesňovat s ohledem na sledované charakteristiky.

Prognózování je proces vytváření předpovědí budoucnosti založený na historických a současných datech a analýze trendů. Z pohledu tvorby krátkodobých prognóz je důležitou schopností vytváření odhadu objemu výroby na základě takových veličin, které by měly pokrývat technicko-fyzikální principy výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. V případě fotovoltaických zdrojů je klíčovým požadavkem prognózovat intenzitu slunečního záření dopadajícího FV panelu. V kombinaci s daty z inteligentních měřicích přístrojů je možné cíleně řídit nebo minimálně zpřesňovat požadavky jednotlivých spotřebičů tímto způsobem adresně řídit poptávku. Integrace mezi inteligentním domem a lokální distribuční sítí umožňuje řídit stranu nabídky s ohledem na lokální poptávku jednotlivých připojených inteligentních domů a balancovat jednotlivé zdroje elektrické energie připojené k distribuční síti, popřípadě přenosové soustavě. Tato vlastnost je plně podporována moderními architekturami inteligentních sítí, jak definuje koncept PowerMatcher [45], který integruje jednotlivé typy prvků formou plug-in do nadřazených bloků tvořící inteligentní síť. Významnou funkcí této architektury je automatické aukce řídící poptávku a nabídku.

Území České republiky nepředstavuje ideální podmínky pro vyžití solárních elektráren s ohledem na průměrnou roční intenzitu slunečního záření z pohledu zemí EU (Obr. 9).



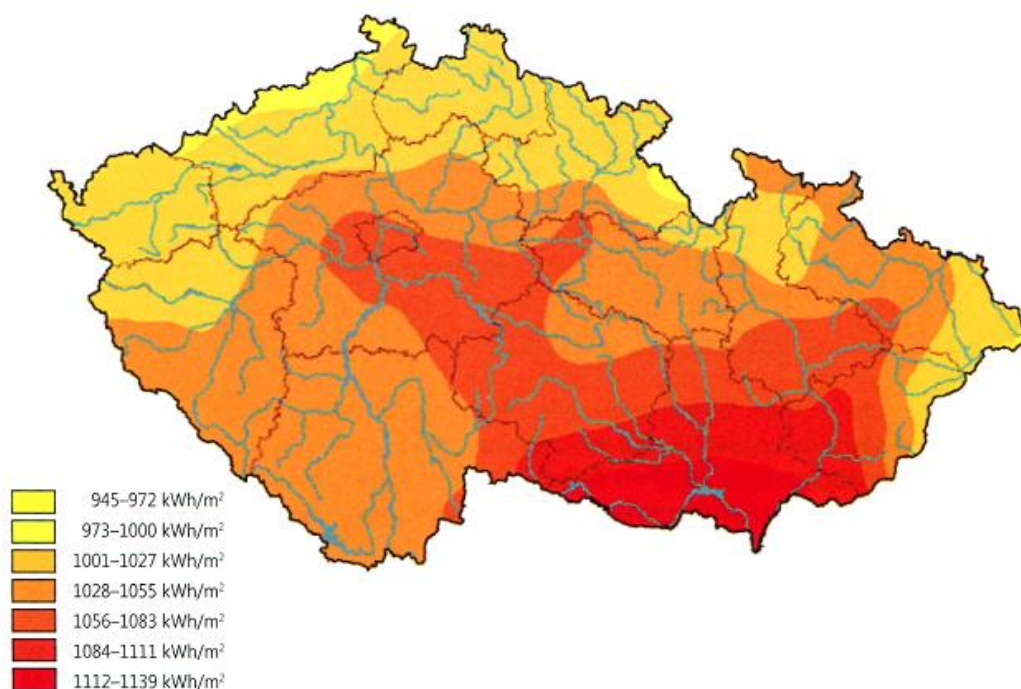
Obr. 9 Průměrná roční globální intenzita slunečního záření pro země EU [54]

Mapu průměrných ročních hodnot globálního slunečního záření v ČR [kWhm⁻²] znázorňuje Obr. 10. Celková doba slunečního svitu bez oblačnosti se pohybuje mezi 1 400 až 1 800 hod/rok [55].

Průměrná délka slunečního svitu za rok 2017 pro ČR je uvedena pro jednotlivé měsíce v Tab. 1 (přepočteno podle [55]). Celková délka ročního úhrnu slunečního svitu představuje pouze 18,9 % z celého roku 2017. V případě využívání FV zdroje v rámci domácnosti je tato skutečnost ovlivňující její využívání. O to větší význam má krátkodobá predikce vývoje objemu výroby z lokálního FV zdroje pro její využití v rámci domácnosti a integrace predikce do systému řízení spotřeby domácnosti.

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
[hod]	76,3	71,7	141,7	119,7	239,6	286,3	209,4	243,9	99,5	91,1	40,3	37,2

Tab. 1 Průměrná délka skutečného slunečního svitu v ČR



Obr. 10 Průměrné roční hodnoty globálního slunečního záření [56]

4.7.1 Regresní funkce

Prognózování objemu vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů vychází z modelů předpovědi počasí na bázi statistických odhadů s užitím regresních funkcí a na základě nich je možné provádět krátkodobé předpovědi průběhu stanovených parametrů.

V práci [47] autoři ukazují, že k výraznému zlepšení systému řízení inteligentních sítí a efektivity mechanismů řízení poptávky mohou vést informace o pravděpodobném chování zdrojů obnovitelné energie a spotřebitele pomocí krátkodobých prognóz a dlouhodobého hodnocení reálného chování jak na úrovni zdrojů, tak jednotlivých spotřebičů zapojených do sítě inteligentního domu.

V článku [57] autoři odvozují funkci intenzity slunečního záření jako závislost proměnných typu den, teplota, rosný bod, rychlost větru, oblačnost, množství srážek a vlhkost:

$$\text{Intenzita slunečního záření} = f(\text{datum, teplota, rosný bod, rychlost větru, Oblačnost, srážky, vlhkost}) \quad (5-2),$$

kde f je funkce odvozená pomocí různých regresních funkcí. Autoři ve svém článku odvozují svůj lineární predikční model na základě regresní funkce pro predikci výroby elektrické energie ze solárních článků. Tento model vyžaduje dostupnost aktuálních hodnot jednotlivých parametrů pro vlastní výpočet predikce. Předpokladem je vybavení domácnosti příslušnými měřicími přístroji, které v reálném čase zasílají měřené veličiny vyhodnocovací jednotce prostřednictvím vhodného komunikačního média.

Další metodou využívající parametrické regresní funkce na bázi klimatických charakteristik pro následující časové období ($t+1$), vycházející ze srovnání těchto charakteristik v časech t a $t-1$, popisuje článek [58]. Výsledkem je regresní funkce pro predikci vývoje denní zátěže pro $t+1$ opět vyžadující komplexní sadu vstupních dat pravidelně snímaných jednotlivými čidly.

4.7.2 Neuronové sítě

Umělé neuronové sítě se v dnešní době úspěšně používají pro řešení vybraných problémů energetiky, jako jsou například plánování kapacit přenosové soustavy, kontrola zařízení přenosové soustavy, bezpečnostní analýzy a diagnostika poruch. Vhodnost využití neuronové sítě pro mapování složitých nelineárních vztahů může být ideální pro aplikace na predikci budoucího zatížení ve Smart Grid sítí pro krátkodobé předpovědi jako mechanismu řídicí logiky na úrovni inteligentního domu.

Studie [59] se zabývá možnostmi předpovědi počasí pro potřeby řízení obnovitelných zdrojů (v tomto případě fotovoltaických článků) v krátkodobém časovém horizontu s využitím modelů realizovaných pomocí neuronových sítí. Dosažená hodnota absolutní střední chyby (1,24 %) u modelu časových řad na bázi neuronů s užitím waveletů představuje vysokou přesnost daného modelu pro prognózování odběru/spotřeby elektrické energie. Neuronové sítě by mohly být využity pro tvorbu krátkodobé předpovědi zatížení, a to jak na úrovni domácnosti, tak na úrovni všech odběrných míst v rámci dané SG sítě.

Autoři uvedené studie zároveň srovnávají modely předpovědi postavené na různých metodách predikce z pohledu vlastní střední chybové odchylky mezi předpovědí a skutečností:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(P_A^i - P_F^i)}{P_A^i} \times 100 \quad (5-3),$$

kde P_A je aktuální zátěž, P_F je předpovězená zátěž, N je počet časových vzorků.

4.7.3 Analýza trendů na úrovni zátěže

Odhadování spotřeby na základě historických trendů je další možností, jak predikovat spotřebu elektrické energie. Tyto metody identifikují trendy ve sledovaném chování, tj. vytvářejí diagramy odběru pro každý spotřebič a snaží se předvídat budoucí změny v charakteristice odběru. Pro zpřesnění výstupů těchto modelů je nutné zahrnout i chování dané domácnosti jako celku, aby lépe odpovídaly ekosystému inteligentního domu.

Práce [60] pro výpočet odhadu předpokládaného odběru elektrické energie daného spotřebiče definuje faktor zatížení (load factor) podle následujícího vzorce:

$$Load\ factor = \frac{Average-Load\ demand}{Peak-Load\ demand} = \frac{annual\ kWh\ energy}{Peak-Load\ demand \times 8760 \frac{hours}{year}} \quad (5-4).$$

Faktor zatížení je pak porovnáván s reálnou spotřebou elektrické energie a na základě změny identifikuje pravděpodobný odběr.

Autoři ve článku [61] definují předpokládanou zátěž jako funkci skládající se ze čtyř složek:

$$L = L_n + L_w + L_s + L_r \quad (5-5),$$

kde L je celkové zatížení, L_n představuje "normální" zatížení jako standardizovaný zatížení v rámci typizovaného dne, L_w představuje na počasí citlivou část zátěže, L_s je odchylka od obvyklé zátěže, a L_r představuje náhodnou složku simulující chování zátěže.

Pro zpřesnění střednědobé předpovědi zátěže hrají roli informace, které neumíme sledovat. Proto autoři v publikaci [62] odvozují na základě statistického vyhodnocení dat poskytnuté společností Northeastern US funkci na základě statistického modelování zátěže, které vychází z údajů o počasí a zatížení:

$$L(t) = L_{d,h}(t)f_w(t) + R(t) \quad (5-6),$$

kde $L(t)$ je původní průběh zátěže, $L_{d,h}(t)$ představují denní a hodinové komponenty, $f_w(t)$ je rovnice faktoru vlivu počasí a $R(t)$ je náhodná chyba systému. Zátěž nezávisí jenom na aktuálních podmínkách počasí, ale i na jejich průběhu během předchozí hodiny. Tento vliv je zohledněn v rovnici faktoru vlivu počasí:

$$f_w = \beta_0 + \sum \beta_j X_j \quad (5-7),$$

kde β_0 , β_j jsou koeficienty regresní funkce a X_j je nelineární funkce vhodných parametrů počasí.

4.7.4 Další přístupy

Další metody predikce počasí uvádí například [63], který se zaměřuje na problematiku moderních metod předpovědi z pohledu střednědobé a dlouhodobé predikce vývoje jednotlivých veličin ve vzájemné souvislosti. Tyto metody jsou náročné z pohledu výpočtů a zajištění požadovaných vstupů. Pro účely stanovení krátkodobé předpovědi je jejich použití značně omezené. Matematické modely globálního slunečního záření vycházející z dlouhodobých dat sledovaných v celosvětové síti stanic SOLMET/ERSATZ a jsou popsány v [64]. Tyto modely se zaměřují na globální predikce globálního záření z celosvětového pohledu pro konkrétní zeměpisnou šířku a délku. Lze je využít pro výpočet globálního záření v jeho maximální teoretické hodnotě.

Analýzou dat dlouhodobě sledovaných Národní meteorologickou službou USA autoři pro odhad množství energie vyrobené ze solárních článků odvozují rovnici [65]:

$$P(t) = P_{MAX}(t) * (1 - C(t)) \quad (5-8),$$

kde $C(t)$ reprezentuje oblačnost jako procentní pokrytí oblohy mraky. $P_{MAX}(t)$ je maximální výkon FV článku odvozený z měření následovně:

$$P_{MAX}(t) = a(t_{12+} + b)^2 + c \quad (5-9),$$

kde a, b, c jsou konstanty stanovené na základě měření pro konkrétní dny v roce, t_{12+} reprezentuje hodiny po polední (tj. po 12:00).

5 VYMEZENÍ POJMŮ

Zaměření vlastního výzkumu vychází z vymezení holistického konceptu podle prací [39] a [45]. Tento koncept zahrnuje inteligentní domácnosti a budovy jako **(i)** proaktivní zákazníky (prosumers), kteří **(ii)** vyjednávají a spolupracují v rámci inteligentní sítě **(iii)** v těsné iteraci s vnějším prostředím. Z pohledu aplikovatelnosti předpokladů tohoto konceptu pro potřeby řízení inteligentní domácnosti, je nutné definovat takové rozšíření uvedeného konceptu, aby bylo aplikováno na vymezený výzkumný problém. Jednoznačnost vnímání vymezení vyžaduje definovat klíčové pojmy v rámci předkládaného výzkumu, které budou uvozovat vlastní zaměření výzkumu a umožní jeho následný rozvoj.

5.1 AKTIVNÍ ZÁKAZNÍK

DEFINICE 1. Aktivní zákazník

Jedná se o takového koncového zákazníka, maloodběratele, který využívá nejenom pro vlastní potřebu obnovitelný zdroj elektrické energie. Případné přebytky ve výrobě poskytuje v souladu s platnou legislativou a předpisy do lokální distribuční soustavy prostřednictvím elektrické přípojky.

5.2 DOMÁCNOST

DEFINICE 2. Domácnost, je vymezena:

- 1) každá domácnost patří právě k jedné územně správní jednotce a
- 2) je náhodně umístěna na jeho katastrálním území [14],
- 3) je připojena do lokální distribuční soustavy (DS) právě a jen prostřednictvím jednoho místa připojení, které je reprezentováno odběrným místem (OM),
- 4) je vybavena elektrickými zařízeními (dále jen zařízení), která pro svoji činnost spotřebovávají a/nebo jako důsledek své činnosti produkují elektrickou energii a/nebo umožňují akumulaci elektrické energie,
- 5) zařízení jsou připojena do nn rozvodů domácností a propojené prostřednictvím předávacího místa z lokální distribuční soustavy, v předávacím místě elektrina do nn rozvodů domácnosti vstupuje nebo z ní vystupuje,
- 6) v případě připojení zdroje elektrické energie do DS pak tento zdroj splňuje požadavky zákona č. 458/2000 Sb. a to, že mají instalovanou solární elektrárnu s výkonem do 10 kW.

5.3 LOKÁLNĚ VYMEZENÁ SMART GRID SÍŤ

Práce se zaměřuje na domácnost jako kombinace zařízení včetně lokálních zdrojů (především OZE) společně propojených prostřednictvím nn rozvodů a komunikační sítě zprostředkávající výměnu informací nutných pro zajištění koordinace jednotlivých zařízení a optimalizaci řízení poptávky a nabídky v rámci domácnosti (kapitola 0). Domácnost je propojena s lokální distribuční soustavou jedním místem připojení.

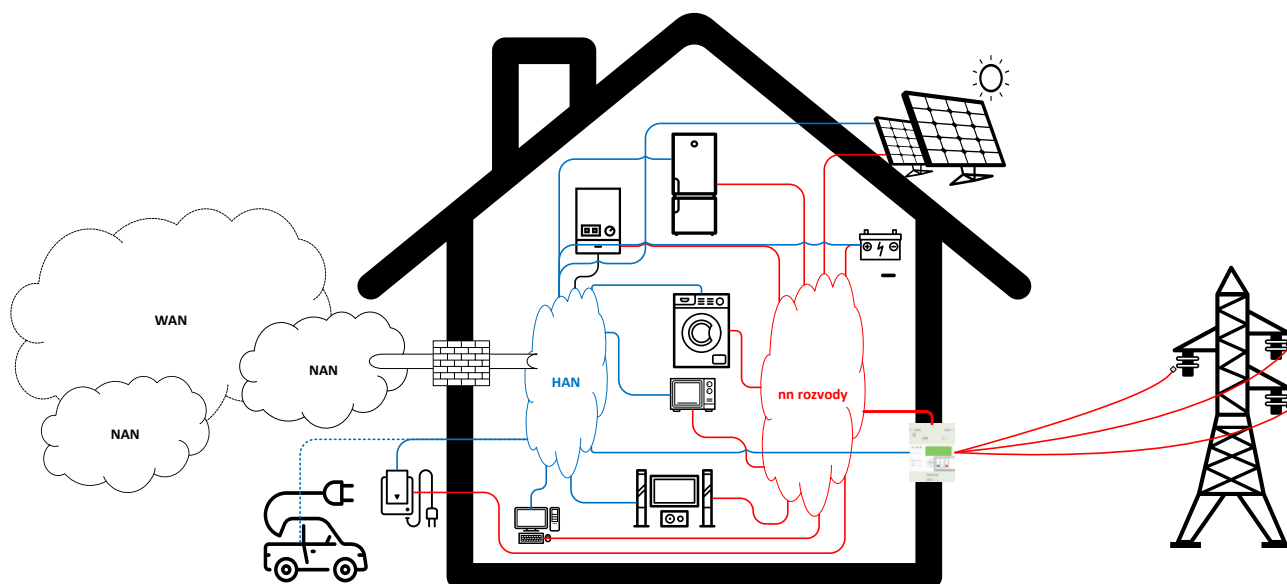
S ohledem na větší flexibilitu modelu z pohledu jeho rozšíření je vhodné, aby jednotlivé domácnosti mohly realizovat vzájemnou kooperaci, zaměřenou na optimalizace spotřeby větších celků a zároveň by tento koncept vedl k optimalizaci chodu DS. Předpokladem pro zavedení pojmu lokálně vymezených SG sítí je fakt, kdy kvůli malé rozlehlosti sítě jsou všechny prvky stejně ovlivněny provozními a klimatickými podmínkami.

DEFINICE 3. Lokálně vymezená Smart Grid síť představuje takovou SG síť, která je tvořena prvky umístěnými v geograficky stejné oblasti z důvodu stejných klimatických podmínek a zároveň jsou tyto prvky připojeny do stejného segmentu lokální distribuční sítě s ohledem na jejich vzájemnou kooperaci.

6 MODEL INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI

6.1 ARCHITEKTURA INTELIGENTNÍ DOMÁCNOSTI

Deterministickým způsobem v čase vznikají požadavky na zajištění dodávky elektrické energie od jednotlivých zařízení připojených do inteligentní sítě domácnosti. Na tyto požadavky je třeba reagovat v reálném čase, neboť akceptace požadavku ze strany zdroje představuje zahájení funkčnosti zařízení, které vyslalo signál s požadavkem na zahájení své činnosti (tj. požadavek na dodávku elektrické energie). S ohledem na fakt, že zařízení mají různou významnost z pohledu domácnosti, je pro ně definován preferenční model. Tento předpoklad zajišťuje, že zařízení mohou upravit svou činnost v rámci komplexního posouzení jejich významu jednotlivých zařízení. Schématický model je uveden na Obr. 11, kde rozhraní mezi LDS a domácností je reprezentováno měřicím zařízením (např. chytrý elektroměr). Schématický model je navržen s cílem zajistit jak interní rozvody nn napětí (reprezentující **energetickou vrstvu modelu**) a datovou komunikační síť, pojmenovanou HAN – domácí datová síť (reprezentující **komunikační vrstvu modelu**). Jednotlivá zařízení jsou připojena do energetické sítě domácnosti a do datové komunikační sítě. Přímé propojení může být realizováno u chytrých zařízení, pro tradiční zařízení musí být využit plug-in modul zajišťující jednak datovou komunikaci pro zajištění realizace vlastní řídicí logiky a jednak ovládací prvky pro připojení zařízení k energetické síti.



Obr. 11 Schéma inteligentní domácnosti

Většina prací (např. [50] a [66]) zaměřující se na architekturu SG sítí, se orientuje na uplatnění principů řízení spotřeby a koordinace výroby pro její uspokojení na bázi DSM. U těchto modelů je klíčovým faktorem cena elektrické energie a způsob jejího účtování. Obvykle se jednotlivé práce zaměřují na prvky propojené prostřednictvím přenosové a distribuční soustavy s přesahem do aktivních prvků připojených do lokální distribuční soustavy. Tyto aktivní prvky představují spotřebiče s významným příkonem a výrobní prvky typu lokální zdroj obnovitelné energie.

Doposud okrajovou oblast výzkumu u inteligentních domácností představuje návrh vhodného koordinačního mechanismu, který kombinuje vyvažování poptávky a nabídky na systémové úrovni s integrací do lokální distribuční soustavy. Nabídka a poptávka po elektrické energii je realizována ze strany zařízení, která jsou využívána domácnostmi. Koordinace nabídek na základě reakce na poptávku může znamenat získání vyšší úrovně flexibility pro koncového spotřebitele, reprezentovaného odběrným místem, na konkurenčním trhu s elektřinou. Zjištění rovnováhy mezi poptávkou a nabídkou se může provádět na různých úrovních SG sítě současně s cílem zabezpečit vyvážený chod LSD, DS a PS.

Fyzická architektura modelu je reprezentována:

- 1) **energetickou vrstvou**, zajišťující distribuci elektrické energie prostřednictvím nn rozvodů vymezené přípojným místem;
- 2) **komunikační vrstvou**, zabezpečující komunikaci zařízení připojených do inteligentní domácnosti;
- 3) **řídící vrstvou**, představující koordinaci nabídky a poptávky jednotlivých zařízení připojených do inteligentní domácnosti.

Rozdělení architektury do třech vzájemně nezávislých vrstev odpovídá návrhu reprezentovaném v příspěvku [24] tak, jak je zobrazen na Obr. 3. Vrstva business služeb je nahrazena řídicí vrstvou, jejíž funkčnost je obdobná. Řídící vrstva navrženého modelu realizuje konkrétní nastavení business služeb reprezentované navrženým modelem inteligentní domácnosti využívající funkčnosti vrstev nižší úrovně.

Příčemž vrstvy energetická a komunikační jsou nezávislé a mohou být využívány i mimo definovaný model. Zároveň obě vrstvy jsou reprezentovány současně využívanými prostředky a není vyžadován jakákoliv zásah do jejich architektury a konfigurace ze strany realizace navrhovaného modelu. Jsou modelem plně využívány v existující infrastruktuře domácnosti.

6.2 VYMEZENÍ

Klíčové požadavky na vymezení architektury inteligentních sítí s přesahem do inteligentních domů jsou zaměřeny na stanovení vhodné architektury s cílem pokrýt především definici architektonického rámce pro řídicí aplikace na úrovni Smart Grid sítě s vazbou na integraci všech prvků v rámci distribuční anebo přenosové soustavy [44]. Detailně rozpracované koncepty Smart Grid sítí jsou zaměřeny na přímou iteraci mezi prvky SG sítě, včetně distribuční soustavy, popř. přenosové soustavy. Hlavním cílem je standardizace technologií podporující řízení poptávky. Z toho plyne, že prvky takové SG sítě musejí být vybaveny vhodným rozhraním a musí být nastaven systém řízení pro konkrétní síť podporující vzájemnou datovou výměnu. Tento přístup vede spíše k balancování chodu DS/PS než k přímému zvýšení energetické efektivity na úrovni domácností.

Pokud by mělo dojít k rozšíření SG architektury i do oblastí existující skladby spotřebičů používaných v běžné domácnosti, mohou vznikat problémy související s nejednoznačností vhodného koncepčního modelu popisujícího právě síť zahrnující elektrická zařízení používaná v běžné domácnosti. Takový koncepční model by měl určovat mechanismy pro řízení nabídky a poptávky elektrické energie zahrnující omezující podmínky reflektující charakter a preference konkrétní domácnosti.

DEFINICE 6-1. Konečná množina zařízení $A = \{a_i\}, i \in \mathbb{N}$, která jsou zároveň připojena do energetické vrstvy modelu a komunikační vrstvy modelu, je reprezentována následujícími základními kategoriemi prvků:

- 1) prvky se schopností dodávat elektrickou energii do nn rozvodů domácnosti, čímž vytvářejí charakterově nabídkovou stranu modelu (množina producentů $P \subseteq A$) a
- 2) prvky, které spotřebovávají elektrickou energii z nn rozvodů domácnosti k zajištění své funkčnosti, pak představují v modelu stranu poptávky (množina spotřebičů $S \subseteq A$).

Obě kategorie z pohledu množiny všech zařízení zahrnutých do modelu inteligentní domácnosti A nemusí být vzájemně disjunktní, ale platí $P \subset A \wedge S \subset A$. Průnik množin P a S představuje taková zařízení, která mohou podle svého stavu být v módu spotřebitele nebo producenta elektrické energie. Zařízení vyrábějící elektrickou energii je definováno jako energetické zařízení pro přeměnu různých forem energie na elektřinu [3]. Podmnožina P zahrnuje zařízení vyrábějící elektrickou energii. Specifickými zařízeními jsou zařízení pro akumulaci energie. Funkčně tato zařízení zajišťují absorpci elektrické energie, její uložení a po určité době její dodávku zpět do nn rozvodů domácnosti. Z tohoto chování lze konstatovat, že náleží buď do množiny P anebo do množiny S na základě jejich provozního stavu v daném časovém okamžiku. Tyto stavy jsou vzájemně disjunktní.

Počet prvků množiny A určuje mohutnost množiny, kde počet prvků v práci bude označena mohutnost množiny $|A|$ [67]. Platí $|A| \geq |P| + |S|$, právě když platí $P \subset A \wedge S \subset A, P \cap S = \emptyset$.

Model zároveň vychází z předpokladu efektivní reakce na změny v poptávce a nabídce elektrické energie s ohledem na potřeby domácnosti a jejích preferencí. Význam jednotlivých prvků modelu je reprezentován preferenční funkcí, která se může měnit v čase. Právě preferenční systém umožňuje nastavovat význam užítku z provozování daného zařízení v čase.

Preferenční funkce by měla pomoci ve vyhodnocení priorit v jakém pořadí se přiděluje kapacita elektrické energie. Při rozhodování dochází k porovnávání jednotlivých požadavků a určuje se, které zařízení je preferované před ostatními, popřípadě jsou stejně hodnocené z pohledu užítku. Tzn. jsou vzájemně indiferentní, popřípadě která jsou neporovnatelná z hlediska užítku jejich funkčnosti pro domácnost.

6.3 ANALÝZA

6.3.1 Motivace

Způsob rozhodování o přidělování stanoveného množství elektrické energie představuje možnost, jak docílit jejího efektivního využívání. Elasticita poptávky, představující citlivost domácnosti na cenové změny, je u elektrické energie v krátkém období velmi malá, protože neexistuje optimální alternativa k elektrické energii [15]. To může být jednou z příčin neefektivního využívání elektrické energie na úrovni domácností, protože domácnosti nevnímají úsporu jako významnou [68]. Dalším důsledkem je absence motivačního přístupu k dynamické tvorbě ceny pro koncového zákazníka ze strany obchodníků. Nepřímým aspektem omezující motivaci domácností představuje nutnost zajištění vyrovnané bilance PS a DS, aby byla garantována její dodávka v požadovaných parametrech, což je hlavním motivátorem pro provozovatele DS/PS. Tyto důvody brzdí rozvoj automatizovaného řízení SG sítí zaměřené na domácnosti, protože právě díky těmto aspektům neumožňují dosáhnout zásadní přidané hodnoty v podobě úspor. V důsledku toho nejsou v současné době podporovány trendy, kdy by se domácnost uměla rozhodovat podle významu jednotlivých spotřebičů a typů zdrojů elektrické energie. Modely postavené na cenových signálech jsou efektivně uplatnitelné pro odběratele s odběrem výrazně vyšším, než představuje průměrná spotřeba domácnosti a se spotřebiči, které mají velký odběr se schopností jeho nezávislé regulace za účelem jeho využití pro účely balancování chodu DS/PS například využitím technologií hromadného dálkového ovládání (HDO).

Racionálně se rozhodující domácnost musí být schopna rozpoznat důsledky a příčiny svého rozhodování ve využívání jednotlivých zařízení. Subjektivní postoj k důsledkům svého rozhodování o využití konkrétních zařízení, který vyjadřuje preference využívání zařízení, musí racionální domácnosti umožnit takovou volbu zapojení zařízení, jehož důsledky jsou pro domácnost nejefektivnější. Uskutečnění volby využít funkčnost konkrétního zařízení je dáno schopností domácnosti racionálně označit ta zařízení, která považuje pro sebe jako nejvhodnější z pohledu

zajištění funkčnosti v daném čase. Díky tomu v případě, že nejsou žádná dvě zařízení indiferentní, může domácnost sestavit škálu od nejvýše po nejnižší hodnocené z pohledu svého rozhodování.

Existuje-li u domácnosti výše uvedený systém preferencí, pak je schopna pro konečnou množinu zařízení, z nichž žádná dvě by neměla být navzájem indiferentní, nastavit preferenční stupnici. Vlastnost uspořádání systému preferencí je nutným předpokladem pro možnost nastavit jednoznačnou preferenční stupnici. Preference a užitek jsou individuální a pro účely modelu jsou vnímány z pohledu domácnosti jako celku.

6.3.2 Preference a užitek

Rozhodování o využití stanoveného množství elektrické energie v rámci inteligentní domácnosti za různých rozhodovacích podmínek je klíčové pro vytvoření modelu domácnosti. Mechanismus by měl odpovídat optimalizaci efektu spotřeby elektrické energie podle očekávaného systému preferencí nastaveného individuálně pro zařízení užívaných danou domácností. Preference je v této práci charakterizována pomocí hodnotícího systému užitku s vazbou k použití konkrétního zařízení. Preferenční systém je pak možné vyjádřit v podobě preferenční funkce, která stanovuje míru užitku z pohledu domácnosti.

Základní práce v oblasti teorie užitku [69], [70] a [71] dokazují, že pro každého rozhodovatele je možné stanovit preferenční systém, platný v určitém časovém intervalu a vztahující se k na určitou oblast rozhodování konkrétního subjektu. Jak dokázali autoři ve své práci [71], rozhodovatel se řídí při své rozhodovací strategii podle očekávaných efektů na základě svého individuálního preferenčního systému. Preferenční systém pak odráží postoj domácnosti k různým stavům, které mohou jako důsledek vlastního rozhodování nastat, a to včetně nejistoty, která je jednou z možných alternativ v procesu rozhodování. Preferenční systém je realizován prostřednictvím preferenčních funkcí pro jednotlivá zařízení.

Preferenční funkce je koncipována pro každý typ zařízení připojený do nn rozvodů domácnosti a vyžadující ke své činnosti elektrickou energii. Každá takováto preferenční funkce představuje charakteristický pohled na užití daného zařízení v čase z pohledu přínosu funkčnosti zařízení pro domácnost. Tato funkce by měla být pro daný typ zařízení charakteristická a mít možnost individualizace na základě parametrů.

Preference definují výběr důležitosti spotřebitele při využití elektrické energie v rámci konkrétního OM. Jedná se o přiřazení významu k jednotlivým spotřebičům při rozhodování, který spotřebič je upřednostňován v okamžiku vícenásobné poptávky v případě, že zdroje jsou omezeny.

Spotřebitel by měl být schopen stanovit své upřednostnění jednotlivých spotřebičů z pohledu významu jeho užití v čase v rámci odběrného místa.

6.3.3 Zavedení preferenčního systému

Preference je definována pro každou dvojici rozhodování (ω_1, ω_2) tak, že určuje, zda je preferováno ω_1 proti ω_2 nebo ω_2 proti ω_1 nebo zda je mezi ω_1 a ω_2 indiferentní vztah, tj. je lhostejné, jestli nastane ω_1 nebo ω_2 [71], [72]. Systém preferencí lze pak popsat relacemi v dané množině.

Binární relací v dané množině X je vztah, který platí pro uspořádané dvojice (x_1, x_2) , $x_1, x_2 \in X$. Binární relace R mezi prvky x_1 a x_2 je pak označena $x_1 R x_2$. Binární relace R v množině X je tranzitivní, právě když z platnosti vztahů $x_1 R x_2$ a $x_2 R x_3$ plyne platnost vztahu $x_1 R x_3$ pro každou trojici x_1, x_2 a x_3 , kde $x_1, x_2, x_3 \in X$. Relace R v množině X se nazývá totální uspořádání v X , když R je totální a zároveň tranzitivní relace v X [67]. Libovolná totální relace nad konečnou množinou X , která je tranzitivní, představuje preferenční stupnici [71].

Uspořádáním na množině X je nazývána taková binární relace R na X , která je reflexivní, tranzitivní a antisymetrická [73]. Množina X společně s uspořádáním \leq vytváří uspořádanou množinu $\langle X, \leq \rangle$. Pro účely modelu, kdy může nastat situace srovnatelné preference mezi dvěma zařízeními, je uvažována pouze uspořádaná množina (nikoliv úplné ostré uspořádání). Podmínkou je, aby tato relace byl reflexivní, tranzitivní a antisymetrická.

Konkrétní zařízení splňující DEFINICI 6-1 je označeno a_i , kde i je přirozené číslo ($i \in \mathbb{N}$) reprezentující unikátní index. Množina zařízení A je pak neprázdná množina všech zařízení zapojená do nn rozvodů domácnosti. Preference jsou představovány relací uspořádání na množině zařízení A . Relace uspořádání je označena symbolem $>$. Výraz $a_1, a_2 \in A$; $a_1 > a_2$ představuje, že zařízení a_1 má pro domácnost větší preferenci než zařízení a_2 , tj. v daném okamžiku, kdyby se rozdělovalo omezené množství elektrické energie, může tuto energii konzumovat pouze spotřebič a_1 .

Jestliže domácnost je schopna definovat nad konečnou množinou zařízení A takové uspořádání zařízení odpovídající podmínkám $a_1 < a_2$; $a_2 < a_3$, pak tato srovnání umožňují sestavit škálu preferenčního systému. Z důvodu logiky navrhovaného modelu, kdy je účelné definovat vzájemné preference mezi jednotlivými zařízeními, je relace R chápána jako binární relace nad množinou A , kdy lze vzájemně srovnávat jednotlivá zařízení v čase vzniku požadavku na jejich provoz. Binární relaci R pak lze definovat jako kartézský součin na množině A následujícím způsobem:

$$R \subseteq A \times A, \langle a_1, a_2 \rangle \in R \quad (6-5).$$

Na množině zařízení $A = \{a_i\}, i \in \mathbb{N}$ lze každému zařízení a_i přiřadit jeho preferenci na základě předchozího odvození. Preferenční funkce pak přiřazuje preferenční hodnotu v podobě reálného čísla takovou, která zohledňuje jeho míru užítka pro domácnost. Preferenční hodnota se může v čase měnit, proto je definován pro každý časový interval h vlastní systém preferenci

$$U_t = \{U_{h,i}\}; h = \langle t_k, t_l \rangle; t_k, t_l \in T, k < l, i, k, l \in \mathbb{N} \quad (6-6),$$

kde i je unikátní index reprezentující pořadí prvku a_i v uspořádané množině A , T pak reprezentuje časovou množinu.

V čase může docházet ke změně vlastností aktivních zařízení $A_t = \{a_j\}, A_t \subset A$. Aktivní zařízení je definováno jako zařízení se schopností dodávat elektrickou energii takové, že platí $a_j \in P, P \subset A$ (DEFINICE 2, kapitola 5.2).

Preferenční funkce reprezentuje zobrazení $u: U_t \rightarrow \mathbb{R}$. Aby bylo možné provádět srovnání významu jednotlivých zařízení s ohledem na konkrétní časový interval, kdy zařízení poptává elektrickou energii. Pak jednotlivé preferenční funkce mají obecný tvar

$$u_i(t) = f(t, x_1, \dots, x_m) \quad (6-7),$$

kde \mathbf{x}_i představují parametry funkce f takové, které charakterizují užitek daného zařízení \mathbf{a}_i .

Užitek je reprezentován pomocí zobrazení \mathbf{u} , které každému $x \in X$ přiřadí číselnou hodnotu $u(x) \in \mathbb{R}$ [70]. Důvodem použité této vlastnosti je nutnost reprezentovat preferenční model číselnou hodnotou pro výpočet a následnou interpretaci v rozhodovacích algoritmech.

Vlastností zobrazení \mathbf{u} je $u(x_m) > u(x_n)$ právě když $x_m \succ x_n$, přičemž $x_i \in X$; $u(x_i) \in \mathbb{R}$; $i = 1, 2, \dots, k$. Předpokládejme, že prostor \mathbf{E} má právě k prvků ($|E| = k$), přičemž \mathbf{E} je dán výčtem svých prvků $E = \{e_1, e_2, \dots, e_k\}$, pak na tomto prostoru $E \subseteq \Omega$ lze zvolit očíslování elementárních výsledků tak, že vytvoří sestupnou škálu o k členech

$$e_1 \succeq e_2 \succeq \dots \succeq e_k \quad (6-8),$$

ve smyslu relace slabé preference [71].

Domácnost, kterou považujeme za racionálně se rozhodující, bude subjektivně hodnotit jednotlivá zařízení podle některé preferenční stupnice dané binární relací \mathbf{R} . Jak je uvedeno výše, tato relace určuje preferenční stupnici v případě, že výsledky představují uspořádanou množinu. Nepředpokládáme, že existuje pouze, a právě jedna relace $R \subseteq A \times A$, $\langle a_1, a_2 \rangle \in \mathbb{R}$, která by určovala na stejné množině \mathbf{A} identické uspořádání pro jinou domácnost v případě, že nebyla zvolena identická preferenční stupnice.

Je-li k počet zařízení a je-li množina zařízení \mathbf{A} , pak můžeme definovat uspořádanou k -tici (s_1, s_2, \dots, s_k) , takovou, že jednotlivé prvky s_i , $i \in I$ představují stav zařízení \mathbf{a}_i v časovém intervalu \mathbf{t} , označujeme symbolicky:

$$a_j(t) \mapsto s_j(t) \quad (6-9).$$

Pak stav zařízení je definován:

$$s_i(t) = \begin{cases} 1, \text{pokud } a_i(t) \text{ je spotřebitel elektrické energie} \\ -1, \text{pokud } a_i(t) \text{ je zdroj elektrické energie} \\ 0, \text{v ostatních případech} \end{cases} \quad (6-10).$$

Jelikož pro model není podstatný jmenovitý výčet zařízení reprezentovaný množinou \mathbf{A} , a zároveň množina \mathbf{A} je uspořádaná množina prvků \mathbf{a}_i podle unikátního indexu, lze unikátní index i prvků množiny \mathbf{A} použít pro zjednodušenou reprezentaci množiny zařízení pouze prostřednictvím množiny indexů $I = \{0, 1, 2, \dots, k\}$, kde celkový počet zařízení je označeno k , pak tato množina I reprezentuje množinu prvních k přirozených čísel a zároveň reprezentuje jednotlivá zařízení shodně s množinou \mathbf{A} . Množina \mathbf{A} slouží jako identifikační výčet zařízení \mathbf{a}_i zapojené do nn rozvodů

domácnosti a zahrnuté do modelu na úrovni popisných atributů pro lepší identifikaci a reprezentaci jednotlivých zařízení.

6.3.4 Čas a časová preference

Časová osa představuje jeden ze základních prvků modelu a je reprezentována jako množina definována prostřednictvím hodnot z intervalu následovně

$$T = \{t: 0 \leq t \leq T_p\} \quad (6-11),$$

kde jednotlivé prvky představují reálná čísla $t \in \mathbb{R}$ a T_p je maximální hodnota.

Cílem je vybrat z konečné množiny A takové prvky, které podle relace uspořádání \preceq seřadí prvky $a_i \in A$ podle číselného ohodnocení preferenční funkce $u_{it}(a_i)$ takové, že $a_i \preceq a_j$ když platí pouze nerovnice

$$u_{it}(a_i) \leq u_{jt}(a_j). \quad (6-12)$$

V každém okamžiku se přiřazuje dostupná elektrická energie těm spotřebičům (zařízením), které o ni žádají, tj. u nich platí podmínka: $s_t(i) = 1$ (viz rovnice (6-10)). Model musí přiřadit elektrickou energii žádajícím zařízením anebo realizovat výběr takových zařízení, jejichž funkčnost má pro domácnost nejvyšší užitnou hodnotu v okamžiku, kdy žádají o přiřazení elektrické energie.

Pokud preference alternativ výběru zařízení, kterým bude v dané časové periodě garantována dodávka elektrické energie závisí na více faktorech, pak předpokladem je, že každá taková preferenční funkce může být zapsána jako součet všech preferenčních funkcí přiřazených jednotlivým komponentám:

$$x(x_1, x_2), \text{ pak platí } u(x) = u_1(x_1) + u_2(x_2) \quad (6-13).$$

Vektor preferencí $U(x) = (u_1(x_1), u_2(x_2))$ takový, že $(x_1, x_2) \preceq (y_1, y_2)$, pouze když platí $[u_1(x_1) < u_2(y_1)]$ nebo $[u_1(x_1) = u_1(y_1) \text{ a } u_2(x_2) \leq u_2(y_2)]$ [71].

Při tomto předpokladu lze čas pokládat za preferenční funkci takovou, která každému časovému okamžiku $t_i, t_j \in T$ přiřadí ostré uspořádání $t_i < t_j$ na množině T právě, když platí $u(t_i) < u(t_j)$.

Tím lze odvodit závěr, že pro čas t jako samostatný faktor vstupující do rozhodování nemusíme definovat vlastní preferenční funkci, neboť v uvedeném případě má množina T ostré uspořádání [67].

Odběr elektrické energie z pohledu domácnosti (residenční segment) má periodickou charakteristik odběru s periodou časové řady $T_p = 24 \text{ hod}$ (viz. [74] a [75]). Na základě této skutečnosti lze formulovat následující předpoklad:

DEFINICE 6-2. Bude-li v čase τ preferován prvek a_i oproti prvku a_j ($a_i \succcurlyeq a_j$), pak při nezměněných podmínkách bude zachována preference prvku a_i oproti a_j v čase $\tau + T_p$, kde $T_p = 24 \text{ hod.}$. Platí tedy vztah

$$\tau = \tau + T_p \rightarrow u_\tau(a_i) = u_{\tau+T_p}(a_i) \quad (6-14).$$

Časová sekvence je reprezentována množinou X , která představuje nekonečnou množinu časových bodů vymezený podmínkou $0 \leq t \leq T_p$, kde T_p je vnímána jako délka periody. Toto vymezení představuje nekonečnou množinu reálných čísel reprezentující jednotlivé časové okamžiky.

6.4 PŘEDPOKLADY MODELU

Pro jednoznačné vymezení modelu a jeho chování je nutné stanovit předpoklady jeho chování, a to jak z pohledu vnitřních iterací modelu, tak především vymezení okolí modelu, se kterým je model propojen prostřednictvím unikátního předávacího místa.

Charakteristiky modelu:

- Model se skládá z prvků, které spotřebovávají anebo produkují elektrickou energii;
- Prvky jsou do nn rozvodů připojeny stávajícími technickými prostředky;
- Pro distribuci elektrické energie se v inteligentní síti domácnosti používá nn rozvodů;
- Rozvod nn v rámci inteligentní sítě domácnosti lze pokládat za bezztrátový (úbytek proudu a napětí se blíží nule a nemá vliv na funkčnost zapojených zařízení);
- Cílem modelu je podpořit optimalizaci rozhodnutí týkající se využití elektrické energie v čase;
- Datová komunikace je nezávislá na způsobu distribuce elektrické energie v rámci inteligentní sítě domácnosti a může probíhat na nezávislém přenosovém médiu, než jsou nn rozvody;
- Komunikační protokol a médium zajišťuje dostatečnou kvalitu datového přenosu pro potřeby řídicí vrstvy architektury inteligentní sítě domácnosti;
- Zařízení připojené do inteligentní sítě domácnosti nebo jejich skupiny jsou zcela autonomní entity v rámci dané sítě.

Pro účely vymezení modelu je nutné definovat základní předpoklady pro chování okolí modelu tak, aby byla zajištěna stabilita modelu.

Předpoklady chování okolí modelu:

- Zatížení lokální distribuční sítě nemá vliv na domácnost;
- Externí dodávka z lokální distribuční sítě je nepřerušovaná v čase v odpovídajících parametrech;
- Kapacita dodávané elektrické energie z DS je definována prostřednictvím požadovaného příkonu;
- Domácnost může dodávat elektrickou energii do lokální distribuční soustavy v předávacím místě v souladu s požadavky Energetického zákona (č. 458/2000 Sb.).

6.5 NÁVRH MODELU

Jedním z předpokladů pro konstrukci modelu je, že lze stanovit preferenční model v čase, kdy zařízení žádají o elektrickou energii, takový, že umožní realizovat relaci uspořádání \succsim nad množinou všech zařízení zapojených do inteligentní domácnosti \mathbf{A} , takových, že platí $a_i \in S, S \subset A$. Časová dimenze nevyžaduje specifické řešení pro preferenční systém, jak je odvozeno v kapitole 6.3.4. Pro model je nutné definovat vhodný časový úsek v rámci, kterého budou jednotlivé požadavky vnímány jako jednotné a bude garantován celkový objem elektrické energie poskytované zdroji. Tato podmínka má význam pouze pro interní zdroje domácnosti, neboť externí dodávka elektrické energie je konstantní v rámci celé množiny \mathbf{T} , resp. v jednotlivých spojitých intervalech tak, jak jsou definovány množinou \mathbf{H} .

Aby bylo možné rozhodovat o přidělení elektrické energie nejenom v určitém časovém okamžiku $t \in T$, ale zajistit její přidělení po souvislý časový úsek, je výhodné množinu \mathbf{T} transformovat do množiny souvislých intervalů \mathbf{H} .

Jedním ze základních předpokladů modelu je, že zařízení, které žádalo v čase $t_x \in H_i$ o dodávku elektrické energie, má po celou dobu trvání intervalu $H_i = \langle t_i, t_{i+1} \rangle, t_i, t_{i+1} \in T$ garantovanou dodávku elektrické energie k zajištění požadovaného příkonu zařízení $p = \frac{dW}{dt} = \frac{ui}{dt}$ a to do konce intervalu H_i od okamžiku vzniku požadavku, resp. přiřazení dodávky elektrické energie. Požadavek na zajištění elektrické energie vzniká náhodně.

V kapitole 6.3.4 byla definována množina \mathbf{T} , reprezentující časovou osu na intervalu $0 \leq t \leq T_p$. Aby bylo možné rozhodovat o přidělení elektrické energie žádajícím zařízením nejenom v určitém časovém okamžiku $t \in T$, ale zajistit její přidělení po souvislý časový úsek, je v modelu množina \mathbf{T} nahrazena množinou \mathbf{H} reprezentující souvislé časové intervaly $H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$, pak jednotlivé intervaly definované $H_i = \langle t_{i-1}, t_i \rangle$:

$$\langle t_0, t_1 \rangle \cup \langle t_2, t_3 \rangle \cup \dots \cup \langle t_{n-1}, t_n \rangle, t \in \mathbb{R}, t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n, t_0 = 0, t_n = T_p \quad (6-15),$$

Interval $H_i = \langle t_{i-1}, t_i \rangle$ má délku intervalu $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$.

S přihlédnutím ke skutečnosti, že technické omezení dané způsobem účtování elektrické energie neumožňuje pracovat s individualizovaným přístupem v závislosti na časový okamžik skutečné spotřeby. Význam pro konstrukci modelu má stanovení takové délky dílčích intervalů, které mají technický i praktický význam k naplnění charakteristiky modelu. Pak časová množina je definována jako množina spojitých časových intervalů $H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$.

Teoreticky může každý dílčí interval nabývat různé délky. Pro zjednodušení bude celý časový interval $\langle 0, T_p \rangle$ reprezentující prvky množiny \mathbf{T} rozdělen na určitý počet intervalů p o stejné délce:

$$\Delta t = \frac{T_p}{p} = konst. \quad (6-16).$$

Výše odvozený přístup k zajištění časové kontinuity předpokládá, že budou definovaná pravidla chování modelu ke vzniku dílčí požadavků jednotlivých zařízení na dodávku elektrické energie podle daných podmínek chování modelu.

Chování modelu:

- Žádosti mohou vznikat náhodně v průběhu daného intervalu;
- Žádost je posuzována v časovém intervalu, kdy vznikla;
- Zařízení, kterému je elektrická energie přidělena, je po dobu tohoto intervalu garantována;
- Pokud zařízení vyžaduje dodávku elektrické energie v následujícím časovém intervalu, musí znovu žádat o dodávku;
- Každá žádost je posuzována z pohledu dostupné kapacity v rámci dodávky elektrické energie dostupné v časovém intervalu;
- Musí být zajištěna vyrovnaná bilance poptávky a nabídky (bilanční rovnice) v daném okamžiku;
- Domácnost je schopna definovat individuální preference / užitečnost jednotlivých zařízení v čase;
- Interní zdroj dodává elektrickou energii kontinuálně v průběhu celého časového intervalu;
- Hodnota preferenční funkce je shodná v průběhu celého intervalu.

6.5.1 Nabídka a poptávka

Celková poptávka všech zařízení zapojených do SG sítě domácnosti v čase t je definována jako agregovaná poptávka po elektrické energii od jednotlivých zařízení:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \quad (6-17),$$

kde $q_i(t)$ je individuální požadavek i -tého zařízení (spotřebiče) $a_i \in A \wedge a_i \in S: a_i \mapsto q_i$ v čase t , právě když $s_i(t) = 1$ (rovnice (6-10)).

Obdobně je definována celková nabídka od jednotlivých prvků zajišťující výrobu elektrické energie na úrovni domácnosti:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t) \quad (6-18),$$

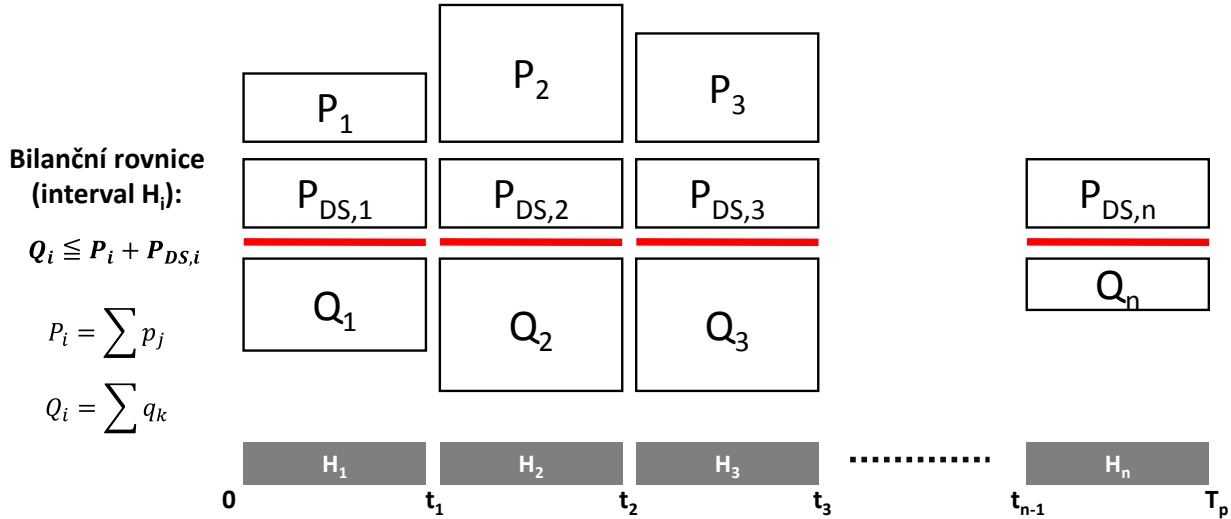
kde $p_i(t)$ je individuální nabídka i -tého zařízení (dodavatele) $a_i \in A \wedge a_i \in P: a_i \mapsto p_i$ v čase t , právě když $s_i(t) = -1$ (rovnice (6-10)).

Bilanční rovnice je pak definována:

$$Q(t) \leq P(t) + P_{DS}(t) \quad (6-19),$$

kde $P_{DS}(t)$ je celková dodávka z DS limitována požadovaným příkonem domácnosti. Odběrné místo je definováno jako zařízení zapojené do inteligentní sítě domácnosti v souladu s DEFINICE 2 (kapitola 5.2), které je definováno $a_i \in P$.

Reprezentace bilanční rovnice pro jednotlivé intervaly je zobrazeno na Obr. 12



Obr. 12 Rozložení časových intervalů

Navržený model vychází z rovnovážného stavu mezi nabídkou a poptávkou po elektrické energii na úrovni vymezení modelu (viz. DEFINICE 2). Elektrická energie nereprezentuje v modelu množstevně neomezenou komoditu, ale má limity v podobě požadovaného příkonu jako garantované výše elektrické energie dodávané z lokální distribuční soustavy a interních zdrojů modelu na straně nabídky a zároveň přístroje zapojené do sítě, představující stranu poptávky. Jak je odvozeno v kapitole 6.3.3, pro rozhodovací mechanismy jsou použity preferenční funkce, které oproti ceně komodity představují objektivnější pohled na význam (užitek) jednotlivých zařízení pro domácnost.

Optimální využití zařízení při zohlednění odloženého startu a přerušení funkčnosti přepočtený na intervaly lze odvodit na základě celkového požadavku na dodávku elektrické energie a průměrného požadavku daného zařízení v rámci všech intervalů, kdy zařízení bylo buď ve stavu „Čekající“ nebo „Probíhající“.

Celkový požadavek i -tého zařízení na dodávku elektrické energie o příkonu q_i , reprezentovaného dílčími požadavky v rámci jednotlivých intervalů H , představující dobu funkčnosti zařízení (T_F), lze definovat jako součet všech dílčích požadavků během jednotlivých intervalů funkčnosti zařízení:

$$Q_i(t) = \sum_H q_i \quad (6-20).$$

Průměrný požadavek během doby funkčnosti zařízení (T_F), včetně odloženého startu a přerušené funkčnosti, definujeme

$$\bar{Q}_i = \frac{1}{T_F} \sum_H q_i(t) \quad (6-21).$$

Míru nerovnoměrnosti požadavků na elektrickou energii lze vyjádřit směrodatnou odchylkou celkového požadavku $Q_i(t)$ od průměrného požadavku \bar{Q}_i následovně:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_F} \int_0^{T_F} (Q_i(t) - \bar{Q}_i)^2 dt &= \frac{1}{T_F} \int_0^{T_F} (Q_i(t))^2 dt - \frac{2\bar{Q}_i}{T_F} \int_0^{T_F} Q_i(t) dt + \bar{Q}_i^2 = \\ &= \frac{1}{T_F} \int_0^{T_F} (Q_i(t))^2 dt - \bar{Q}_i^2 \end{aligned} \quad (6-22).$$

Potom optimalizace využití zařízení v průběhu doby funkčnosti zařízení T_F představuje požadavek na určení minimální hodnoty integrálu:

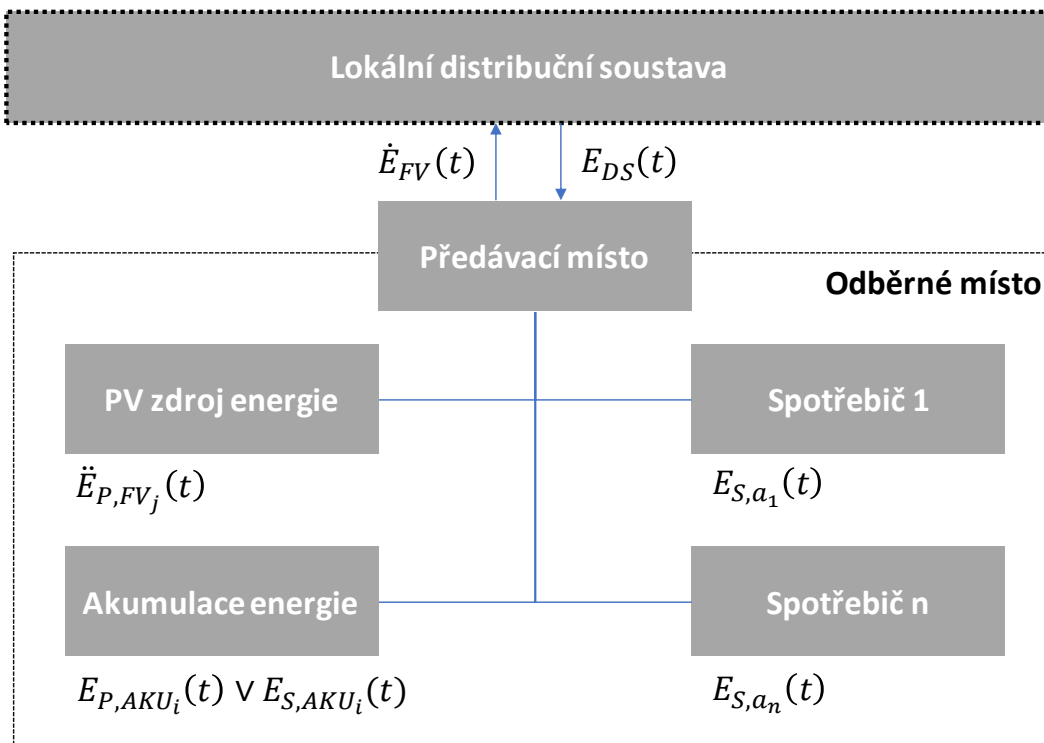
$$\int_0^{T_F} (Q_i(t))^2 dt \quad (6-23).$$

6.5.2 Energetický model

Systémový koncept energetického modelu vymezuje tok energie mezi jednotlivými prvky uvnitř domácnosti. Pro úvodní úvahy je definován zdroj energie, která je dodávána z lokální distribuční soustavy (LDS) a je reprezentována $E_{DS}(t)$. Dále pak zahrnuje zařízení pro akumulaci energie (např. akumulátor), které umožňuje uložení energie a v případě potřeby je pak schopno energii zpět dodávat do inteligentní sítě. Toto zařízení představuje zařízení typu spotřebič v okamžiku, kdy dochází k ukládání energie. Zároveň umožňuje akumulovanou energii do modelu dodávat jako zdroj. Zařízení pro akumulaci energie se může nacházet pouze, a právě v jednom režimu, které se vzájemně vylučují (spotřebič anebo zdroj). Tento fakt je reprezentován příslušným tokem energie $E_{P,BAT_i}(t)$ v $E_{S,BAT_i}(t)$. Vlastním zdrojem energie v rámci OM je pak PV zdroj energie, který dodává energii do modelu $\ddot{E}_{P,FV_j}(t)$. V případě, že lze dodávat energii do LDS, je tato energie reprezentována jako $\dot{E}_{FV}(t)$. Pro naplnění podmínky zákona [2] musí však platit podmínky zákona, že celkové množství dodávané elektrické energie do LDS je součtem jednotlivých FV zdrojů instalovaných v modelu jako:

$$\dot{E}_{PV}(t) \cong \ddot{E}_{S,PV_j}(t) \quad (6-24).$$

Energie z PV zdroje anebo z LDS může být ukládána do zařízení s funkcí akumulace. Model nezohledňuje optimalizaci využívání energie. Schematicky je model zobrazen na Obr. 13.



Obr. 13 Systémový koncept energetického modelu, upraveno podle [43]

Koncept energetického modelu vychází z definice toku elektrické energie v rámci inteligentní domácnosti mezi jednotlivými zdroji a spotřebiči. Základní definice stanovuje celkovou energii zdroje v rámci modelu jako součet energií z tohoto zdroje za jednotlivé časové okamžiky, kdy zdroj energii dodává v intervalu $[t_1, t_2]$ pomocí rovnice [76]:

$$E_P(t_1, t_2) = \sum_{t_1 \leq t \leq t_2} E_P(t) \quad (6-25),$$

kde $E_P(t)$ reprezentuje objem energie v intervalu $[t_1, t_2]$.

Pokud do modelu zapojeno několik zdrojů, je celková energie určena vztahem

$$E_{P,TOTAL}(t_1, t_2) = \sum_{i \in P} \sum_{t_1 \leq t \leq t_2} E_{P,i}(t) \quad (6-26),$$

kde P reprezentuje množinu všech zdrojů zapojených do modelu.

Obecná definice energie získaná v časovém intervalu $[t_1, t_2]$ je reprezentována rovnicí

$$E_P(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (6-27),$$

kde $P(t)$ je práce vykonaná s využitím energie dodané v intervalu $[t_1, t_2]$.

V rámci modelu musí platit podmínka rovnováhy:

$$\sum_{i \in P} E_{P,i}(t) \geq \sum_{j \in S} E_{S,j}(t) \quad (6-28).$$

Příkon všech zařízení je definován jako prostý součet příkonů jednotlivých aktivně užívaných zařízení, pro které platí $a_i \in A \wedge a_i \in S$:

$$P = \sum_{k=1}^{|S|} P_k \quad (6-30).$$

V rámci modelu je definován zůstatek energie jako nespotřebovaná elektrická energie od jednotlivých zdrojů zapojených v do energetické vrstvy modelu následovně:

$$E_{Zůst} = \sum_{i \in P} E_{P,i}(t) - \sum_{j \in S} E_{S,j}(t) \quad (6-31).$$

6.6 KATEGORIE ZAŘÍZENÍ

Jednotlivá zařízení domácnosti, která jsou zahrnuta do modelu, jsou reprezentována množinou **A** (DEFINICE 6-1, kapitola 6.2). Jedná se o taková zařízení, která mají prostředky pro současné připojení jak do energetické vrstvy modelu, tak do komunikační vrstvy modelu. Zařazením zařízení do kategorií podle vlastností daných zařízení z pohledu tvorby užitečnou hodnotu a určují preferenční systém.

V rámci modelu je vymezena funkčnost zařízení pomocí následujících pojmů:

Časový slot – jedná se o časový interval, během něhož je zařízení funkční a je mu garantována elektrická energie bez přerušení do konce intervalu H_i . V průběhu intervalu H_i může dojít k vypnutí zařízení, popř. dojde k dokončení jeho požadované funkce a dojde ke změně stavu ZAPNUTO / VYPNUTO.

Doba funkčnosti zařízení – celkové množství času požadované k dokončení funkčnosti zařízení. Doba obsluhy zařízení může být delší, než je časový interval H_i , ve kterém bylo zařízení uvedeno do provozu.

Čekací doba zařízení – je množství času, po kterém čeká zařízení na opětovné uvedení do chodu. Čeká na dokončení své funkčnosti.

Čekající – jedná se o stav zařízení, kdy je dočasně pozastavena jeho činnost, dokud nebude mít zajištěnou elektrickou energii pro dokončení své činnosti (obvykle do konce časového intervalu H_i , kdy mu byla systémem elektrická energie přidělena).

Probíhající – jedná se o stav zařízení, kdy je zařízení uvedeno do chodu (je funkční).

Start funkčnosti zařízení je představováno okamžikem, kdy začne odbírat elektrickou energii (dojde ke změně stavu VYPNUTO/ZAPNUTO).

Ukončení funkčnosti zařízení je charakterizován okamžikem, kdy přestane odebírat elektrickou energii (dojde ke změně stavu ZAPNUTO/VYPNUTO).

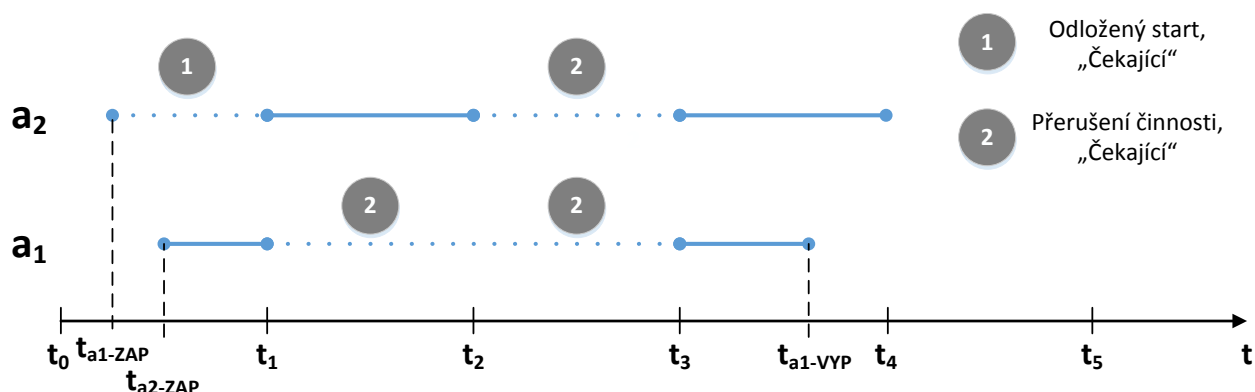
Zařízení je funkční, pokud vykonává svou činnost, při níž dochází k přeměně elektrické energie na užitečnou hodnotu pro domácnost. To je reprezentováno stavem „Probíhající“.

Možnost systému pro přístup k zařízením $a_i \in S$ lze rozlišit podle následujících kritérií:

- **Spotřebič s možností odloženého startu**, může být ve stavu „Čekající“ aniž by byl ve stavu „Probíhající“.
- **Spotřebič s možností přerušení činnosti**, ze stavu „Probíhající“ může přejít do stavu „Čekající“.

Obě uvedená kritéria mohou platit souběžně pro konkrétní zařízení.

Schématicky je chování zařízení ukázáno na Obr. 14.



Obr. 14 Funkční cyklus zařízení

Časová osa je rozdělena na jednotlivé intervaly $H_1 = \langle t_0, t_1 \rangle, H_2 = \langle t_1, t_2 \rangle, H_3 = \langle t_2, t_3 \rangle$ a $H_4 = \langle t_3, t_4 \rangle$. Zařízení $a_1 \in A$ žádá o garantovanou dodávku elektrické energie ve výši $q_1(t_{a1-ZAP})$ v čase $t_{a1-ZAP} \in H_1$ a je mu na základě vyhodnocení preferenčního schématu přiřazena do konce intervalu H_1 . Zařízení a_1 může přerušit svoji činnost. V souladu s definovanými vlastnostmi chování systému, na začátku intervalu H_2 opět žádá, ale není mu elektrická energie přiřazena, přechází do stavu „Čekající“, do začátku některého z následujících intervalů, kdy bude preferenčním systémem vyhodnocena jako prioritní. Na začátku intervalu H_4 přechází do stavu „Probíhající“ a ukončí svou činnost v čase $t_{a1-VYP} \in H_4$.

Zařízení $a_2 \in A$ žádá o garantovanou dodávku elektrické energie ve výši $q_2(t_{a2-ZAP})$ v čase $t_{a2-ZAP} \in H_1$, ale není mu na základě vyhodnocení preferenčního schématu přiřazena. Zařízení a_1 může odložit svůj start do okamžiku, kdy je preferenčním systémem vyhodnoceno jako prioritní. Tento okamžik nastává na se začátkem intervalu $H_2 = \langle t_1, t_2 \rangle$. V rámci intervalu $H_3 = \langle t_2, t_3 \rangle$ došlo k přerušení jeho činnosti a přechází do stavu „Čekající“. Na začátku intervalu $H_4 = \langle t_3, t_4 \rangle$, kdy je opět vyhodnoceno jako prioritní, přechází do stavu „Probíhající“ a dokončí svoji činnost v čase t_4 .

Preferenční funkce by měla zohledňovat odložený start i přerušenu funkčnost s cílem zajistit rovný přístup zařízení ke zdrojům. Zohlednění by mělo reflektovat skutečnost, že čekací doba zařízení je delší, než je délka intervalu, tj. podmínku $t_{čekání} > \Delta t$. Požadavek na systém lze formulovat jako nutnost zajistit růst významu zařízení ve stavu „Čekající“ oproti ostatním žádajícím zařízením na základě hodnoty původní preferenční funkce čekajícího zařízení. Zařízení s možností odloženého startu by měla být zvýhodněna zvýšeným užitekem v následujícím intervalu. Stejným způsobem by mělo být postupováno u zařízeních s možností přerušení funkčnosti.

Požadavek na zajištění růstu hodnoty preferenční funkce lze definovat následovně:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} u(n) = \infty \quad (6-32),$$

kde n reprezentuje počet časových intervalů, kdy zařízení je ve stavu „Čekající“.

Pro zajištění požadavku růst je vhodná reprezentace pomocí geometrické řady:

$$s(n) = x_1 \frac{q^n - 1}{q - 1}, \text{ pro } q \neq 0, x_1 \neq 0 \quad (6-33),$$

kde x_1 je první prvek geometrické řady a q je kvocient geometrické posloupnosti. Pro potřeby zvyšování hodnoty preferenční funkce má význam stanoven hodnoty koeficientu q . Hodnota x_1 je nahrazena hodnotou preferenční funkcí určenou v intervalu, kdy zařízení žádalo o elektrickou energii a bylo uvedeno do stavu „Čekající“. Hodnota indexu n reprezentuje počet intervalů od přerušené funkčnosti nebo odložené funkčnosti.

6.6.1 Zdroj elektrické energie

Jedná se o zařízení, které produkují elektrickou energii požadovaných parametrů. Jedná se o takové prvky, pro které platí:

$$a_i \in A \wedge a_i \in P; P \subset A: a_i \mapsto p_i \wedge a_i \mapsto s_i(t) = -1 \quad (6-34).$$

Prvky splňující podmínku (6-14) představuje v modelu stranu nabídky v průběhu celého intervalu $t \in H_i$. Všechna tato zařízení jsou schopna dodávat elektrickou energii do nn rozvodů inteligentní domácnosti.

V modelu jsou rozlišeny následující typy zdrojů:

1. **Interní zdroj.** Jedná se jak o interní zdroje elektrické energie ve výlučné správě domácnosti, která rozhoduje o jejich využívání nezávisle na lokální DS.
2. **Externí zdroj.** Reprezentovaný předávacím místem, jako místem styku mezi distribuční soustavou a zařízením uživatele distribuční soustavy, kde elektřina do ní vstupuje nebo z ní vystupuje.

Interní zdroj má v čase proměnnou charakteristiku výkonu. V rámci daného intervalu je pevně stanovena a konstantní. Externí zdroj má pak konstantní charakteristiku výkonu v čase v souladu s chováním okolí modelu (kapitola 6.4).

Zdroje dodávají elektrickou energii do nn rozvodů domácnosti (energetická vrstva modelu). Pro účely výměny dat využívají komunikační vrstvu modelu.

Pro zdroje nebude stanovena preferenční funkci. Využití zdrojů upřednostňuje systémově interní zdroje oproti externím, tj. nejprve se v modelu uplatňují nabídky interních zdrojů.

6.6.2 Zařízení pro akumulaci elektrické energie

Jedná se o hybridní prvek, který je schopen zajistit v daném intervalu H_i právě funkci zdroje anebo spotřebiče. Obvykle se jedná o akumulátory se schopností ukládat a spotřebovávat energii v čase, kdy ji domácnost potřebuje například v okamžiku, kdy kapacita OZE je nedostatečná pro uspokojení

poptávky ostatních zařízení. Akumulátor je definován jako zásobník elektrické energie. Ostatní technologie využívané pro akumulaci elektrické energie jsou finančně a technologicky náročné. Z těchto důvodů nemají uplatnění pro použití v domácnosti. Tyto technologie jsou popsány například v [77], popř. [78].

Hybridní prvky jsou schopny v čase měnit svoji charakteristiku z pohledu strany nabídky a poptávky. Omezením tohoto faktu lze charakterizovat příslušným stavem prvku podle (6-10), kapitola 6.3.3.

Zapojení akumulačního zařízení do domácnosti s instalovanou fotovoltaickou elektrárnou vytváří konfiguraci ostrovního, nezávislého systému, kde je zajištěno dostupnost elektrické energie při výpadku dodávky z LDS. S ohledem na fakt, že OZE zdroje jsou závislé na lokálních klimatických podmínkách, které vykazují určitý stupeň nejistoty, zapojením akumulačního zařízení dochází ke zvýšení efektivity využívání elektrické energie. Pro účely akumulace mohou být využity i elektromobily připojené do domácí sítě (např. typu PEV). Za předpokladu, že technologicky umožní ukládat elektrickou energii a následně ji dodávat zpět do domácnosti v případě potřeby.

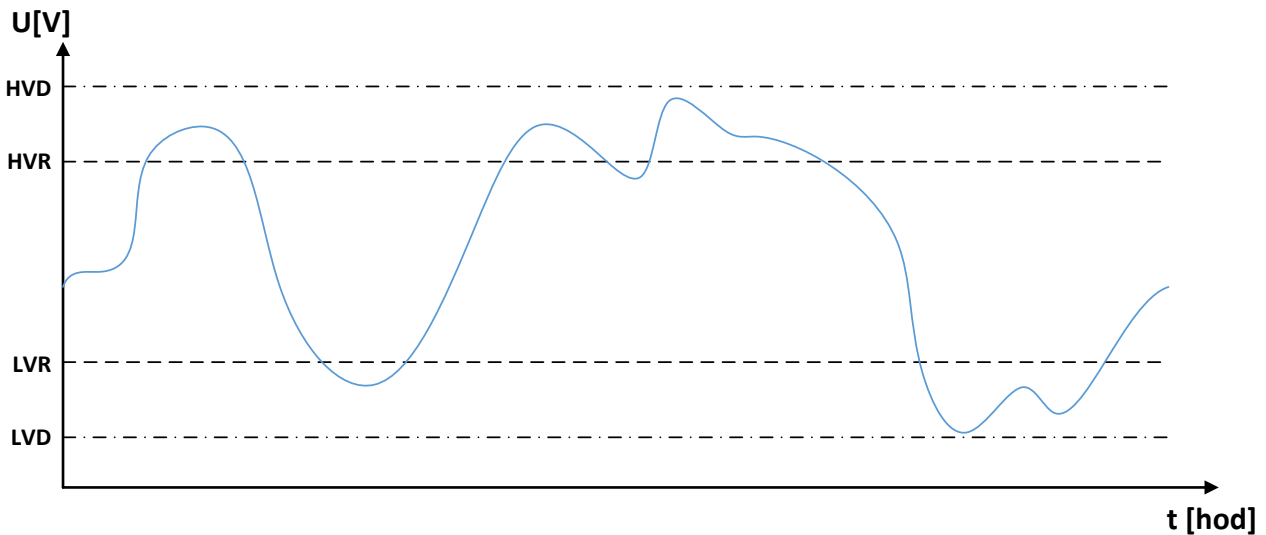
Pro stanovení preferenční funkce jsou použity obecné principy využívající následujících prahových hodnot napětí [79]:

- **HVD** (High Voltage Disconnect), kdy je ukončeno nabíjení.
- **LDV** (Low Voltage Disconnect), kdy je zastaveno zpětné dodávání elektrické energie z akumulátoru (tzv. vybíjení).
- **HVR** (High Voltage Reconnect), prahová hodnota napětí stanovující limit pro zotavení nutný pro následné připojení akumulátoru k fázi dodávání elektrické energie.
- **LVR** (Low Voltage Reconnect), prahová hodnota napětí stanovující limit pro zotavení nutný pro následné připojení akumulátoru k fázi nabíjení.

Jednotlivé prahové hodnoty vycházejí z vybíjecích a nabíjecích charakteristik akumulátorů. Nabíjení akumulátoru je charakterizováno jako dodávání množství energie do akumulátoru, které bude při následném vybíjení možno z něj odebrat do zátěže. Doba nabíjení akumulátoru je v modelu zahrnuta do preferenční funkce, která se v čase mění s ohledem na úroveň nabití akumulátoru. Model pracuje z časového pohledu v časových intervalech H_i , v nichž se mění preferenční funkce akumulátoru pouze v případě, že dojde k překročení prahové hodnoty LDV.

V modelu může být trvalé nabíjení akumulátoru realizováno prostřednictvím využití nespoteřované elektrické energie (rovnice (6-31), kapitola 6.5.2).

Průběh napětí akumulátoru s charakteristickými prahovými hodnotami ukazuje Obr. 15 (upraveno podle [79]).



Obr. 15 Princip prahových hodnot napětí pro regulaci akumulátoru

Chování zařízení pro akumulaci elektrické energie je v modelu charakterizováno těmito podmínkami:

if $a_i \mapsto s_i(t) = 1$ **then** $a_i \in A \wedge a_i \in S$; stav = "Nabíjení"

if $a_i \mapsto s_i(t) = -1$ **then** $a_i \in A \wedge a_i \in P$; stav = "Vybíjení"

if $a_i \mapsto s_i(t) = 0$ **then** $a_i \in A$; stav = "Zotavení"

Akumulační zařízení ve stavu „Nabíjení“ má definovanou preferenční funkci a chová se v systému jako regulérní spotřebič, tj. platí $a_i \in S$. V případě, že je ve stavu „Vybíjení“, jedná se o regulérní interní zdroj elektrické energie a není pro něj stanovena preferenční funkce. Nabíjecí charakteristiky konkrétního typu použitých článků mohou být využity pro stanovení preferenční (například podle [78]). Z nabíjecích charakteristik lze odvodit, že fáze nabíjení pro dosažení prahové hodnoty HVR může představovat časovou náročnost zahrnující několik intervalů H_i .

V modelu nebudeme uvažovat parametry akumulátorů jako je životnost v podobě počtu nabíjecích / vybíjecích cyklů. Ani jejich důsledek v podobě snížené kapacity. Kapacita je v modelu nahrazena funkcí nabídky $p_i(t)$, čímž dojde k omezení tohoto vlivu.

Přesné matematické modely pro běžné technologie akumulátorů jsou uvedeny v monografii [80].

6.6.3 Obecný spotřebič

Tato zařízení jsou charakteristickým reprezentantem následující podmínkou:

$$a_i \in A \wedge a_i \in S; S \subset A: a_i \mapsto q_i \wedge a_i \mapsto s_i(t) = 1 \quad (6-35).$$

Jedná se o zařízení představující poptávku na straně inteligentní sítě domácnosti.

Každé zařízení je reprezentováno jeho profilem (odběrnou křivkou), který reprezentuje průběh příkonu elektrické energie (odběru). Tato odběrná křivka je reprezentována v modelu velikostí požadavku q_j v intervalu H_i .

Pro každý zařzení umíme stanovit preference z pohledu jednotlivých spotřebičů zapojených do inteligentní sítě, resp. využívaných domácností v souladu s odvozením preferenčních schémat (kapitola 6.3.3).

Kritéria pro přístup k obecným spotřebičům reprezentuje možnost odloženého startu funkčnosti a možnost přerušování funkčnosti.

6.6.4 Vytápění, klimatizace a chlazení

Technologie vytápění, vzduchotechniku, ventilaci, klimatizaci a chlazení jsou zahrnuty pod zkratku HVAC (Heat, ventilation, air conditioner). Primárním cílem zařízení HVAC je zajistit komfortní prostředí. Technická řešení HVAC se podílejí na celkové energetické spotřebě domácnosti až 40 % z celkové spotřeby. Energetická spotřeba nezahrnuje pouze elektrickou energii, a to s ohledem na instalovaný systém vytápění. Současná řešení HVAC zahrnují vlastní řídicí systém. Z pohledu navrhovaného modelu, pro stanovení preferenční funkce jednotlivých zařízení HVAC, je použit jejich řídicí systém. Důvodem je, že řídicí systém je optimalizován a nastaven na potřeby konkrétních prostor včetně způsobu jejich využívání (časové charakteristiky, tepelný komfort, vlhkost vzduchu apod.) [81]. Z obecného požadavku modelu lze konstatovat, že v případě autonomních řešení postavených na HVAC technologiích, je definice zúžena na funkčnost zajišťující tepelný komfort na základě požadované teploty v prostoru domácnosti. Z tohoto důvodu je vhodné použít pro stanovení preferenční funkce výpočet vycházející z odvození teplotních charakteristik podle [82]¹:

$$T_{a_i}^{in}(t) = T_{a_i}^{in}(t-1) + \alpha (T_{a_i}^{out}(t) - T_{a_i}^{in}(t-1)) + \beta q_i(t) \quad (6-36),$$

kde pro prostor umístění zařízení a_i je $T_{a_i}^{in}(t)$ vnitřní teplota [°C] v čase t , $T_{a_i}^{out}(t)$ je vnější teplota [°C] v čase t . Parametry α , β jsou specifické teplotní charakteristiky zařízení a_i prostředí, ve kterém je zařízení a provozováno. Platí, $\beta > 0$, když zařízení a_i je topení a $\beta < 0$, když se jedná o chlazení.

Autor odvozuje teplotní charakteristiku prostoru, který je udržován na hodnotě teplotního komfortu HVAC zařízení a_i následovně:

$$T_{a_i}(t) = (1 - \alpha)^t T_{a_i}^{in}(0) + \sum_{\tau=1}^t (1 - \alpha)^{t-\tau} \alpha T_{a_i}^{out}(\tau) \quad (6-37),$$

kde $T_{a_i}^{in}(0)$ je vnitřní teplota v čase posunutém o 24 hodin zpět.

$$T_{a_i}^{in} = T_{a_i}(t) + \beta \sum_{\tau=1}^t (1 - \alpha)^{t-\tau} q_i(\tau) \quad (6-38),$$

kde $q_i(t)$ je poptávka zařízení a_i , v tomto případě se jedná o příkon HVAC zařízení a_i .

Uvedený model byl autory [83] [84] upraven pro výpočet užitkové funkce¹:

¹ Rovnice jsou upraveny v souladu s navrženou konvencí modelu inteligentní domácnosti.

$$u(a_i) = \sum_t U_{a_i} \left(T_{a_i}(t) + \beta \sum_{\tau=1}^t (1 - \alpha)^{t-\tau} q_i(\tau) \right) \quad (6-39),$$

kde U_{a_i} reprezentuje číselné vyjádření užítka domácnosti z funkčnosti zařízení a_i .

Pro potřeby modelu je navržena číselná hodnota užítka s využitím přirozené exponenciální funkce

$$U_{a_i} = e^n, k \in \mathbb{R}, n \geq 0 \quad (6-40),$$

kde n reprezentuje pořadové číslo časového intervalu H_i . Důvodem volby je zajištění organického růstu významu s ohledem na fakt, že vykazuje stejný procentní přírůstek. Tato vlastnost vhodně reprezentuje zřízení typu HVAC. Faktor významu teplotního komfortu, definovaného rovnicí (6-38), je zahrnut do vlastní rovnice (6-39).

6.6.5 Světelný zdroj

Osvětlení je v rámci modelu rozděleno do dvou kategorií v závislosti, zdali má osvětlovaný prostor přirozené osvětlení či nikoliv. V případě přirozeného osvětlení prostoru musíme zohledňovat faktor přirozeného východu a západu Slunce [85], [86].

Požadavky normy nerozlišují umělé a denní osvětlení [87]. Norma tak klade požadavky bez ohledu na zdroj světla. To vyžaduje při celkovém osvětlení zohledňovat kombinaci přirozeného a umělého světla. Denní složka světla se v čase blíží se k západu slunce ($t \rightarrow T_Z$) a po východu slunce ($t \rightarrow T_V$) má významný podíl nevyhovující denní složka, což zvyšuje preferenci v použití umělé složky osvětlení, tj. umělého světelného zdroje.

V současné době jsou normativně upraveny referenční hodnoty pro celý objekt, což podporuje využití navrženého modelu preferenčních funkcí využívaných i pro světelné zdroje. Norma právě s rostoucí složkou denního světla umožňuje snížení složky umělého osvětlení. Navržený model preferenční funkce nerozlišuje technickou realizovatelnost zvoleného způsobu osvětlení, ale je postaven na časové periodě rozlišující preference pro jednotlivé prostory, kdy lze aplikovat využívání denního světla. Tím je zachována jeho abstrakce pro účel využití v rámci řízení poptávky po elektrické energii v rámci inteligentní domácnosti.

Světelný zdroj – prostory bez denní složky osvětlení

V případě požadavku na osvětlení je preferenční funkce rovna maximální hodnotě, v opačném případě je hodnota nulová:

$$u(t) \approx \infty; t \in \langle 0; T \rangle \quad (6-41).$$

Důvodem je, že v okamžiku požadavku na osvětlení daného prostoru, je nutné tento požadavek uskutečnit z důvodu schopnosti vůbec využít daný prostor.

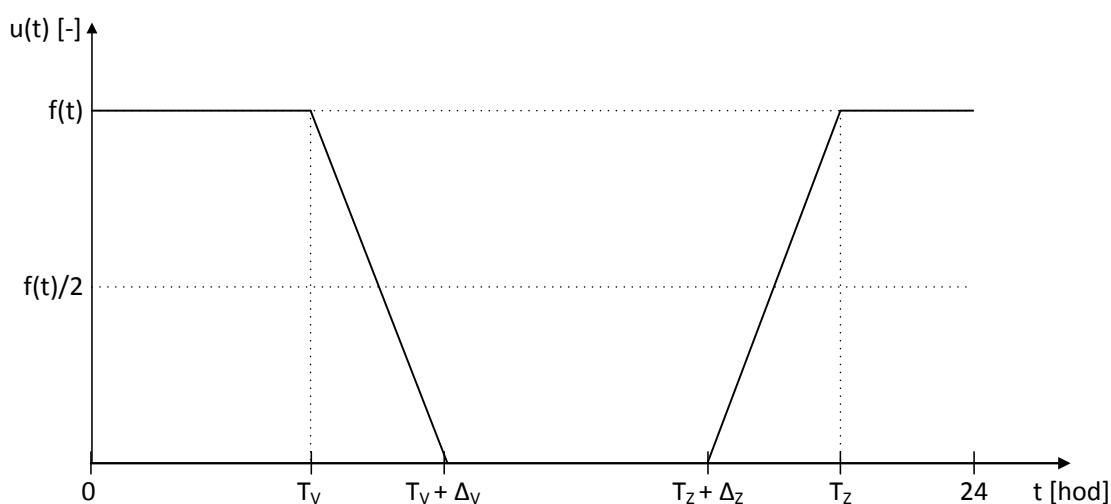
Osvětlení – prostory s denní složkou osvětlení

Individuální výpočet preferenční funkce je navržen pro intervaly ohraničené východem (T_V) a západem (T_Z) slunce:

- $\langle T_V, T_V + \Delta_V \rangle$,
- $\langle T_Z - \Delta_Z, T_Z \rangle$.

Důvodem je možnost definovat vlastní sklon poklesu, resp. náběhu preferenční křivky, aby nedocházelo ke skokové změně preferenční funkce pouze v okamžiku T_V a T_Z , ale byl zohledněn postupný nárůst (postupné ubývání) přirozené denní složky osvětlení. Tento přístup umožní vhodně nastavit kombinaci denní složky a umělé složky osvětlení. Je tímto způsobem zohledněn přechody denní složky z vyhovující na nevyhovující a naopak [87], [88]. Schopnost modelu umožnit individualizované nastavení zpoždění anebo urychlení funkčnosti daného světelného zařízení o Δ_V (popř. Δ_Z) může přispívat ke světelné pohodě domácnosti.

Základní předpoklad je stanoven tak, že osvětlení splňuje požadavky příslušných norem a prostor nevykazuje nevyhovující denní složku osvětlení. V tomto případě je daný prostor vnímán jako prostor bez přístupu přirozeného světla a je zařazen do typu světelný zdroj – prostor bez přirozeného světla.



Obr. 16 Průběh preferenční křivky pro světelný zdroj

Pro stanovení preferenční funkce byla celková časová perioda T rozdělena do 4 intervalů s ohledem na okamžik východu a západu slunce:

$$\begin{aligned}
 I_1 &:= \langle 0; T_V \rangle \cup \langle T_Z; T \rangle; \\
 I_2 &:= (T_V; T_V + \Delta_V); \\
 I_3 &:= \langle T_V + \Delta_V; T_Z - \Delta_Z \rangle; \\
 I_4 &:= (T_Z - \Delta_Z; T_Z).
 \end{aligned}
 \tag{6-42}$$

Pro určení preferenční funkce byla použita lineární rovnice s ohledem na snadnost výpočtu vzhledem k případné nepřesnosti výsledků funkce jako takové. Odvození vychází ze směrnicového tvaru rovnice přímky:

$$f(x) = kx + q \tag{6-43},$$

kde k je multiplikační konstanta (směrnice) a q je aditivní konstanta.

Pro interval I_2 je odvozena preferenční funkce následujícím způsobem:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{T_V - (T_V + \Delta_V)} = -\Delta_V \quad (6-44);$$

$$q = 1 + \Delta_V T_V \quad (6-45);$$

$$f(t) = 1 + \Delta_V (T_V - t) \quad (6-46).$$

Obdobně je vypočtena preferenční funkce pro interval I_4 :

$$f(t) = 1 + \Delta_Z (t - T_Z) \quad (6-47).$$

Preferenční funkce pro prvek světelný zdroj osvětlující prostor s přirozeným světlem je určena

$$f(t) = \begin{cases} 1 & , t \in \langle 0; T_V \rangle \cup \langle T_Z; T \rangle \\ 1 + \Delta_V (T_V - t) & , t \in (T_V; T_V + \Delta_V) \\ 0 & , t \in \langle T_V + \Delta_V; T_Z - \Delta_Z \rangle \\ 1 + \Delta_Z (t - T_Z) & , t \in (T_Z - \Delta_Z; T_Z) \end{cases} \quad (6-48).$$

6.7 NÁVRH ALGORITMU

Pro konceptuální model inteligentní domácnosti byly definovány základní řídicí algoritmy zajišťující realizaci logiky vlastního modelu. Tyto algoritmy jsou nedílnou součástí modelu, který je popsán v kapitole 6.5. Pro popis algoritmů je použit pseudokód vycházející z [89]. Z důvodu nutnosti zahrnout do algoritmů komunikační sekvence, je pro tento popis použito formalismu komunikujících sekvenčních procesů podle jazyka OCCAM 2. Důvodem takto zvoleného formálního popisu je, aby nebylo nutné definovat datové struktury pro kódování vlastního modelu do konkrétního programovacího jazyka. Cílem práce je vytvořit základní konceptuální model, který lze implementovat v libovolném programovacím jazyce, a který umožní využívat specifikace komunikačního model řízení výměny informací mezi jednotlivými prvky modelu.

Algoritmy byly navrženy v souladu s charakteristikou modelu a jeho okolí (kapitola 6.4), včetně chování vlastního modelu (kapitola 6.5). Struktury modelu vycházejí z DEFINICE 6-1 (kapitola 6.2), která stanovuje základní množinu reprezentující zařízení domácnosti a příslušné podmnožiny. Algoritmy zajišťují realizaci příslušných vlastností modelu ve strukturách vydefinovaných v rámci preferenčního schématu (kapitola 6.3), realizace nabídky a poptávky (kapitola 6.5.1) v souladu s podmínkami energetického modelu (kapitola 6.5.2) a jednotlivých typových prvků modelu (kapitola 6.6).

Algoritmy řeší:

- inicializaci prvku a_j nebo celého systému v čase t ;
- inicializaci potřebných struktur (reprezentované příslušnými množinami) prvku a_j pro časového intervalu H_i s ohledem na potřeby modelu a jeho vlastnosti;
- požadavek na zdroj od prvku a_j , který vzniká náhodně v průběhu časového intervalu $t \in H_i$.

Pokud zařízení $a_j \in S$ ukončí řádně svoji činnost, není nutné o záměně stavu informovat ostatní uzly zapojené do inteligentní domácnosti. V okamžiku vzniku požadavku na dodávku elektrické energie dochází k ověřování stavu dostupných zdrojů zapojených do energetické vrstvy modelu.

Důvody pro uvedenou strategii jsou následující:

1. zdroje mohou dodávat elektrickou energii nezávisle;
2. zařízení pro akumulaci elektrické energie se mohou přepínat do stavu „Vybíjení“ v libovolném okamžiku $t \in H_i$;
3. predikce objemu výroby elektrické energie může být upřesněna v čase požadavku $t \in H_i$;
4. požadovaný příkon zařízení $a_j \in S$ se může v čase měnit.

Množiny A ($a_x \in A, x \in \mathbb{N}$) je reprezentována datovými strukturami uvedenými v Tab. 2.

Datová struktura	Popis	Datová struktury	Datový typ prvku
O	Datové pole obsahující informace o možnosti odloženého startu daného prvku.	Pole prvků	BOOLEAN
P	Datové pole obsahující informace o možnosti přerušení funkčnosti daného prvku.	Pole prvků	BOOLEAN
S	Datové pole obsahující hodnotu $s_x(t)$, reprezentující příslušnost prvku a_x k podmnožině P nebo S , popřípadě je zařízení neaktivní, tj. $\exists a_x \in A: a_x \notin P \vee a_x \notin S$ (vzorec (6-10), kapitola 6.3.3).	Pole prvků	INTEGER
q	Proměnná reprezentující hodnotu příkonu v intervalu H_i^2 .	Proměnná	REAL
u	Proměnná reprezentující hodnotu preferenční funkce v interval H_i .	Proměnná	REAL
U	Datové pole reprezentující preferenční schéma pro interval H_i .	Pole prvků	REAL
ST	Datové pole obsahující informace o stavu daného zařízení: "Čekající" ≈ 0 , "Probíhající" ≈ 1 .	Pole prvků	INTEGER
NR	Datové pole reprezentující jednotlivé čítače odloženého startu nebo přerušení činnosti zařízení, tj. počet časových intervalů ve stavu Čekající pro dané zařízení.	Pole prvků	INTEGER
SORTU	Pomocné datové pole reprezentující sestupně seřazené indexy preferenčního schématu U .	Pole prvků	INTEGER
CH	Datové pole představující komunikační kanál.	Pole prvků	Synchronní komunikační kanál

Tab. 2 Popis datových struktur

² Stanoven maximální příkon zařízení v průběhu daného časového intervalu H_i .

Jednotlivé datové struktury představují samostatná pole s unikátním indexem j , který reprezentuje pořadí prvku a_j v množině \mathbf{A} . Počet prvků jednotlivých polí je dán mohutností množina \mathbf{A} , tj. $|A|$ (kapitola 6.2). Pro časové intervaly je v popisu algoritmů použit unikátní index i (H_i).

Algoritmus 1. Inicializace systému, zapojení prvku do systému

Předpoklady:

- Výpočet se provádí v čase $t \in H_i = \langle t_{i-1}, t_i \rangle$
- ALL reprezentuje všechny prvky zapojené do modelu

Vstup:

Výstup: aktualizované datové struktury u všech prvků

Krok 1 INTEGER $nr = 0$

Krok 2 aktivace zařízení $a_j \rightarrow s_j(t)$

Krok 2 sync channel $CH[|A|]$ of A

Krok 3 send {

 požadavek na ST

 datový prvek $s_j(t)$

 požadavek na NR

 datový prvek nr }

 to ALL

Krok 4 receive ST & PT from ALL

Poznámka: Systém může být inicializován libovolným prvkem zapojeným do systému. Každý nově zapojený prvek do systému provede inicializaci vlastních datových struktur. Požadavek na zajištění zdroje je prováděn v rámci algoritmu 3.

Algoritmus 2. Inicializace prvku a_j pro časový interval H_i

Předpoklady:

- Výpočet se provádí v čase $t_{i-1}, H_{i-1} = \langle t_{i-2}, t_{i-1} \rangle, H_i = \langle t_{i-1}, t_i \rangle$

Vstup: konfigurace množiny A pro časový interval H_i

Výstup: aktualizované datové struktury u všech prvků

Krok 1 požadavek od zařízení $a_j \rightarrow q_j$

Krok 2 INTEGER $Q_t = 0, P_t = 0$

Krok 3 **sync channel** $CH[|A|]$ **of** A

Krok 4 **send** požadavek na q & požadavek na p **to** ALL

Krok 5 **recieve** q & p **from** ALL

Krok 6 **for** $l = 1, \dots, |A|$ **do** $P_t = P_t + P[l]$

Krok 7 stanovit preferenční schéma $U_i[|A|]$ s použitím $NR[|A|]$

Krok 8 **for** $m = 1, \dots, |A|$ **do** $SORTU[m] = NULL$

Krok 9 seřadit sestupně požadavky podle hodnoty $U_i[|A|] \rightarrow SORTU[|A|]$;

Krok 10 $m = 1$

Krok 11 **while** $j \neq SORTU[m]$ **do** $Q_t = Q_t + Q[SORTU[m]]$; $m++$

Krok 11 **if** $q_j \leq P_t - Q_t$ **then** aktivuj zařízení a_i ; **KONEC**

Krok 10 **if** $P[j]$ **then** {

Krok 10a aktualizuj $ST[j] = \text{"Čekající"}; NR[j]++$;

Krok 10b **sync channel** $CH[|A|]$ **of** A

Krok 10c **send** $ST[j]$ & $NR[j]$ **to** ALL

Krok 10d **KONEC}**

Krok 11 systémová chyba nedostatečný příkon OM; **KONEC**

Poznámka: Jednotlivé prvky provedou aktualizaci prvku j datových struktur ST a NR (tj. zapíší do příslušného pole hodnoty $ST[j]$ a $NR[j]$) v rámci reakce na zprávu od prvku j jako součást synchronní komunikace. Při výpočtu preferenčního schématu je použit u prvků s odloženým startem anebo přerušenou činností výpočet zvýšené preference podle rovnice (6-33), kapitola 6.6.

Algoritmus 3. Požadavek na zdroj

Předpoklady:

- Výpočet se provádí v čase $t \in H_i = (t_{i-1}, t_i)$
- ALL reprezentuje všechny prvky zapojené do modelu

Vstup: Konfigurace množiny A pro časový interval H_i

Výstup: aktualizované datové struktury u všech prvků

Krok 1 požadavek od zařízení $a_j \rightarrow q_j$

Krok 2 INTEGER $Q_t = 0, P_t = 0$

Krok 3 **sync channel** $CH[|A|]$ **of** A

- Krok 4** send požadavek na q & požadavek na p to ALL
- Krok 5** receive q & p from ALL
- Krok 6** for $k = 1, \dots, |A|$ do if $k \neq j$ & $ST[k] = 0$ then $Q_t = Q_t + Q[k]$
- Krok 7** for $l = 1, \dots, |A|$ do $P_t = P_t + P[l]$
- Krok 8** if $q_j \leq P_t - Q_t$ then aktivuj zařízení a_i ; **KONEC**
- Krok 9** stanovit preferenční schéma $U_i[|A|]$ s použitím $NR[|A|]$
seřadit sestupně požadavky podle hodnoty $U_i[|A|] \rightarrow SORTU[|A|]$
- Krok 10** if $O[j]$ then {
- Krok 10a** aktualizuj $ST[j] = \text{"Čekající"} ; NR[j] ++ ;$
- Krok 10b** sync channel $CH[|A|]$ of A
- Krok 10c** send $ST[j]$ & $NR[j]$ to ALL
- Krok 10d** **KONEC}**
- Krok 11** systémová chyba nedostatečný příkon OM; **KONEC**

Poznámka: Jednotlivé prvky provedou aktualizaci prvku j datových struktur ST a NR (tj. zapíší do příslušného pole hodnoty $ST[j]$ a $NR[j]$) v rámci reakce na zprávu od prvku j jako součást synchronní komunikace.

6.8 SHRUTÍ

Základní požadavkem optimalizace je stanovení objemu elektrické energie, které bude domácnost spotřebovat v průběhu jednotlivých časových intervalů během daného dne. Toto vymezení je klíčové pro rozhodovací mechanismus, který umí stanovit, jaký objem kapacity potřebuje domácnost, pro jaká konkrétní zařízení. Navržený model vychází z definované množiny zařízení zapojených do inteligentní domácnosti podle DEFINICE 6-1 (kapitola 6.2) využívající preferenční systém (kapitola 6.3.3) s ohledem na časový interval, kdy zařízení žádá o garantovanou dodávku elektrické energie (kapitola 6.3.4).

Model je vymezen charakteristikou modelu, předpoklady chování okolí modelu (kapitola 6.4) a chováním vlastního modelu (kapitola 6.5). Jak charakteristika modelu, tak jeho chování odpovídá reálnému využití zařízení zapojených do stávajících nn rozvodů. Tím je zajištěna jeho univerzálnost bez nároku na technické úpravy. Model je postaven na architektuře, která se skládá ze dvou fyzických vrstev v podobě energetické sítě (nn rozvody) a komunikační sítě zajišťující vzájemnou výměnu informací jednotlivých prvků a logické řídicí vrstvě (kapitola 6.1).

Optimalizace spotřeby elektrické energie je realizována s využitím nabídky a poptávky po elektrické energii (kapitola 6.5.1) zajišťující vyrovnanou bilanci energetického modelu (kapitola 6.5.2). Funkčnost řídicí logiky je realizována prostřednictvím příslušných algoritmů (kapitola 6.7), které

pracují se zavedenou množinovou strukturou. Obvyklý přístup optimalizace na základě cenových indikátorů jako faktoru pro hledání vyrovnané nabídky a poptávky je nahrazen preferenčním schématem, který je individuální pro daný časový interval (kapitola 6.3.3). Preferenční systém je objektivnějším hlediskem než prostá jednotková cena se schopností pokrýt užitek daný funkčností konkrétního zařízení pro domácnost.

V rámci definice byly vytvořeny typické kategorie zařízení využívané v rámci domácností v ČR a určeny jejich charakteristiky z pohledu kvantifikace preferenční funkce (kapitola 6.6).

Navržené algoritmy jsou postaveny na realizaci bilanční rovnice (6-19) (kapitola 6.5.1). Díky tomu dochází ke zvýšení efektivity využívání elektrické energie a zvyšuje se užitek vlastních zdrojů. Tím získává inteligentní domácnost vyšší míru schopnosti upravovat vlastní spotřeby v čase a reagovat na časovou nestálost v dodávkách elektrické energie z OZE, především FTE a VTE.

Rozhodování o využívání konkrétních zařízení postavené na preferenčním schématu v daném časovém intervalu představuje reálný přínos k současnému stavu poznání, který stanovuje rovnováhu mezi nabídkou a poptávkou na základě jednotkové ceny elektrické energie. Nezahrnovat cenu do rozhodovacích algoritmů představuje větší přiblížení k významu užitku daného zařízení pro domácnost. Nezávislost na ceně reprezentuje vyšší míru společenské odpovědnosti při efektivitě a optimalizaci spotřeby elektrické energie z důvodu nízké cenové elasticity poptávky.

Jako nepřímý důsledek efektivního řízení spotřeby elektrické energie lze identifikovat i nižší náklady a to z důvodu, kdy koordinací individuálních rozhodování jednotlivých zařízení o jejich funkčnosti vede k ekonomičtějšímu chování domácnosti jako celku.

Základní koncept modelu včetně vymezení předpokladů návrhu modelu byl autorem publikován:

HRŮZA, T.: **IN-HOUSE SMART GRID ARCHITECTURE**. Michael McGreevy and Rita Robert. London: Sciemcee Publishing, 2015. Proceeding of the 3rd CER Comparative European Conference - International Scientific Conference for PhD Students of EU Countries. Vol. II., Issue I., pp. 117 - 119. Independently reviewed. 978-0-9928772-6-2.

Rešeršní šetření pro oblast metod odhadu spotřeby elektrické energie a návrh vymezení pro vymezení energetického modelu bylo autorem publikováno:

HRŮZA, T.: **METODY ODHADU SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE V PROSTŘEDÍ SMART GRID SÍTÍ**. In Conference Proceeding – International Masaryk Scientific Conference for Ph.D. Students and Young Researchers. Vol. VI., pp. 2084 - 2092. Recenzovaný sborník příspěvků. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2015. ISBN 978-80-87952-12-2.

Při návrhu architektury modelu bylo využito poznatků autora publikovaných v rámci:

HRŮZA, T.: **ENTERPRISE ARCHITECTURE, WHAT CAN PROVIDE TO THE BUSINESS**. Brno: Vysoké učení technické Brno, Fakulta podnikatelská, 2009. Sborník příspěvků MANAGEMENT, ECONOMICS AND BUSINESS DEVELOPMENT IN EUROPEAN CONDITIONS. Pp. III. /24 – III. /32. VII. International Scientific Conference. ISBN 978-80-214-3893-4. Brno

HRŮZA, T.: **PODNIKOVÁ ARCHITEKTURA A MODERNÍ DYNAMICKÉ IT SLUŽBY**. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, 2009. Sborník konference Mezinárodní Baťova konference. 5. Ročník mezinárodní konference. ISBN 978-80-7318-812-2. Zlín.

7 KOMUNIKAČNÍ MODEL

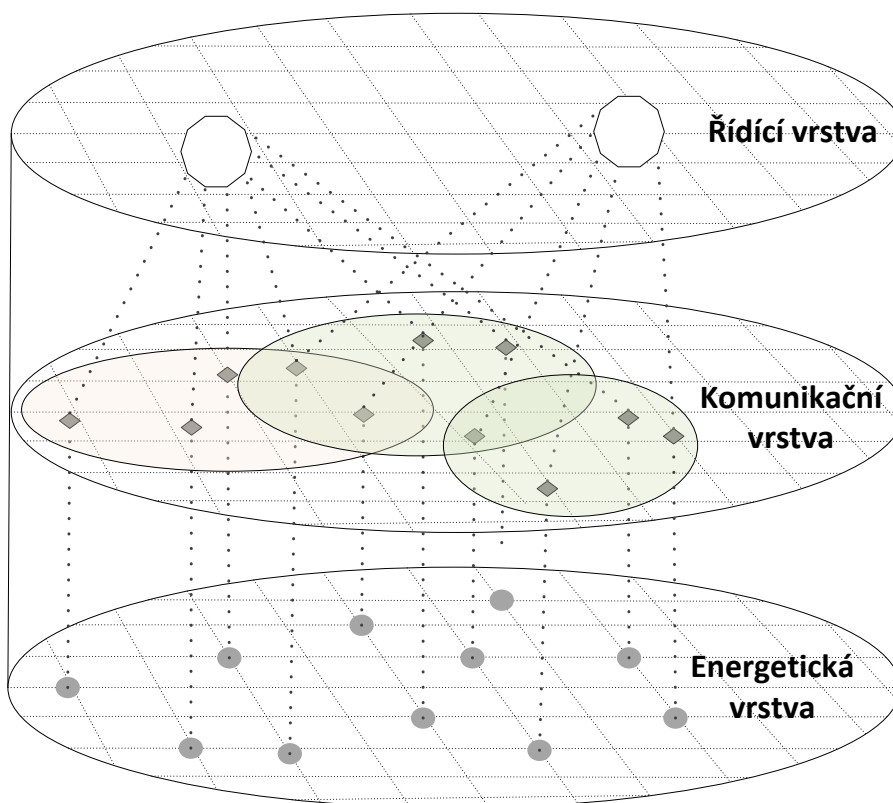
Pro účely řízení inteligentní sítě domácnosti je navrhnout komunikační model, který bude pokrývá požadavky a vymezení modelu uvedeného v kapitole 6.5. Koncepční model vychází z množiny zařízení zapojených do inteligentní domácnosti **A** (definice 6-1). Prvky množiny **A** představují jednotlivá zařízení, která vzájemně komunikují za účelem optimalizace řízení nabídky a poptávky. Požadavkem na řídicí protokol je zajištění výměny potřebných informací mezi jednotlivými prvky sítě za účelem dodržení předpokladů modelu s možností implementovat rozhodovací algoritmus.

Pro komunikační model je důležité, aby poskytl garance splnění požadavků kladených na zajištění funkčnosti jednotlivých prvků zapojených do sítě. Rozhodovací logika musí zajistit spravedlivé přidělování elektrické energie na základě požadavků jednotlivých prvků na základě vyhodnocení preferenčního schématu. Komunikační model musí umožňovat prvkům, žádající o garantovanou dodávku elektrické energie v intervalu I_j , si vzájemně vyměňovat potřebné informace nutné pro vyhodnocení rozhodovacího algoritmu.

Nezávislost jednotlivých prvků inteligentní sítě domácnosti spočívá ve faktu, že není teoreticky omezen počet prvků zapojených do vlastní sítě. Technicky je počet zařízení limitován pouze kapacitou nn vedení v rámci daného OM (reprezentované kapacitním omezení v rámci intervalu I_j) a počtem přípojek do nn rozvodů (limit početní).

Cílem návrhu je definovat možnosti volby vhodného způsobu návrhu řídicího komunikačního protokolu pro zajištění výměny informací mezi jednotlivými prvky inteligentní sítě. Řídící informace si jednotlivé prvky inteligentní sítě vyměňují prostřednictvím komunikační sítě, která může být nezávislá na topologii inteligentní sítě domácnosti (nn rozvody). Komunikační síť by měla umožnit výměnu potřebných informací mezi jednotlivými prvky sítě navzájem.

Koncepční schéma inteligentní sítě z pohledu komunikace je uvedeno na Obr. 17., který vychází z konceptu zobrazeného na Obr. 3.



Obr. 17 Konceptní schéma inteligentní sítě

Při výběru vhodného nástroje pro návrh řídicího protokolu je zohledněn základní požadavek na způsob řízení inteligentní sítě domácnosti – zajisti správu a řízení distribuovaných systémů. Dalším kritériem je schopnost zajistit synchronní komunikaci mezi jednotlivými uzly inteligentní sítě. Výměna informací mezi uzly musí poskytnout okamžitou odezvu na požadavky zajišťující uspokojení poptávky a zároveň realizaci vhodné dodávky na základě optimalizace výběru. Požadavky na řídicí protokol pro inteligentního přidělování vhodných zdrojů, jsou především koncipovány potřebami zvoleného matematického modelu [90]. Při respektování této skutečnosti je nutné zajistit, aby konkrétní uzly zapojené do procesu přidělování (rozhodování) si byly schopny vyměňovat odpovídající informace nutné pro realizaci optimalizačního algoritmu. Každé žádající zařízení vyše požadavek v rámci komunikační sítě a mělo by obdržet informace od konkrétních zdrojů zapojených do nn rozvodu domácnosti.

Návrh řídicího protokolu rozpracovává doporučení článku [25], kde autoři definují základní principy a rámec architektury inteligentní sítě domácnosti.

7.1 POŽADAVKY NA POPIS KOMUNIKAČNÍHO MODELU

Komunikační model realizuje výměnu informací mezi jednotlivými uzly (zařízení zapojené do modelu) na úrovni komunikační vrstvy (kapitola 5), která má zajistit datovou komunikaci zařízení připojených do inteligentní domácnosti.

Kritické pro vytvoření návrhu řídicího komunikačního protokolu je stanovení limitních požadavků, pro vlastní realizaci optimalizačních algoritmů v rámci jednotlivých uzlů. První požadavek představuje výběr vhodného jazyka pro návrh a simulaci. Výběr je především omezen účelem využití

vlastního protokolu. Pozornost je věnována na výběru vhodného jazyka pro návrh a simulaci řídicích protokolů. Dále pak je nutné určit funkční požadavky řídicích funkcí protokolu, které by měl simulační nástroj splnit. Na základě těchto specifikací budou definována kritéria pro výběr nástroje návrhu vlastního řídicího protokolu.

Konceptuální model inteligentní domácnosti realizuje optimalizaci spotřeby formou reakce na požadavek na zajištění dodávky elektrické energie v intervalu I_j . Jednotlivé požadavky vznikají náhodně v průběhu intervalu I_j . Řídicí protokol musí zajistit výměnu informací mezi zařízeními, které žádá a všemi zařízeními, které jsou v daném intervalu reprezentují nabídkovou stranu modelu (množina producentů P , viz. kapitola 6.2). Řídicí protokol zprostředkovává reakci na situaci, kde se poptává elektrická energie spotřebičem a hledá se vhodný prvek producenta, který splňuje kritéria tohoto požadavku. Z této logiky vychází nutnost specifikovat druh a typ informací, které si pro účely řízení (řídicího protokolu) budou vyměňovat jednotlivé prvky zapojené do inteligentní sítě domácnosti.

Výměna informací zajištěná na úrovni řídicího protokolu musí být v souladu s potřebou realizace řídicí logiky inteligentní sítě domácnosti. Tato logika vychází z modelu optimalizace řízení poptávky a nabídky. Pro řízení jednotlivých prvků v daném intervalu H_j je vyžadována výměna informací o:

- 1) všech realizovaných žádostech (vč. celkového alokovaného příkonu zařízeních),
- 2) celkové kapacitě zdrojů (výkonu zdrojů),
- 3) odložených žádostech,
- 4) preferenčních schématech.

Rozhodovací algoritmus implementovaný do řídicího protokolu musí zajišťovat takovou funkčnost, aby uměl v okamžiku rozhodování získat všechny vstupní informace. Systém přidělování zdrojů je navržen s cílem distribuovaného rozhodování v rámci celé inteligentní sítě domácnosti. Každý prvek inteligentní sítě může ovlivnit výsledek rozhodování svou charakteristikou a příslušnou individuální preferenční funkcí, která je zahrnuta do preferenčního schématu vázaného na konkrétní časový interval H_j .

Limitujícím faktorem je pak topologie nn sítě a konkrétní technické parametry jednotlivých prvků sítě a již zapojené spotřebiče.

Popis modelu rozhodování je uveden v kapitole 6.5. Požadavky modelu jsou zohledněny při výběru vhodného nástroje pro návrh řídicího protokolu.

7.2 POŽADAVKY NA SIMULAČNÍ PROTOKOL

Komunikace mezi jednotlivými prvky by měla být zprostředkována pomocí výměny zpráv. Tomuto požadavku musí odpovídat i volba vhodného nástroje pro popis řídicího protokolu.

Důležitým požadavkem je, aby rozhodování aktivace zařízení (přechod do stavu zapnuto z pohledu odběru elektrické energie) bylo provedeno až v okamžiku, kdy obdrží zprávy od zdrojů zapojených do sítě. Tento požadavek vede k využívání synchronní výměny zpráv, aby bylo zajištěno dokončení celé sady výměny informací nutných pro provedení vlastního rozhodování. Výpočet rozhodování se provede v prvku, který žádá. Pokud dojde k vyhodnocení takovému, které aktivuje napájení zařízení,

je vyslána zpráva ke všem prvkům o změně v seznamu aktivních zařízení a zároveň včetně informace o hodnotě aktuálního alokovaného příkonu. Způsob výměny potřebných informací mezi uzly by měl zajistit synchronní výměnu zpráv. Zároveň by protokol měl zabezpečit automatická adresaci uzlů zapojených do komunikace.

Při návrhu vhodného komunikačního protokolu je třeba brát v úvahu, požadavek na nutnost řídit distribuovaný systém a tento je schopen garantovat synchronní komunikaci mezi jednotlivými prvky inteligentní sítě.

Výměna informací mezi jednotlivými prvky musí zajišťovat okamžitou reakci systému na požadavek v pevně definovaném čase. Tento čas představuje systémové zdržení vyhodnocení rozhodování mezi vznikem požadavku a jeho vyhodnocením, který představuje zpoždění reakce systému na požadavek.

Vlastní nástroj pro řídicí protokol by měl zpoždění systému ovlivňovat minimálně. To představuje další z klíčových požadavků na volbu vhodného nástroje.

Posledním významným požadavkem je zabezpečení úplné distribuce řídicí logiky. Pro model je klíčové, aby byla zajištěna vzájemná nezávislost jednotlivých prvků sítě i z pohledu vlastního řídicího protokolu.

Kritické faktory pro definici řídicího protokol inteligentní sítě:

- vzájemná nezávislost jednotlivých prvků inteligentní sítě,
- rozhodovací algoritmus je součástí řídicí logiky každého prvku,
- požadavky na zdroje vznikají nezávisle na sobě,
- výměna zpráv je synchronní,
- není vyžadován centrální řídicí a koordinační prvek,
- nezávislost na HW a SW platformě,
- zajištění časové synchronizace uzlů na začátku intervalu.

Velikost zprávy je definována mohutností množiny A , zvolenou datovou strukturou pro reprezentaci atributů prvků $a_i \in A$. Výčet požadavků na nástroj pro návrh řídicí protokol společně s objemem dat, omezují výběr vhodného nástroje pro návrh řídicího protokolu. Velikost zprávy není limitujícím parametrem, neboť návrh modelu řízení nabídky a poptávky je navržen s minimalizací požadavků na výpočetní náročnost pro jeho vyhodnocení a množství vstupních parametrů, které do rozhodovacího mechanismu vstupují.

Důležitým hlediskem návrhu je platformní nezávislost při implementaci řídicího protokolu. Řídicí protokol by měl být realizován na úrovni aplikační vrstvy OSI modelu. To vychází z požadavku, aby řídicí protokol byl nezávislý na zvolené komunikační technologii a protokolu. V důsledku tohoto požadavku je možné zajistit jeho implementaci na různé platformy a tím zajistit jeho snadnější rozšíření např. formou open source.

Posledním významným kritériem výběru vhodného nástroje pro návrh řídicího protokolu je jeho dostupnost formou open source licence na běžně dostupných vývojových platformách.

7.3 POROVNÁNÍ SIMULAČNÍCH NÁSTROJŮ

Z možných simulačních nástrojů pro návrh řídicích komunikačních protokolů [90] vyhovují definovaným kritériím Estelle [91] a SDL [92], [93]. S ohledem na vhodnost dalšího využití návrhu protokolu byl pro návrh komunikačního modelu použit jazyk Estelle, a to především díky jeho rozšíření a možnosti využít knihoven pro jazyk C. Jazyk SDL (Specification and Description Language) by byl vhodný, pokud by systém aktivních uzlů v rámci Smart Grid byl zahrnut do telekomunikačních standardů v rámci ITU (International Telecommunication Union) [87]. Přehledné srovnání jednotlivých požadavků a způsob jejich zajištění prostřednictvím vybraných nástrojů simulace a návrhu řídicích protokolů je uvedeno v Tab. 3.

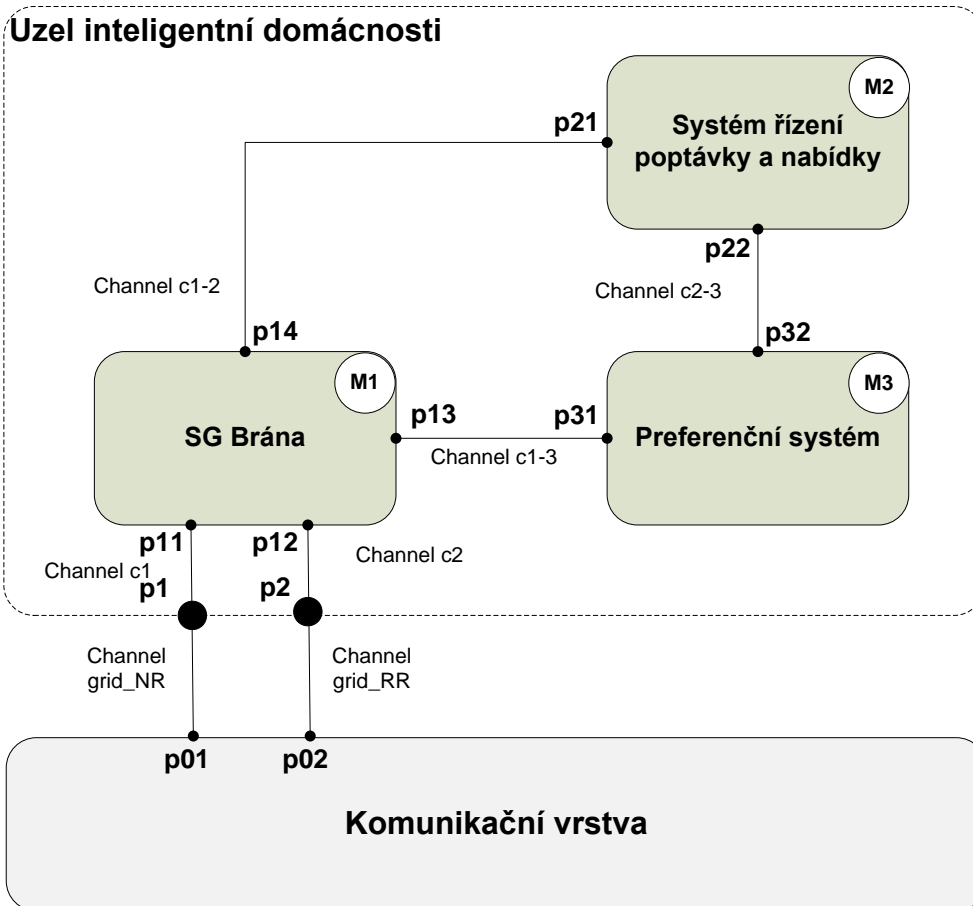
Požadavek	Estelle	SDL
Synchronní výměna zpráv	Ano	Ano
Centrální modul pro vlastní řídicí protokol	Ne	Ano
Dostupné knihovny pro programovací jazyky	C	Ne (nutný vlastní systém pro návrh s možností kompilace do knihoven)
Nástroj návrhu protokolu v podobě open source licence	Ano	Ne
Vzájemná nezávislost jednotlivých komunikačních uzlů	Ano	Ano
Výpočetní náročnost	Střední	Velká, nutná instalace run-time knihoven do komunikačních uzlů
Možnost simulace řídicího protokolu	Ano	Ano

Tab. 3 Srovnání simulačních nástrojů

Pro účely popisu řídicího protokolu inteligentní sítě je nejvhodnější použít specifikaci simulačního nástroje Estelle. Důvodem výběru je jeho rozšíření a podpora na platformách open source. Ve většině důležitých parametrů oba nástroje poskytují srovnatelnou funkčnost. SDL je více orientován na grafickou podporu návrhu, což s ohledem na zásadní pokrok v automatizovaných nástrojích podpory vývoje od doby jeho vzniku, nepředstavuje zásadní přínos.

7.4 ARCHITEKTURA KOMUNIKAČNÍHO UZLU

Komunikační model je navržen v souladu se specifikací Estelle. Detailní grafické schéma uzlu navrženého podle Estelle je znázorněna na Obr. 18. Logika je rozdělena do třech samostatných funkčních bloků, tzv. modulů, které zajišťují komunikaci, realizují rozhodovací mechanismus a zajišťují aktualizaci informací o ostatních prvcích zapojených do sítě.



Obr. 18 Blokované komunikační schéma

Jednotlivé moduly uzlu jsou zodpovědné za:

SMART GRID brána (M1)

- Realizuje komunikaci s prvky inteligentní sítě domácnosti;
- Zabezpečuje komunikaci s nižší vrstvou OSI modelu;
- Zabezpečuje synchronní komunikaci na bázi výměny zpráv;
- Zajišťuje synchronizaci začátku a konce časových intervalů;
- Zajišťuje inicializaci systému tím, že v případě aktivace uzlu odešle synchronní požadavek na zjištění stavu ostatních uzlů připojených do inteligentní sítě domácnosti.

Systém řízení poptávky a nabídky (M2)

- Řízení nabídky a poptávky podle charakteristiky daného uzlu;
- Realizuje vyhodnocení rozhodovacího algoritmu v okamžiku, kdy je žadatelem o dodávku elektrické energie;
- Aplikuje preferenční schémata do rozhodovacího algoritmu;
- Provádí ověření rozhodnutí s ohledem na charakteristiky jednotlivých uzlů;
- Provedení procesu srovnání nabídky (pro zdroje) nebo vyhodnocení nabídek (pro spotřebiče) a výpočet optimalizace nabídky a poptávky;

- V případě požadavku na dodávku elektrickou energií žádá modul M1 - SMART GRID brána ostatní uzly o zajištění aktuálních informací (množství odebírané elektrické energie uzlem anebo množství dodávané energie uzlem v rámci časového intervalu H_i);
- V případě, že je uzel zdroj elektrické energie v rámci intervalu H_i provádí výpočet predikce množství vyrobené elektrické energie, popř. jedná-li se o předávací místo poskytuje informaci o příkonu OM.

Preferenční systém (M3)

- Vyhodnocuje preferenční schémata odpovídající aktuálnímu časovému intervalu;
- Udržuje aktuální přehled o individuálních preferenčních funkcích ostatních uzlů;
- Aktualizace preferenčního schématu podle aktuální situace v inteligentní síti;
- Udržuje aktuální datové struktury potřebné pro výpočet preferenčních funkcí;
- Zajišťuje aktualizaci datové struktury odložených startů a přerušené činnosti tak, že informuje prostřednictvím modulu M1 - SMART GRID brána ostatní uzly.

7.5 SHRUTÍ

Vlastní příspěvek autora představuje vytvoření základního rámce pro realizaci rozhodovacího a optimalizačního modelu uvedeného v kapitole 6.5. Koncept je navržen tak, aby řídicí protokol umožňoval jeho implementaci ve vhodném nástroji s cílem vytvořit otevřenou platformu realizující vlastní model inteligentní domácnosti. Základní rámec návrhu je vytvořen na základě standardizovaného popisu řídicího protokolu podle specifikace jazyka Estelle. Cílem bylo navrhnout vhodný prostředek, který umožní nad zavedenými technologiemi vytvořit aplikační vrstvu s vlastním řízením výměny synchronních zpráv mezi jednotlivými uzly.

Navržený řídicí protokol lze implementovat do aplikační vrstvy OSI referenčního modelu. Tuto implementaci umožňuje výběr vlastního jazyka pro návrh a simulaci. Řídicí protokol by měl být nezávislý na nižších vrstvách OSI modelu.

Návrh konceptu řídicího protokolu, včetně zdokumentované architektury komunikačního uzlu, bylo publikováno:

HRŮZA, T.: **CONCEPT OF THE SMART GRID MANAGING PROTOCOL**. Conference Proceeding - International Masaryk Scientific Conference for Ph.D. Students and Young Researchers. Vol. V., pp. 3385 - 3391. Recenzovaný sborník příspěvků. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2014. ISBN 978-80-87952-07-8.

Analýza vhodných ICT technologií využitelných v rámci Smart Grid za účelem jejich využití pro budování komunikační vrstvy modelu bylo publikováno:

BRABEC, Z. – HOLEČEK, J. – HRŮZA, T.: **OVERVIEW OF APPLICABILITY OF ICT TECHNOLOGIES FOR SMART GRIDS**. In Proceeding of 15th Mechatronika 2012. Praha: Czech Technical University at Prague, 2012, pp. 169-173. ISBN 978-80-01-04987-7.

8 PREDIKČNÍ MODEL PRO FOTOVOLTAICKÉ ZDROJE

Charakteristiky obnovitelných zdrojů elektřiny (OZE) jsou ovlivněny náhodnými faktory (např. sluneční a větrné podmínky). Z tohoto důvodu je rozptyl jejich vlastností závislý na klimatických charakteristikách místa umístění zdroje. Proto je nutné vymezit jejich charakteristiky s ohledem na geografické umístění prvku v rámci SG sítě. Toto vymezení vede k zavedení pohledu na SG prostřednictvím lokálně vymezená SG sítí tvořených prvky umístěnými v geograficky stejné oblasti při zachování jejich klimatických podmínek a zároveň byly tyto prvky připojeny do stejného segmentu lokální distribuční sítě s ohledem na jejich vzájemnou kooperaci. Předpokladem pro zavedení lokálně vymezených SG sítí je fakt, kdy kvůli malé velikosti sítě jsou všechny prvky stejně ovlivněny. Tento předpoklad má nejenom vliv na výrobu z OZE zdrojů, ale i na predikci odběru elektrické energie. Tato synergie je využitelná pro balancování chodu lokální distribuční sítě. Dodávka elektrické energie z LDS je brána jako konstantní, nezávislá na klimatických faktorech. Toto vymezení je možné v důsledku regulace DS dané legislativním vymezením Energetickým zákonem a činností dohledu Energetického regulačního úřadu.

Objem vyrobené elektrické energie z OZE je proto odlišný v závislosti na sezóně jako důsledek klimatických charakteristik (liší se v rámci dlouhých období). Obdobně je ovlivněna poptávka, která má v porovnání s OZE výrobou menší rozptyl v rámci celého období jako důsledek skladby elektrických spotřebičů využívaných domácnostmi [12], [94].

Flexibilitu poptávky vůči OZE zdrojům lze řídit nebo ovlivňovat systémem řízení poptávky (DMS). To přináší výhody pro koordinaci a především zajištění vyvážené bilance u energetických systémů. Tento způsob řízení odběru a dodávky elektrické energie na straně LDS prostřednictvím řízené poptávky pomáhá řešit problematiku integrace kolísavých zdrojů energie (což jsou právě OZE) do energetického systému jako celku.

Pro efektivní řízení spotřeby elektrické energie na úrovni inteligentních domů je důležité mít efektivní a přesné algoritmy řízení poptávky. Aby bylo možné tohoto docílit, měly by tyto algoritmy umět předpovídat krátkodobou spotřebu elektrické energie. S vyšší mírou využívání obnovitelných zdrojů na úrovni domácností budou důležité i algoritmy predikce výroby elektrické energie z těchto zdrojů, aby se řídicí mechanismy uměly rozhodnout o způsobu zajištění poptávky. Koncepty Smart Grid sítí se zapojenými obnovitelnými zdroji jsou postaveny na možnosti ukládání elektrické energie na úrovni inteligentních domů a díky tomu v maximální možné míře využívat variabilitu různých zdrojů elektrické energie (tradiční zdroje, kogenerační jednotky kombinující výrobu tepla a elektrické energie a alternativní, tzv. zelené zdroje elektrické energie) pro zajištění potřeb domácnosti.

Známé modely predikce pracují s využitím báze historických dat (kapitola 4.7). To vyžaduje nutnost dlouhodobých měření lokálních charakteristik a odběrných diagramů významných spotřebičů využívaných domácností.

Schopnost efektivně předvídat množství elektrické energie vyrobené v solární elektrárně instalované v rámci rezidenční nemovitosti je důležitá jak z pohledu vlastní spotřeby dané domácnosti, tak z pohledu distribuční soustavy, ke které je domácnost připojena.

Množství vyrobené elektrické energie je funkcí osvitu při dané účinnosti použité technologie FV článků a vlivu teploty na I-V a P-V charakteristiky FV článků.

Pokud bude pokračovat současný trend podpory obnovitelných zdrojů na hladině nn, pak lze očekávat, že rozhodující přírůstek decentrálních zdrojů bude právě v oblasti fotovoltaických elektráren umístěných na střechách rezidenčních domů.

Při vzrůstajícím podílu obnovitelných zdrojů na celkové výrobě elektrické energie je schopnost prognózování zásadní pro zajištění rovnovážné energetické bilance a uspokojení poptávky jednotlivých odběratelů v čase jejího vzniku. Cíl návrhu prognostické funkce vychází z potřeb domácnosti lze formulovat právě jako schopnost predikovat vývoj intenzity slunečního záření v oblasti vymezené katastrálním územím v souladu s vymezením definice lokálně vymezenou SG sítí. V takto vymezeném prostoru lze předpokládat, že mikroklimatické podmínky jsou srovnatelné.

Pro inteligentní domácnost je schopnost predikce jednou z možností, jak řídit v čase interní poptávku jednotlivých spotřebičů s ohledem na jejich užitnou funkci z pohledu dané domácnosti. Dalším významným přínosem prognózování výroby solárních elektráren s výkonem do 10 kW připojených ve vymezené katastrální oblasti do DS z pohledu vývoje množství vyrobené elektrické energie v čase v závislosti na schopnosti vývoje intenzity slunečního záření.

8.1 CHARAKTERISTIKA MĚŘENÝCH DAT

Pro analýzu byla využita data sledovaná na meteorologické stanici České zemědělské univerzity v Praze (ČZU), která je umístěná v areálu univerzity [95]. Nadmořská výška stanice je přibližně 280 m, zeměpisná poloha 50°08'S, 14°22'V.

Meteorologické veličiny jsou vzorkovány v intervalech 10 min, 15 min a 60 min a ukládány v nestrukturované podobě. Aby bylo možné data dále zpracovat, je nutné je transformovat do vybraného formátu pomocí software PC200W (Campbell Scientific, Inc.).

Teplota vzduchu je teplota okolí měřená 5 cm nad povrchem. Měření teploty je vzorkováno v hodinovém a 15 min cyklu, atmosférický tlak je opět vzorkován v hodinovém a 15 min intervalu. Globální sluneční záření³ je reprezentováno 10 min a denními součty v kJ vztažených na m². Rychlost větru je reprezentována hodinovým průměrem, který je zaznamenáván v hodinové a 15minutové frekvenci snímání. Směr větru a jeho rychlost jsou vzorkovány v 15minutové frekvenci. Měření těchto veličin je prováděno 10 m nad povrchem země.

Denní úhrn intenzity slunečního záření I_{den} [kJ/m²/den] je zaznamenáván průběžně během dne formou kumulativních přírůstků a ukládán samostatně. Pro účely analýzy hodinových hodnot bylo nutné provést přepočty součtových hodnot zaznamenaných v 10minutových vzorcích na příslušnou hodinovou úhrnnou hodnotu I_{hod} [kJ/m²/hod]. Hodnoty teploty vzduchu T [°C] vycházejí ze 60minutových vzorků. Jednotlivě zaznamenávané veličiny v dané vzorkovací frekvenci mají časovou známku věty ve struktuře ROK (formát YYYY), DEN (pořadový den v daném roce, formát ##D) a ČAS (formát HHMM).

³ Globální záření se skládá ze složky přímého záření a nepřímého (difúzního) záření.

Modul	Zařízení
Ústředna	<ul style="list-style-type: none"> • CR10X-2M měřící a ovládací jednotka, CS, USA
Senzory	<ul style="list-style-type: none"> • PT100/3 1/3 DIN PT100 teploměr, CS, UK • HMP45C čidlo teploty/vlhkosti vzduchu, VAISALA, Finsko • RPT410F tlakoměr, CS, UK • SR03 srážkoměr, FIEDLER, CZ • A100R/W200P čidlo rychlosti/směru větru, EM, UK • CM11 pyranometr, K&Z, NL
Telekomunikační jednotky	<ul style="list-style-type: none"> • NL100 Network Link Interface, CS, USA • DWL-900AP+ bezdrátový vysílač

Tab. 4 Technická specifikace meteorologické stanice ČZU

8.2 ANALÝZA

8.2.1 Výběr vstupních dat

Vstupní data intenzity slunečního záření⁴ jsou vybrána s časovou jednotkou 1 hodina. Pro výběr dat byla zvolena podmínka minimálního podílu ve výši 1 % denního úhrnu intenzity sluneční energie⁵ I , tj. musí platit nerovnost

$$I > \frac{\sum I_i}{100}, \text{ pro všechna } i \in \langle 1; 24 \rangle \quad (7-1).$$

Zvolená podmínka nemá vliv na návrh modelu z důvodu minimálního podílu I_t , neboť neovlivní celkový objem vyrobené elektrické energie ze solární elektrárny v konkrétní hodině, a to jak z pohledu uspokojení potřeb Domácnosti, tak by zároveň neměla mít vliv na kapacitu přinášené elektrické energie do DS.

Pro analýzu se jeví jako nevhodná veličina atmosférický tlak, neboť ze zaznamenaných dat je patrné, že jeho výkyvy jsou neperiodické. Příčinou je nerovnoměrné ohřívání zemského povrchu a pohyby vzduchových hmot v průběhu kalendářního roku [75]. Z naměřených dat lze vysledovat pro průměrnou hodnotu atmosférického tlaku (hodinové hodnoty), že vykazují z pohledu denního chodu⁶ pravidelné, periodické denní vlny. Denní chod teploty naopak představuje periodické kolísání s jedním minimem (blížíci se východu Slunce) a jedním maximem (oscilující kolem 13 hodiny). Rozpětím maxima a minima teploty je dána denní amplituda teploty.

Z naměřených dat lze vyvodit závěr, že denní chod relativní vlhkosti vzduchu je závislý na části roku a liší se mezi zimní a letní částí roku. Relativní vlhkost vzduchu je ve vzorku dat z let 2007 až 2015 neperiodicky kolísavá a díky této skutečnosti nemá přímý vliv na vstupní parametry navrhovaného modelu.

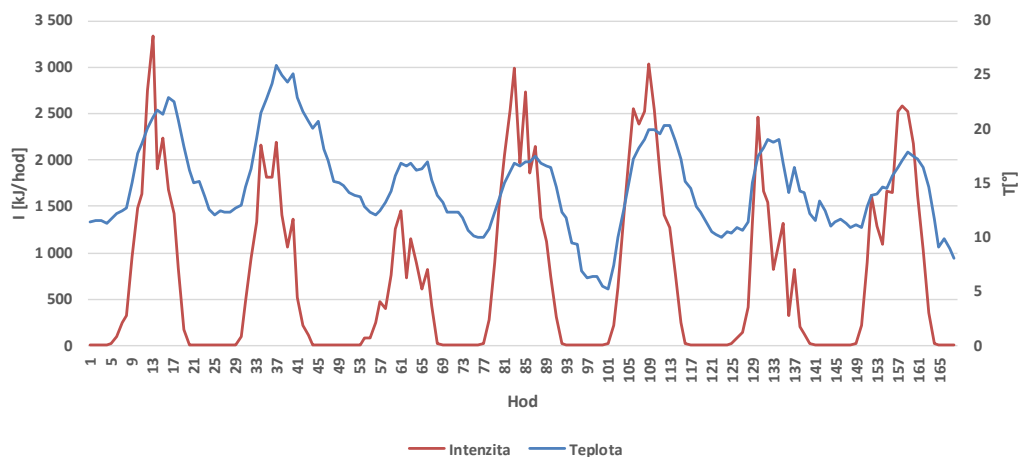
⁴ Intenzita I definována jako množství zářivé energie, jež za jednotku času dopadá na jednotkovou plochu orientovanou kolmo ke slunečním paprskům [72].

⁵ Pokud dále není rozlišována časová jednotka, je intenzita I vztažena na jednotku 1 hodina. V jiných případech bude formou indexu uvedeno příslušné časové období.

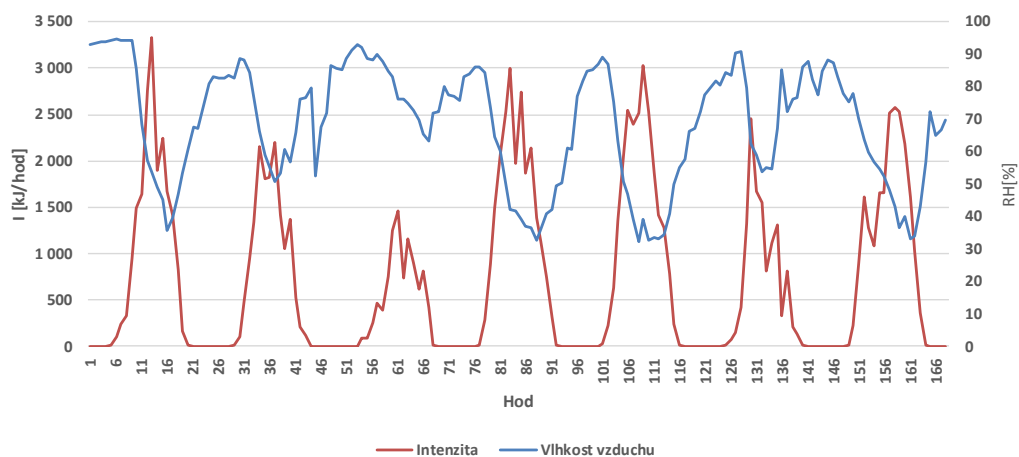
⁶ Chod meteorologického prvku denní — změna hodnoty (časový průběh met. prvku) během 24 hodin. V klimatologii se za denní chod meteorologického prvku považuje i denní chod průměrných hodinových hodnot vypočtených pro určitý den, měsíc nebo roč. období z víceletých pozorovacích řad [103].

Vliv uvedených veličin na denní průběh I je nepřímý (jak dokazují autoři v analýze [57]) a jeho závislost na uvedených veličinách nebyl analyzován. Příklady chodu uvedených veličin jsou ukázány na Obr. 21, Obr. 20 a Obr. 21.

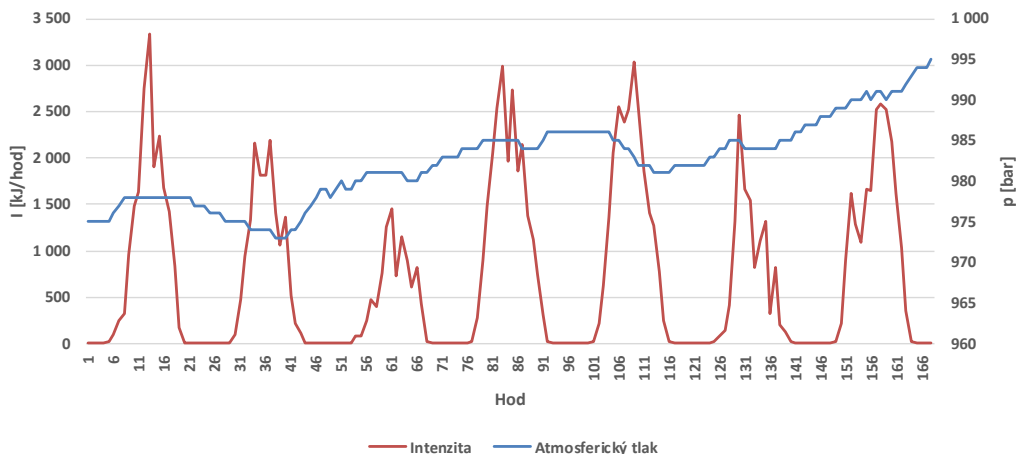
Z důvodu, že na meteorické stanici není měřena oblačnost, která představuje stupeň pokrytí oblohy mraky, nebyl posuzován její vliv na hodnotu intenzity, přestože lze vysledovat anomálie v denním chodu I , které mohou nastat v důsledku oblačnosti.



Obr. 19 Příklad chodu teploty vzduchu a intenzity slunečního záření



Obr. 20 Příklad chodu vlhkosti vzduchu a intenzity slunečního záření



Obr. 21 Příklad chodu atmosférického tlaku a intenzity slunečního záření

8.2.2 Korelační analýza průměrné denní teploty a intenzity slunečního záření

Pro stanovení průměrné denní teploty se vychází v dalším srovnání z váženého aritmetického průměru, který je postaven na rozdělení četností teplot v průběhu dne. V klimatologii se používá výpočet, který průměrnou denní teplotu odvozuje na základě tří pozorování v časech 7:00 (T_7), 14:00 (T_{14}) a 21:00 hodiny (T_{21}) [96]:

$$\bar{T}_v = \frac{T_7 + T_{14} + 2T_{21}}{4} \quad (7-2).$$

Výpočet zohledňuje hodnoty v rámci denní poloviny dne, noční polovina dne má menší vliv na výslednou průměrnou hodnotu. Tento výpočet nejvíce vyhovuje pro účely analýzy, kdy primárním zájmem je sledovat denní chod intenzity solárního záření a zároveň nemá vliv na podmínku (1).

Pro univerzálnost postupů analýzy je volba výpočtu průměrné denní teploty důležitá, protože se vážený průměr používá pro sledování hydrometeorologických veličin v rámci standardních měření [97].

Aby bylo možné použít stejných postupů analýzy, je třeba určit míru příčinné závislosti mezi průměrnou denní teplotou a intenzitou slunečního záření. Význam pro následující úvahy mají především analýza denního chodu a hledání globálních extrémů (nástupu). Proto je třeba objektivně stanovit míru závislosti mezi průměrnou teplotou (příčinný jev/znak) a intenzitou slunečního záření (účinek), tzn. hledat korelaci mezi těmito jevy. Přirozeně je možno vycházet z empirické zkušenosti, že mezi teplotou a intenzitou slunečního záření je přímá úměra.

Pro potvrzení souvislostí je použit bodový diagram (vizuální zobrazení korelace mezi veličinami \bar{T}_v a I_{den} je uvedena v obr 2) a především korelační koeficient

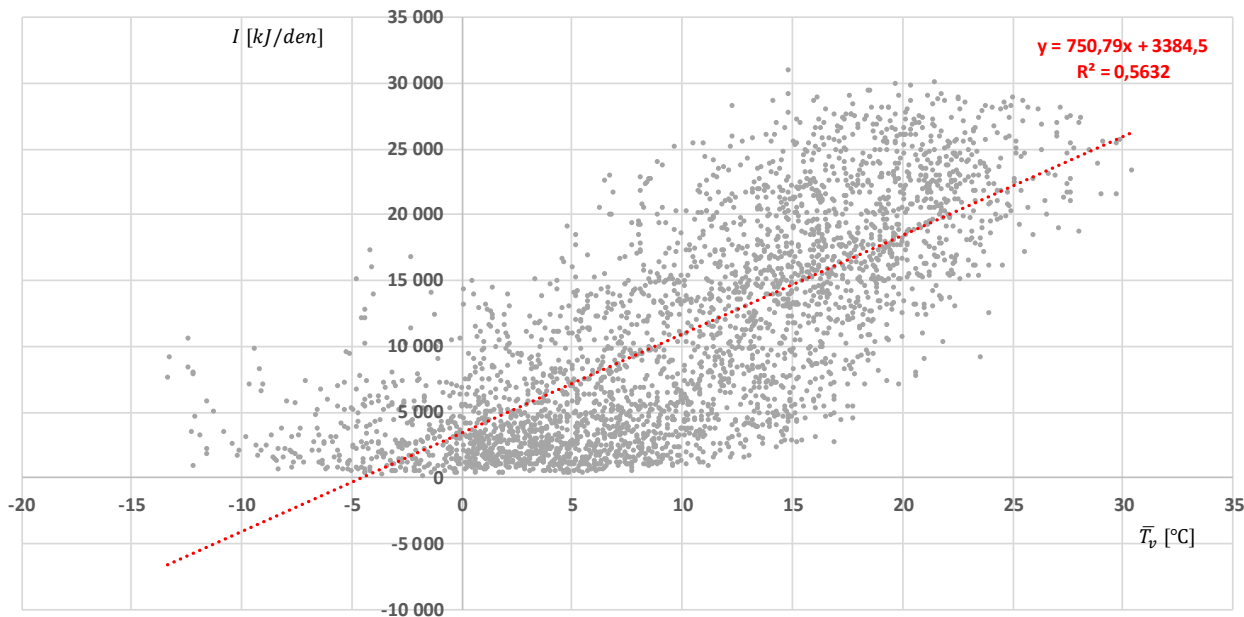
$$r_{xy} = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{s_x^2 s_y^2}}, \text{ pro } s_x^2 > 0, s_y^2 > 0 \quad (7-3).$$

Pro r_{xy} platí Schwarzova nerovnost $-1 \leq r_{xy} \leq 1$. Hodnoty r_{xy} pro jednotlivé roky jsou uvedeny v Tab. 5, kde je korelační koeficient pro průměrné teploty vypočtené podle rovnice (7-2) a denní úhrn

intenzity slunečního záření. Jednotlivé hodnoty r_{xy} jsou kladné, takže je možno odvodit, že se jedná o pozitivně korelované veličiny. Tím, že platí $r_{xy} \rightarrow +1$ (úplná přímá korelace), tj. lze možno, že mezi průměrnou denní teplotou a úhrnnou denní intenzitou slunečního záření je přímá korelace s vysokým stupněm těsnosti.

Rok	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
r_{xz}	0,802	0,779	0,777	0,748	0,735	0,748	0,751	0,747	0,719

Tab. 5 Hodnoty korelačního koeficientu (\bar{T}_v a I_{den}) pro jednotlivé roky



Obr. 22 Bodový diagram korelace hodnot průměrné teploty a denní intenzity

8.2.3 Chod intenzity slunečního záření

Pro výpočty jsou zanedbávány hodnoty intenzity po západu Slunce, které jsou důsledkem difúzní složky globálního záření. Celkový objem solárního záření v nočních hodinách představuje zanedbatelnou hodnotu s prakticky nulovým vlivem na výsledky analýzy.

Bod zvratu je definován jako změna charakteru systematického růstu (popř. poklesu) hodnoty X_i při rostoucím indexu i . Bod zvratu X_i nastává právě, když platí

$$\begin{cases} x_{i-1} < x_i > x_{i+1}, & \text{pro maximum} \\ x_{i-1} > x_i < x_{i+1}, & \text{pro minimum} \end{cases} \quad (7-4).$$

Pro účely analýzy je důležité identifikovat globální maximum jako bod zvratu, u kterého platí

$$x_{i-1} < x_i > x_{i+1} \text{ na celém časovém intervalu } 0 \text{ až } 24 \text{ hodin.}$$

Lokální body zvratu jsou nevýznamné, neboť na intervalu se vyskytují další body zvratu, které jsou nahrazeny vyššími (popř. nižšími) hodnotami pro hodnoty indexu $x_i < x_{i+k}$ pro libovolné k .

S ohledem na dosažení cíle analýzy je potřeba stanovit globální maximum a globální minimum pro body zvratu, kdy dochází ke změně trendu v chodu sledované veličiny na základě stanovené mezní hodnoty, tj. určit nástup a ukončení období s teplotami nižšími, než je sledovaná hodnota. Problematika výpočtu nástupu na základě metody součtových řad odchylek je popsána v [98], [99].

Cílem je identifikovat globální extrém (nástup), kdy dojde u prvku časové řady k překročení sledované hodnoty.

Výpočet vychází z určené odchylky naměřené hodnoty od referenční hodnoty [98]

$$s_i = T_z - T_i \quad (7-5).$$

Referenční hodnota T_z se vztahuje k období růstu sledované veličiny T_i . Vlastní výpočet součtové řady pro stanovení globálního maxima je určen rovnicí

$$\sum_{i=1}^n (T_z - T_i) \quad (7-6).$$

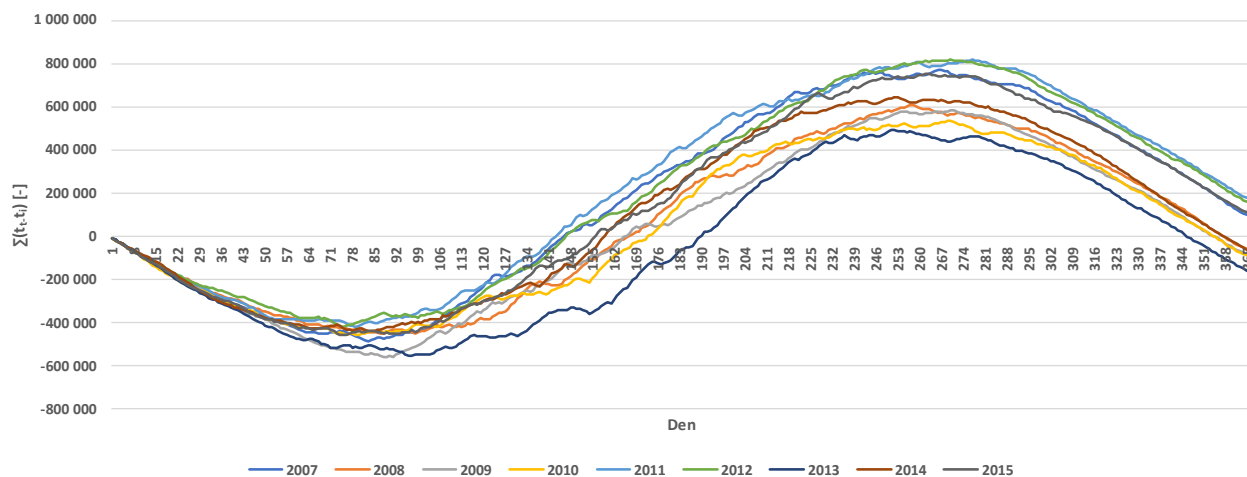
Pro stanovení nástupu se používá časové období vymezené I. – XII. měsícem daného roku [98]. Stanovený den nástupu a konce období růstu sledované veličiny T_i jsou uvedeny pro jednotlivé roky v Tab. 6 a Tab. 7. Jednotlivé hodnoty nástupu a konce období růstu uvedené v tabulkách představují pořadí dne v roce. Průběh součtových řad odchylek od průměrného úhrnu denní sluneční intenzity ($I_{den} > \overline{I_{den}}$) vztažené k jednotlivým rokům je uveden na Obr. 23.

Teplota	Den nástup	Den konce	Průměrná délka trvání [dny]
0 °C	21	352	331
5 °C	70	324	254
10 °C	103	280	178
15 °C	148	255	107
$\overline{T_v} = 9,9^\circ\text{C}$	103	280	177

Tab. 6 Průměrné dny nástupů a konců – průměrná teplota

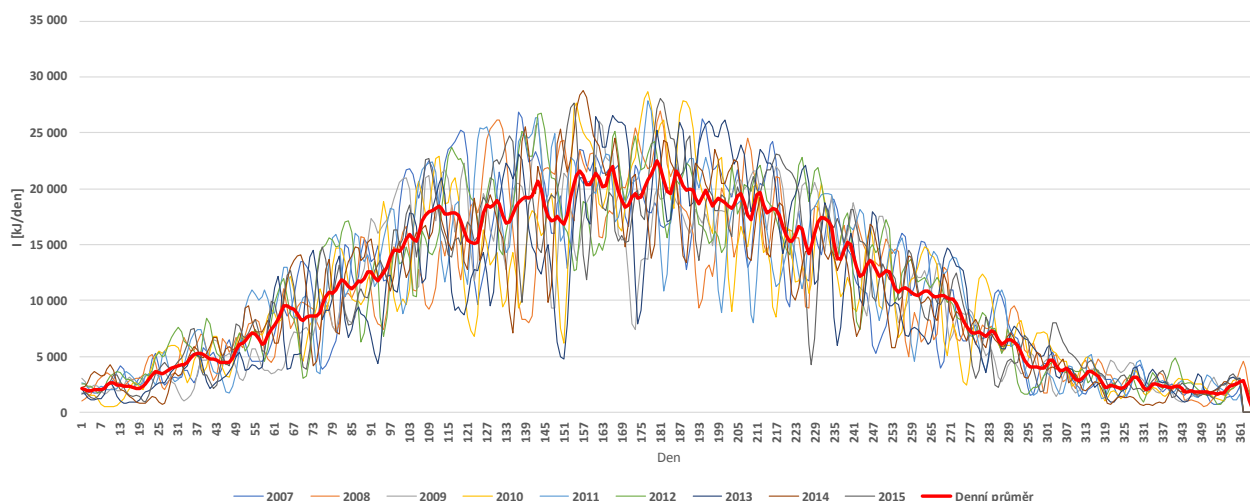
Intenzita slunečního záření	Den nástup	Den konce	Průměrná délka trvání [dny]
2 500	19	331	312
5 000	46	295	249
7 500	62	282	220
10 000	81	269	188
12 500	91	248	157
15 000	107	232	124
$\overline{I_{den}} = 10\,792,8 \text{ kJ/den}$	84	264	180

Tab. 7 Průměrné dny nástupů a konců – intenzita slunečního záření



Obr. 23 Intenzita slunečního záření – součtové řady odchylek

Charakter průběhu chodu intenzity slunečního záření má určitý cyklický průběh se sezónním výkyvem jednoho roku v důsledku ročního koloběhu Země kolem Slunce. V rámci analýzy dat mělo význam eliminovat nahodilé výkyvy způsobující kolísání hodnot kolem trendu. Pro očištění těchto výkyvů je použito vyrovnávání časových řad [100]. Tímto postupem se omezí jejich vliv na vývojovou tendenci a je možno vytvořit charakteristické průběhy pro stanovení koeficientů růstu pro navrhovaný predikční model postavený na změnách průběhu intenzity slunečního záření v rámci zvoleného časového intervalu. Pro vyrovnání byla použita metoda postupné lineární interpolace, která nejlépe vystihuje celkovou vývojovou tendenci, ale zároveň zachovává i případné hlavní periodické výkyvy. Výsledek vyrovnání průběhu chodu intenzity slunečního záření zobrazuje Obr. 24, který ukazuje průběh křivky intenzity jako výsledek interpolace 4. řádu. Takto získaný průběh charakterizuje průměrný roční chod intenzity slunečního záření jako předpokládaný vzorový průběh. Právě k této hodnotě se vztahuje kontrola vychýlených hodnot.



Obr. 24 Interpolace 4. řádu pro roční chod intenzity slunečního záření

Roční chod intenzity slunečního záření je závislý na ročním chodu průměrné teploty vzduchu, proto je zohledněno období růstu mezi globálním minimem a maximem. Ten ovlivňuje právě charakter průběhu denního chodu I . Jiným způsobem se projevuje, kdy daný den je na vzestupné křivce I oproti

dnům v sestupné periodě. Tato vlastnost by je zohledněna při identifikaci a vhodné aproximaci vychýlených (extrémních) hodnot způsobených výjimečnými a neopakovatelnými jevy.

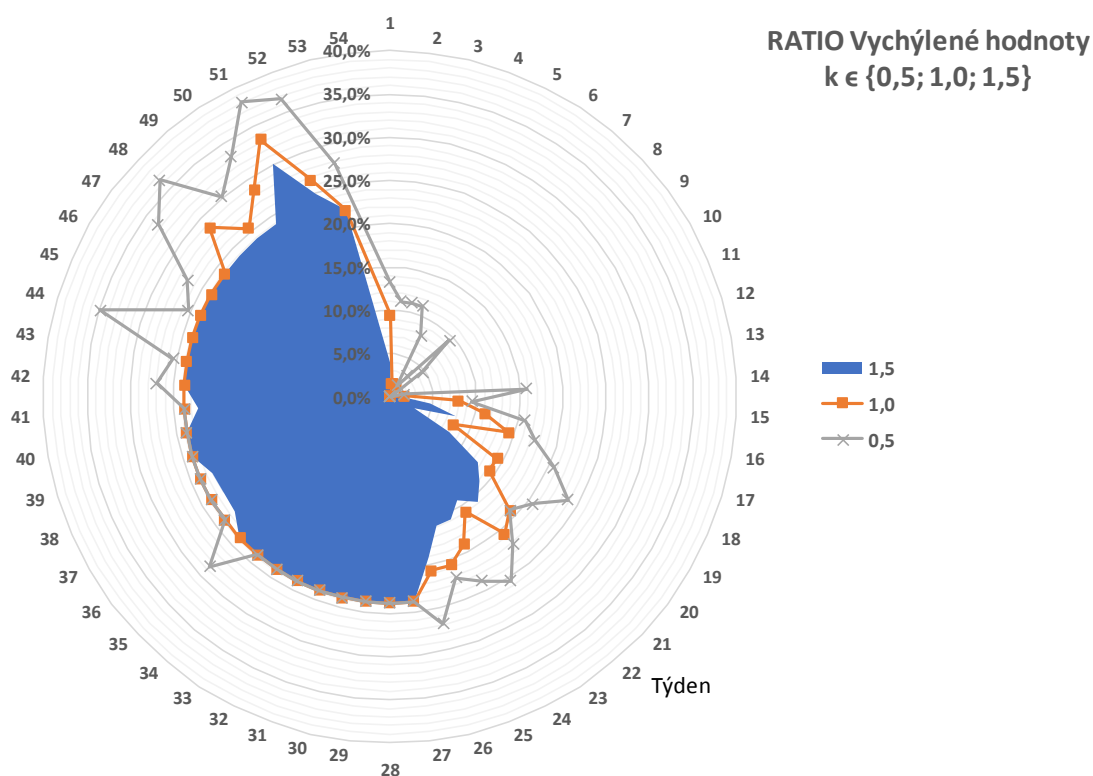
8.2.4 Kontrola dat

U naměřených dat byla provedena kontrola vychýlených hodnot ležících mimo stanovený interval

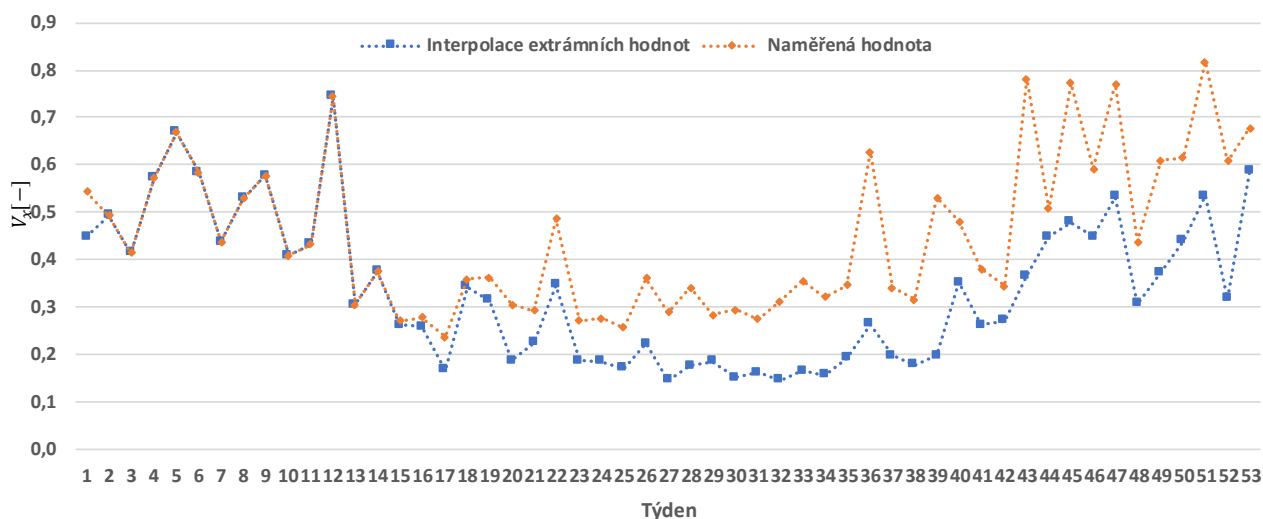
$$\langle q_{0.25} - k(q_{0.75} - q_{0.25}); q_{0.75} + k(q_{0.75} - q_{0.25}) \rangle \quad (7-7),$$

kde $q_{0.75}$ představuje horní kvartil a $q_{0.25}$ dolní kvartil. Hodnota koeficientu k byla zvolena v souladu s doporučením [101] na úrovni $k=1,5$.

Vychýlené hodnoty pro jednotlivé týdny roku jsou patrné z Obr. 25. Identifikované vychýlené hodnoty byly nahrazeny lineární interpolací (prognózou) pro horní hranici spolehlivosti na základě předchozích 8 hodnot, které nevykazují charakter extrémní hodnoty.



Obr. 25 Vychýlené týdenní hodnoty



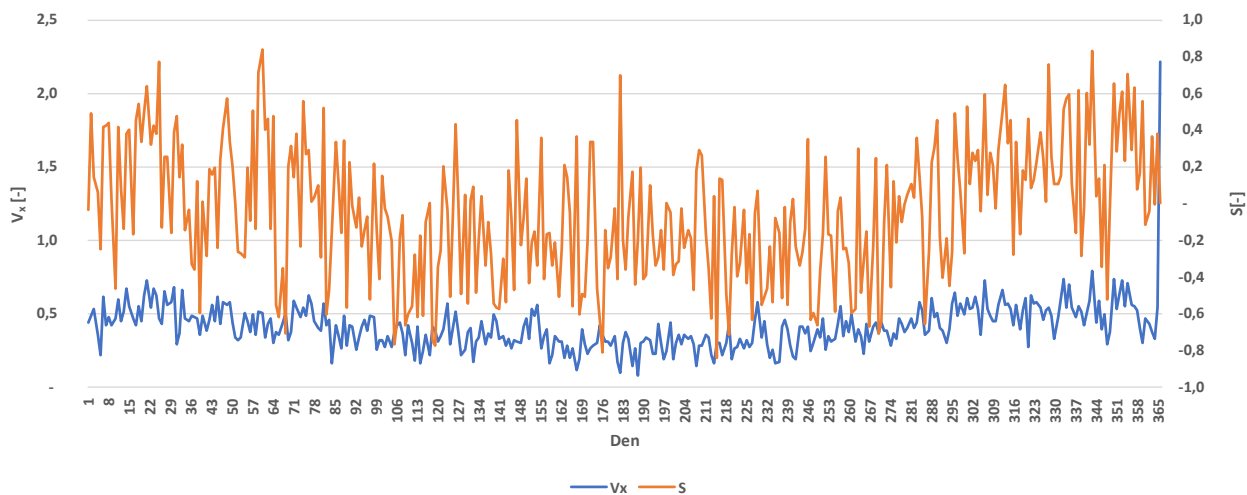
Obr. 26 Variační koeficient V_x po eliminaci vychýlených hodnot ($k=1,5$)

Pro porovnání charakteristiky variability byly zvoleny veličiny:

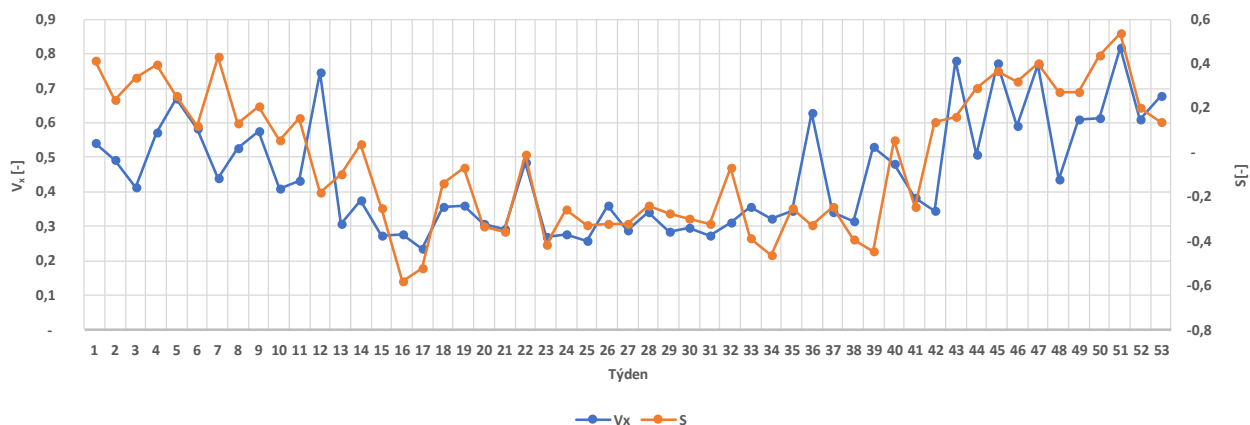
- Variační koeficient $V_x = \frac{s_x}{\bar{x}}$, kde s_x je směrodatná odchylka a \bar{x} je průměrná hodnota;
- Míra nesouměrnosti $S = \frac{(x_{max} - \tilde{x}) - (\tilde{x} - x_{min})}{(x_{max} - \tilde{x}) + (\tilde{x} - x_{min})}$, kde \tilde{x} je střední hodnota, x_{max} je maximální hodnota a x_{min} je hodnota minimální;
- Absolutní odchylka $d_i = |x_i - \bar{x}|$.

Důvodem volby těchto veličin je, že nejvhodněji charakterizují variabilitu (tzv. proměnlivost) sledovaných veličin a charakterizují jak se jednotlivé hodnoty v daném časovém snímku (v rámci jednotlivých let) a jak se dané hodnoty liší od zvolené charakteristiky polohy. Charakteristiku polohy představuje průměrná hodnota (\bar{x}), která je nejlépe vypovídající pro průběh denního, týdenního a ročního chodu intenzity slunečního záření, resp. chodu teploty (popř. průměrné teploty – pro týdenní a roční chod) podle [96].

Průběhy charakteristických hodnot jsou zobrazeny pro denní chod v Obr. 27 a pro týdenní chod v Obr. 28. Z uvedených grafů lze odvodit závěr, že pro účely prediktivního modelu je vhodné použít týdenní hodnoty, neboť jsou stabilnější, nedochází u nich k výraznému zhoršení charakteristik a v neposlední řadě, jsou týdenní hodnoty výpočetně výhodnější. Důvodem je, že je-li použit týdenní chod, je získán větší reprezentativní vzorek dat pro stanovení parametrů navrhovaného modelu. Vzorek dat představuje vektor \vec{I} jednotlivých hodnot I_i v hodinových intervalech. Volbou týdenních charakteristik získáme celkem 9×7 vektorů o 24 hodnotách, oproti 9 vektorům s 24 hodnotami při individualizaci modelu na konkrétní den v roce. Snížení počtu výpočtů na týdenní chody dojde k výrazné redukci výpočetní náročnosti fáze nastavení parametrů modelu, aniž by došlo ke zvýšení chyby celého systému, a to v důsledku mohutnější množiny vzorku dat. Pro zohlednění případných chyb je v modelu použito vhodného rozdělení pro generování náhodné chyby tak, aby došlo k zanesení nesystematičnosti do vlastního prediktivního modelu.



Obr. 27 Denní hodnoty pro variační koeficient V_x a míru nesouměrnosti S



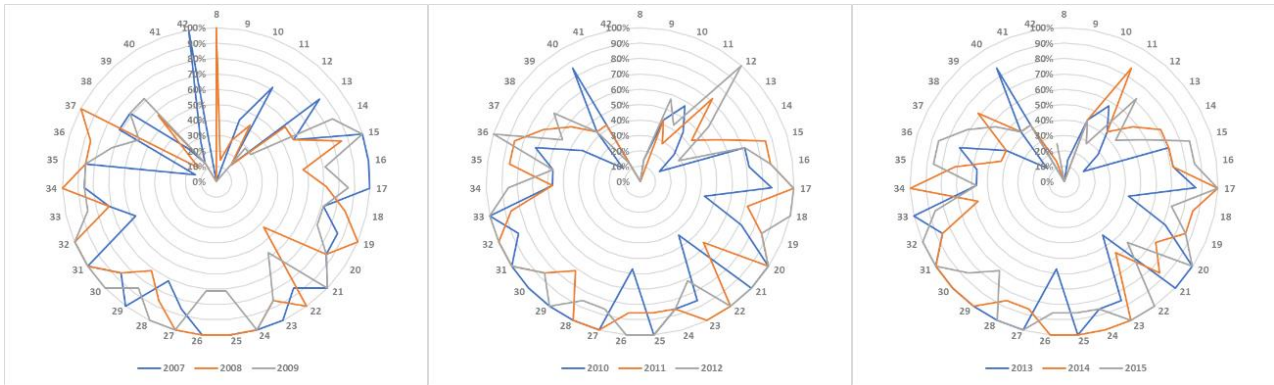
Obr. 28 Týdenní hodnoty pro variační koeficient V_x a míru nesouměrnosti S

Ve výpočtech se vychází z průměrné hodnoty intenzity slunečního záření v časové řadě vymezené kalendářním rokem.

Rok	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
\bar{I} [kJ/den]	11 032	10 608	10 527	10 517	11 245	11 208	10 331	10 595	11 072
S_x	8 180	7 823	7 882	7 861	8 140	7 834	8 182	8 009	8 083

Tab. 8 Roční úhrn sluneční intenzity

V analyzovaném období byla průměrná hodnota ročního úhrnu intenzity slunečního záření $\overline{I_{rok}} = 3\,950\,154 \text{ kJ/rok}$, průměrný denní úhrn pak $\overline{I_{den}} = 10\,793 \text{ kJ/den}$, se směrodatnou odchylkou $s_x = 6\,089 \text{ kJ}$.



Obr. 29 Procentní rozložení týdnů s počtem dní nad průměrnou hodnotou

Délku období růstu vymezené nástupem (globální minimum) a poklesem (globální maximum) sledované veličiny vztahené k průměrné roční teplotě 9,88 °C uvádí Tab. 9.

Rok	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Počet dní	168	162	158	161	176	174	153	168	168

Tab. 9 Počet dní za kalendářní rok pro $I_{den} > \bar{I}_{den}$

8.3 PREDIKTIVNÍ MODEL

8.3.1 Matematický aparát – kubický spline

Pro vymezení prediktivního modelu je navržena náhrada funkce denního chodu intenzity slunečního záření I pomocí kubické spline funkce, která nahrazuje diskrétní hodnoty I koeficientem růstu k ; reprezentující změnu hodnoty I mezi jednotlivými časovými intervaly. Diskrétní funkce $y_k = f(x_k)$ v uzlových bodech x_0, x_1, \dots, x_n .

Kubický spline je interpretován rovnicí:

$$s_{3,k}(x) = \begin{cases} p_1(x) = a_1 + b_1x + c_1x^2 + d_1x^3, x \in [x_0, x_1], \\ p_2(x) = a_2 + b_2x + c_2x^2 + d_2x^3, x \in [x_1, x_2], \\ \dots \\ p_n(x) = a_n + b_nx + c_nx^2 + d_nx^3, x \in [x_{n-1}, x_n] \end{cases} \quad (7-8).$$

Jako náhradu funkce $f(x)$ je hledána právě takovou spline funkcí $s_{3,k}(x)$, která splňuje následující podmínky:

- I. $s_{3,k}(x_k) = f(x_k)$, pro $k = 0, \dots, n$
- II. na každém intervalu $\langle x_{k-1}; x_k \rangle$, $k = 1, \dots, n$ je funkce $s_{3,k}(x)$ identická s jistým polynomem 3.stupně $p(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$
- III. $s_{3,k}(x), s_{3,k}'(x), s_{3,k}''(x)$ jsou spojité na intervalu $\langle x_0; x_n \rangle$

Požadavkem je, aby se v uzlových bodech funkce $f(x)$ a $s_{3,k}(x)$ shodovaly. Podmínka číslo (III) zaručuje, že jednotlivé polynomy (funkce $p_n(x)$) na sebe hladce navazují.

Hledaný spline $s_{3,k}(x)$, má na každém intervalu $\langle x_{k-1}; x_k \rangle$, $k = 1, \dots, n$ tvar:

$$s_{3,k}(x) = M_{k-1} \frac{(x_k - x)^3}{6h_k} + M_k \frac{(x - x_{k-1})^3}{6h_k} + \left(y_{k-1} - \frac{M_{k-1}h_k^2}{6} \right) \frac{x_k - x}{h_k} + \left(y_k - \frac{M_k h_k^2}{6} \right) \frac{x - x_{k-1}}{h_k} \quad (7-9),$$

kde $h_k = x_k - x_{k-1}$, $M_0 = M_n = 0$ a $M_1 \dots M_{n-1}$ se určí řešením soustavy rovnic:

$$h_i M_{i-1} + 2(h_i + h_{i+1})M_i + h_{i+1}M_{i+1} = 6 \left[\frac{1}{h_i} y_{i-1} - \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{i+1}} \right) y_i + \frac{1}{h_{i+1}} y_{i+1} \right] \quad (7-10),$$

pro $i = 0, \dots, n$.

8.3.2 Odvození modelu

Pro účely stanovení spline funkce $s_{3,k}(x)$ jsou použity časové intervaly s konstantní délkou

$$h_k = x_k - x_{k-1} = 1 \quad (7-11).$$

Pro náš vzorek je celkem 12 intervalů. Hodnoty z intervalu $\langle 0; 7 \rangle \cup \langle 19; 24 \rangle$ nabývají nulových hodnot (resp. hodnoty nesplňujících podmínku (7-1)).

Úpravou rovnice (7-10) pro definované intervaly je získána soustava lineárních rovnic

$$AM = Y \quad (7-12),$$

kde

$$A = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 \end{pmatrix} M = \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \\ M_5 \\ M_6 \\ M_7 \\ M_8 \\ M_9 \\ M_{10} \\ M_{11} \end{pmatrix} Y = \begin{pmatrix} 6(y_0 + 2y_1 + y_2) \\ 6(y_1 + 2y_2 + y_3) \\ 6(y_2 + 2y_3 + y_4) \\ 6(y_3 + 2y_4 + y_5) \\ 6(y_4 + 2y_5 + y_6) \\ 6(y_5 + 2y_6 + y_7) \\ 6(y_6 + 2y_7 + y_8) \\ 6(y_7 + 2y_8 + y_9) \\ 6(y_8 + 2y_9 + y_{10}) \\ 6(y_9 + 2y_{10} + y_{11}) \\ 6(y_{10} + 2y_{11} + y_{12}) \end{pmatrix} \quad (7-13).$$

Kde hodnoty y_i představují příslušné koeficienty růstu určené z diskrétních naměřených hodnot podle vzorce

$$k_i = \frac{I_i}{I_{i-1}} \quad (7-14),$$

pro taková i , kde $I_i > 0$, $i = 1, 2, \dots, 24$.

8.3.3 Návrh prediktivního modelu

Prediktivní model vychází z principu odhadu hodnoty pro nadcházející časový interval na základě hodnoty předchozího období

$$x_t = s_{3,t}(t)x_{t-1} + u_t \quad (7-15),$$

kde $u_t \sim N(0, \delta^2)$ je náhodná veličina s normálním rozdělením představující chybu v čase t .

Normální rozdělení $N(0, \delta^2)$ předpokládá střední hodnotu $\mu = 0$ a rozptyl δ^2 , hustota pravděpodobnosti je dána rovnicí

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2\delta^2} \quad (7-16)$$

a distribuční funkcí

$$F(t) = \int_{-\infty}^u \varphi(u) dt \quad (7-17).$$

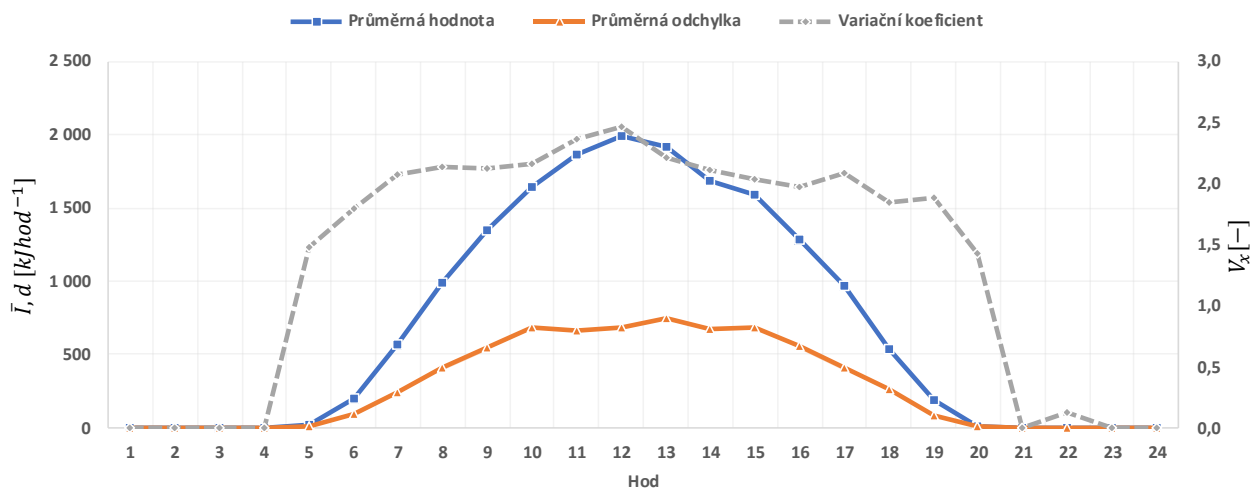
Normovaná náhodná veličina $u = \frac{x-\mu}{\delta}$, kde náhodná veličina x má rozdělení $N(0, \delta^2)$, má normované normální rozdělení. Z důvodu zjednodušení při zachování vypovídací hodnoty bude použito právě rozdělení $N(0,1)$.

Parametry pro výpočet kubické spline funkce definované vzorcem (7-8) vycházejí z vektorů chodu intenzity slunečního záření $\vec{I} = [I_1, I_2, \dots, I_{24}]$, kde hodnoty $I_i, i = 1, \dots, 24$ představují hodinové úhrny intenzity slunečního záření. Z jednotlivých vektorů hodinových hodnot pak určíme vektor průměrných hodnot $\vec{\bar{I}} = [\bar{I}_1, \bar{I}_2, \dots, \bar{I}_{24}]$, který představuje základ výpočtu parametrů modelu. Průměrné hodnoty se používají pro meteorologické veličiny, neboť aritmetický průměr nahrazuje hodnoty všech prvků tak, aby se nezměnil celkový úhrn hodnot znaku a zároveň je využíván pro hodnoty z nich odvozené, jako jsou úhrnné hodnoty, např. hodinový úhrn [96], který je využit v navrženém modelu. Vstupní hodnoty jsou reprezentovány maticí příslušných vektorů za jednotlivé dny ($\vec{I}_{PO,2007}, \vec{I}_{\dot{U}T,2007}, \dots, \vec{I}_{NE,2015}$) z nichž jsou vypočteny vektory průměrných hodnot $\vec{\bar{I}}$.

8.3.4 Analýza parametrů pro vybraný týden

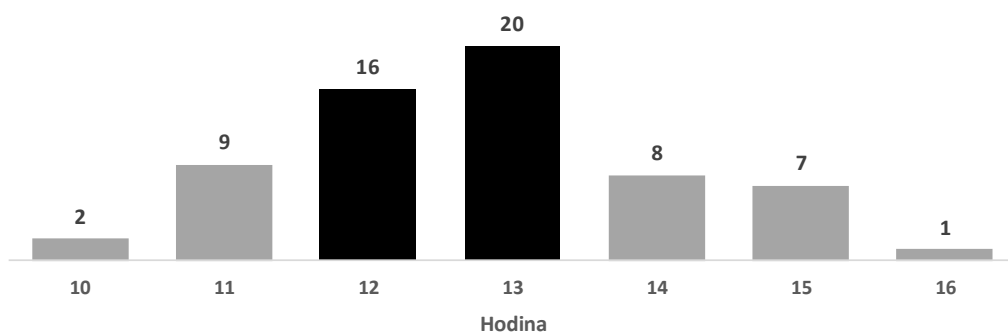
Pro kalkulaci parametrů navrženého modelu byl vybrán 19. týden. Důvodem pro výběr je, že se blíží průměrným hodnotám variační koeficient V_x a míra nesouměrnosti S v rámci celého sledovaného období let 2007 až 2015 a 19. týden je v oblasti růstu hodnot \bar{T}_v a \bar{I}_{den} . Charakteristiky variační koeficient V_x , směrodatná odchylka S_x a průměrná absolutní odchylka d pro 19. týden jsou zobrazeny na Obr. 30. Tento týden je stabilní v rámci denního chodu intenzity slunečního záření, jak ukazuje denní profil.

Hodnoty denního chodu průměrných hodnot intenzity slunečního záření představují vstupní vektor $\vec{I}_{l,w19}$ pro výpočet koeficientů růstu (viz. rovnice (7-14)), které jsou určující pro stanovení parametrů kubické spline funkce podle rovnice (7-10).

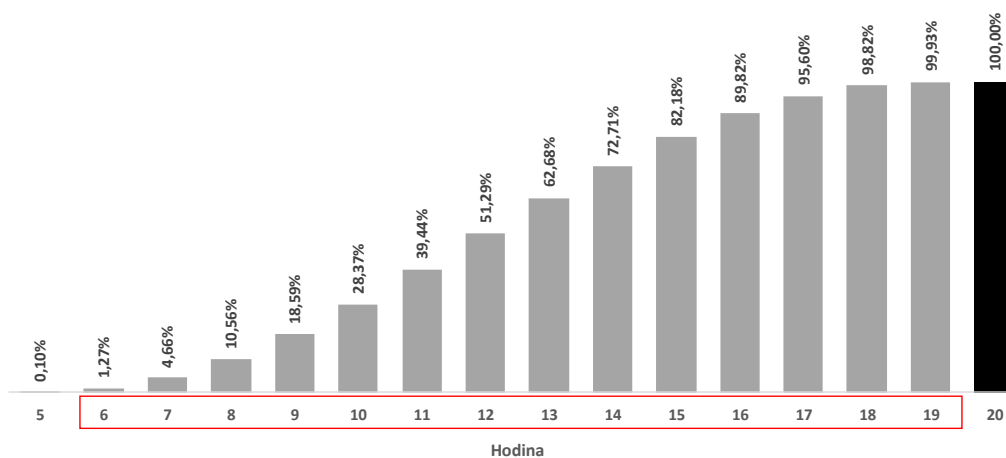


Obr. 30 Denní profil pro 19.týden (charakteristiky \bar{x} , V_x , d)

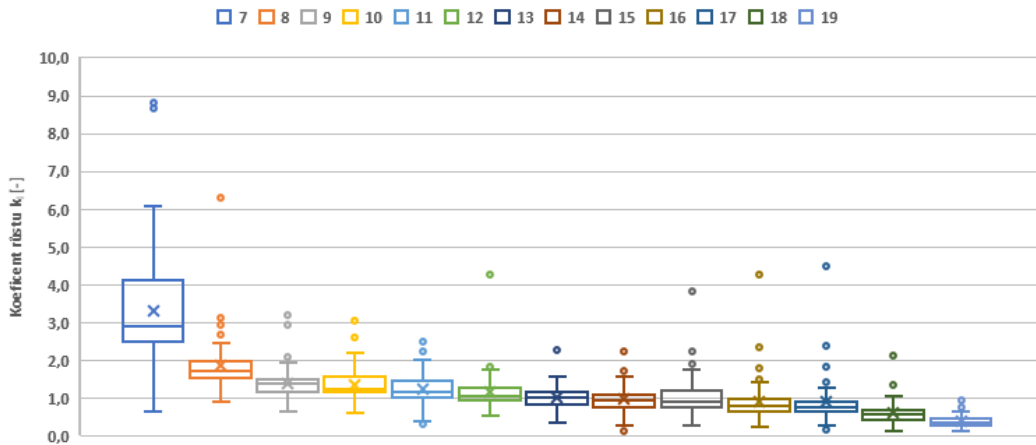
Četnost výskytu maximální denní hodnoty I určuje významné hodiny, kdy lze předpokládat dosažení maximálních hodnot I_i ukazuje Obr. 31. Četnost výskytu globálního maxima denního profilu I za sledované období nastává v 57% případu mezi 12 a 13 hodinou. Jestliže pásmo pravděpodobnosti výskytu nad 70 %, pak globální maximum nastává mezi 11 a 13 hodinou (viz Obr. 32).



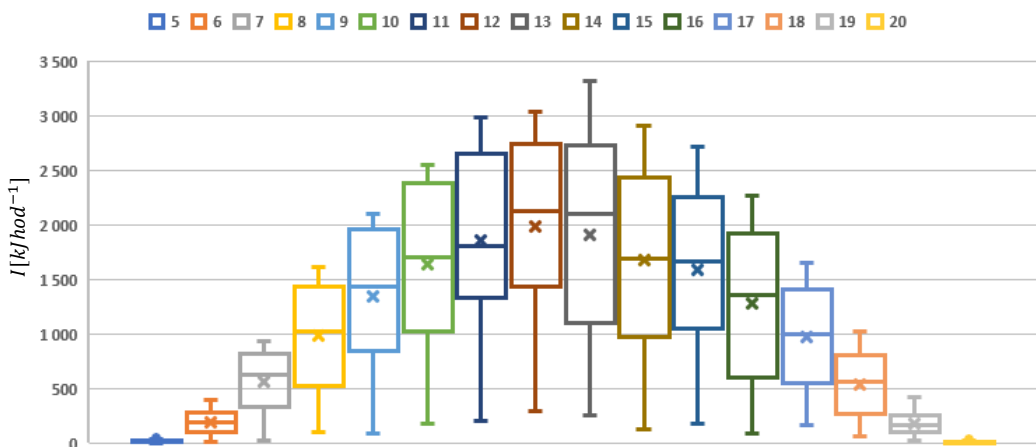
Obr. 31 Četnost výskytu globálního maxima v čase T_v pro 19.týden



Obr. 32 Procentní přírůstek kumulované hodnoty pro I_{hod}

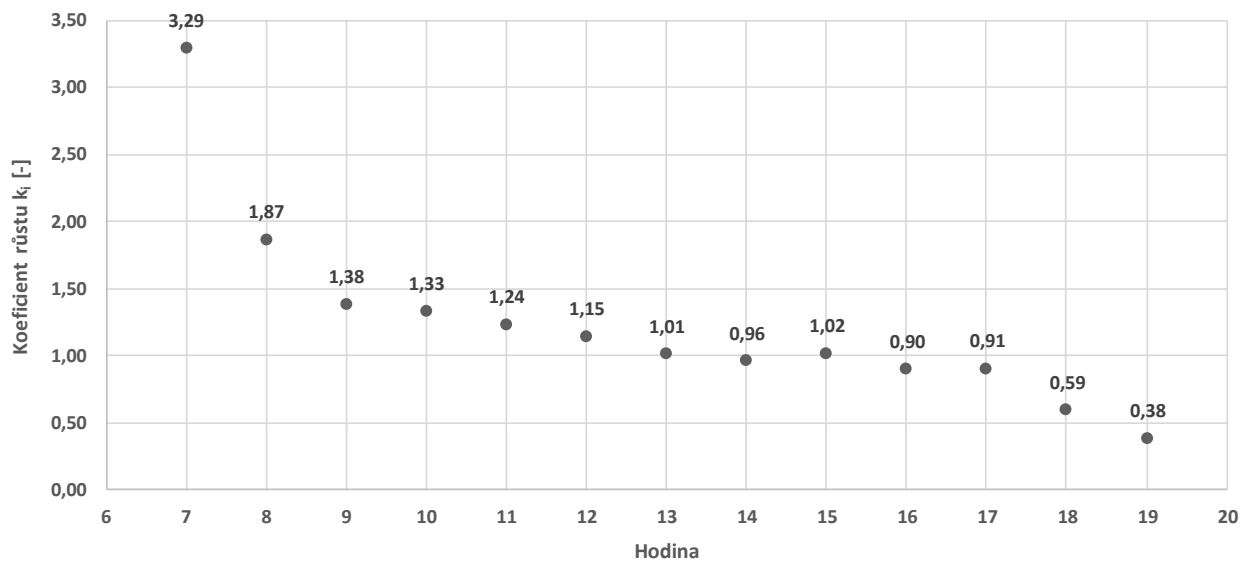


Obr. 33 Krabicový graf koeficientu růstu intenzity slunečního záření



Obr. 34 Krabicový graf hodinových průběhů intenzity slunečního záření

Výsledné hodnoty parametrů na bázi koeficientů růstu pro odvození hodnoty $s_{3,k}(x)$ jsou zobrazeny na Obr. 33, hodnoty pro výpočet parametrů kubické spline funkce (7-8) jsou uvedeny Tab. 10.



Obr. 35 Průměrný koeficient růstu pro časové pásmo 7:00 až 19:00

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
x_k	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
y_k	3,29	1,87	1,38	1,33	1,24	1,15	1,01	0,96	1,02	0,90	0,91	0,59	0,38

Tab. 10 Vstupní data pro výpočet spline funkce

Vypočtené koeficienty M_i podle rovnice (7-10) uvádí Tab. 11.

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}
11,36	5,02	4,32	9,38	-12,08	11,64	-9,7	50,86	-170,34	652,88	-2421,32

Tab. 11 Koeficienty M_i pro stanovení kubické spline funkce

Upravená rovnice (7-8) pro stanovení kubické spline funkce v jednotlivých intervalech je:

$$s_{3,k}(x) = M_{k-1} \frac{(x_k - x)^3}{6} + M_k \frac{(x - x_{k-1})^3}{6} + \left(y_{k-1} - \frac{M_{k-1}}{6} \right) (x_k - x) + \left(y_k - \frac{M_k}{6} \right) (x - x_{k-1}) \quad (7-18),$$

kde $M_0 = M_{12} = 0$, pro $k = 0, 1, \dots, 12$.

Výpočtem jsou pro jednotlivé intervaly získány následující rovnice:

$$s_{3,k}(x) = \begin{cases} \frac{142}{75}(x-7)^3 + \frac{329}{100}(8-x) - \frac{7}{100}(x-7), x \in \langle 7; 8 \rangle \\ \frac{142}{75}(9-x)^3 + \frac{251}{300}(x-8)^3 - \frac{7}{300}(9-x) + \frac{163}{300}(x-8), x \in \langle 8; 9 \rangle \\ \frac{251}{300}(10-x)^3 + \frac{18}{25}(x-9)^3 + \frac{163}{300}(10-x) + \frac{61}{100}(x-9), x \in \langle 9; 10 \rangle \\ \frac{18}{25}(11-x)^3 + \frac{469}{300}(x-10)^3 + \frac{61}{100}(11-x) - \frac{221}{200}(x-10), x \in \langle 10; 11 \rangle \\ \frac{469}{300}(12-x)^3 - \frac{151}{75}(x-11)^3 - \frac{97}{300}(12-x) + \frac{949}{300}(x-11), x \in \langle 11; 12 \rangle \\ -\frac{151}{75}(13-x)^3 + \frac{97}{50}(x-12)^3 + \frac{949}{300}(13-x) - \frac{93}{100}(x-12), x \in \langle 12; 13 \rangle \\ \frac{97}{50}(14-x)^3 - \frac{97}{60}(x-13)^3 - \frac{93}{100}(14-x) + \frac{773}{300}(x-13), x \in \langle 13; 14 \rangle \\ -\frac{97}{60}(15-x)^3 + \frac{2543}{300}(x-14)^3 + \frac{773}{300}(15-x) - \frac{2237}{300}(x-14), x \in \langle 14; 15 \rangle \\ \frac{2543}{300}(16-x)^3 - \frac{2839}{100}(x-15)^3 - \frac{2237}{300}(16-x) + \frac{2929}{100}(x-15), x \in \langle 15; 16 \rangle \\ -\frac{2839}{100}(17-x)^3 + \frac{8161}{75}(x-16)^3 + \frac{2929}{100}(17-x) - \frac{32371}{300}(x-16), x \in \langle 16; 17 \rangle \\ \frac{8161}{75}(18-x)^3 - \frac{60533}{150}(x-17)^3 - \frac{32371}{300}(18-x) + \frac{121243}{300}(x-17), x \in \langle 17; 18 \rangle \\ -\frac{60533}{150}(19-x)^3 + \frac{121243}{300}(19-x) + \frac{19}{50}(x-18), x \in \langle 18; 19 \rangle \\ 0, x \in \langle 0; 7 \rangle \cup \langle 19; 24 \rangle \end{cases} \quad (7-19).$$

8.3.5 Simulace

Ověření modelu je provedeno na vstupních datech představující jednotlivé dny v 19. týdnu pro roky 2007 až 2015 a zároveň na datech 19. týdne pro roky 2016 a 2017, které nebyly zahrnuty do výpočtu parametrů kubické spline funkce.

Pro simulaci nad hodnotami průběhů pro roky 2007 až 2015 byly použity vektory naměřených hodnot pro jednotlivé dny ($\overrightarrow{I_{PO,2007}}, \overrightarrow{I_{ÚT,2007}}, \dots, \overrightarrow{I_{NE,2015}}$) denního chodu I_i . Pro účely simulace nedošlo k nahrazení vychýlených hodnot lineární interpolací tak, jako tomu bylo při stanovení

parametrů navrženého modelu (kapitola 8.2.4). Jedná se o původní naměřené hodnoty, na kterých byl vypočten příslušný hodinový úhrn I_i .

Model je definován rovnicí (7-15):

$$x_t = s_{3,t}(t)x_{t-1} + u_t$$

, kde $u_t \sim N(0,1)$ je náhodná chyba modelu s normovaným normálním rozdělením, $s_{3,t}(t)$ je kubický spline, x_{t-1} je hodnota z předchozího časového období.

Pro generování náhodné chyby je použit algoritmus

$$u_t = \sqrt{-2 \ln u_{(0,1)}} \cos(\pi v_{(0,1)}) \quad (7-20),$$

kde $u_{(0,1)}, v_{(0,1)}$ jsou náhodná nezávislá čísla [102].

Chyba modelu je definována vzorcem

$$e_i = \frac{X_{Ri} - X_i}{X_{Ri}} \quad (7-21),$$

kde X_i je teoretická hodnota získána výpočtem a X_{Ri} představuje reálnou naměřenou hodnotu. Rozdíl $X_{Ri} - X_i$ představuje diferenci mezi teoretickou a naměřenou hodnotou.

Průměrnou chybu pak určíme jako průměrem dílčích chyb na základě jednotlivých hodnot I :

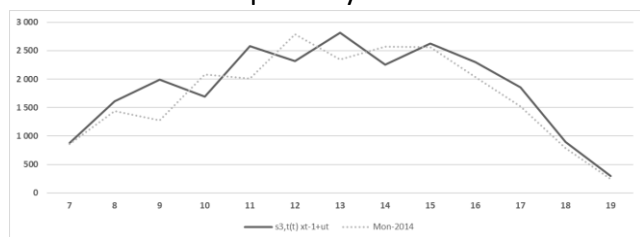
$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (7-22).$$

Průměrná chyba simulace pro 19. týden v letech 2007 až 2017 vychází pro časové pásmo 7 až 19 hodina $\bar{e} = 0,362936$ a pro kritické časové pásmo 10 až 16 hodiny $\bar{e}_{10-16} = 0,359523$. Detailní hodinové hodnoty jsou uvedeny v tabulce Tab. 12.

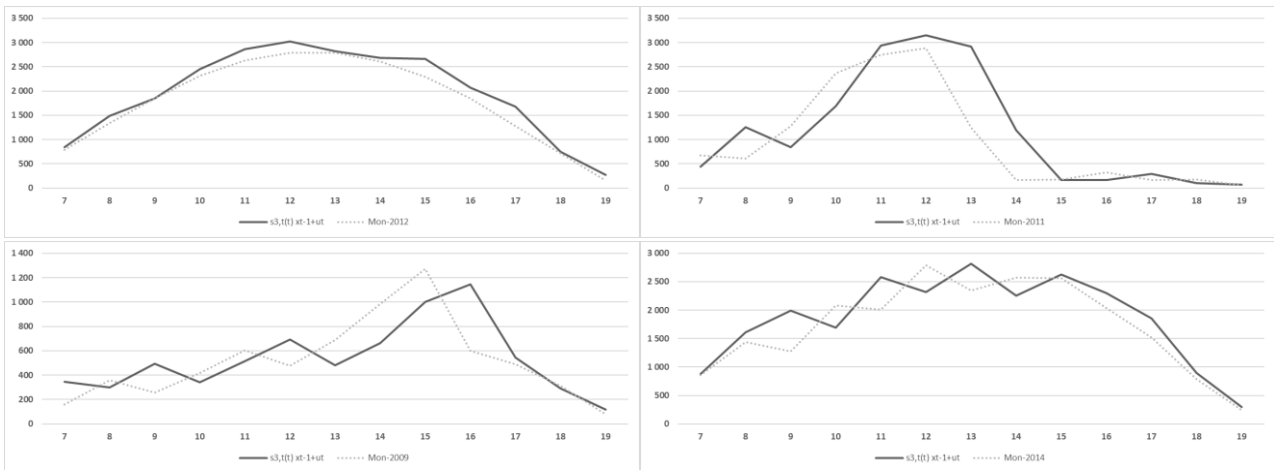
Hod	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
\bar{e}	0,48	0,23	0,20	0,26	0,31	0,27	0,32	0,53	0,39	0,44	0,47	0,43	0,40

Tab. 12 Průměrná chyba modelu pro období 2007 až 2015 (19. týden)

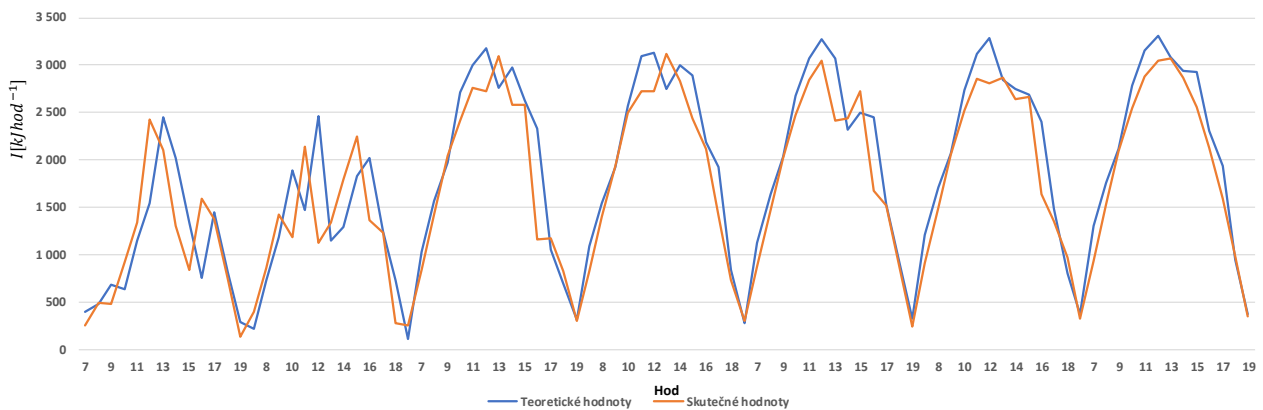
Jednotlivé průběhy ověření pro vybrané dny ukazuje



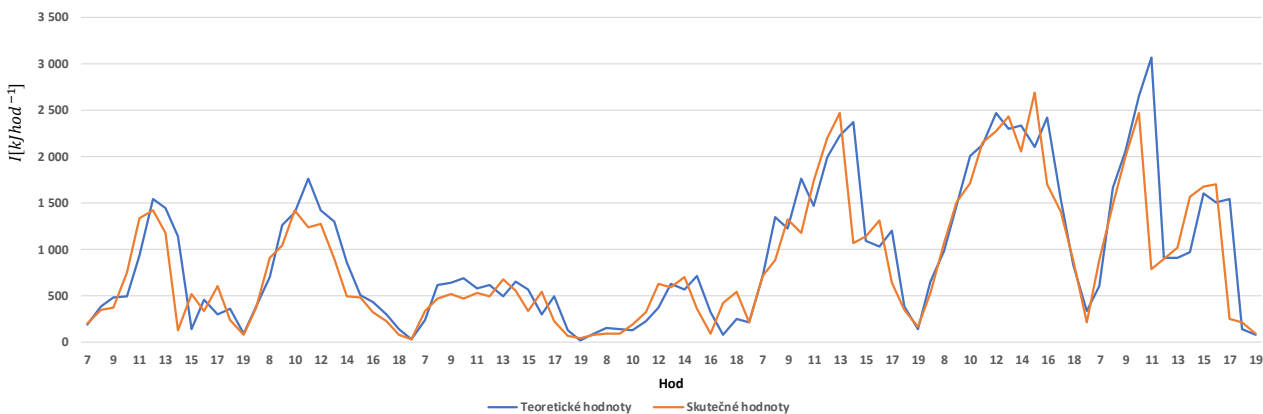
Obr. 36. Ukázka ověření pro roky 2008 a 2010 jsou zobrazeny na Obr. 37 a Obr. 38.



Obr. 36 Výstupy prediktivního modelu intenzity slunečního záření pro vybrané dny



Obr. 37 Výpočet prediktivního modelu pro rok 2008



Obr. 38 Výpočet prediktivního modelu pro rok 2010

Hodnota průměrné chyby pro 19. týden v roce 2016 je 0,24 a pro rok 2017 je na úrovni 0,25 (detail je uveden v Tab. 13).

Hod	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
\bar{e}_{2016}	0,55	0,08	0,26	0,20	0,22	0,30	0,14	0,18	0,23	0,27	0,23	0,23	0,31
\bar{e}_{2017}	0,42	0,17	0,22	0,23	0,18	0,28	0,29	0,18	0,22	0,31	0,28	0,32	0,22

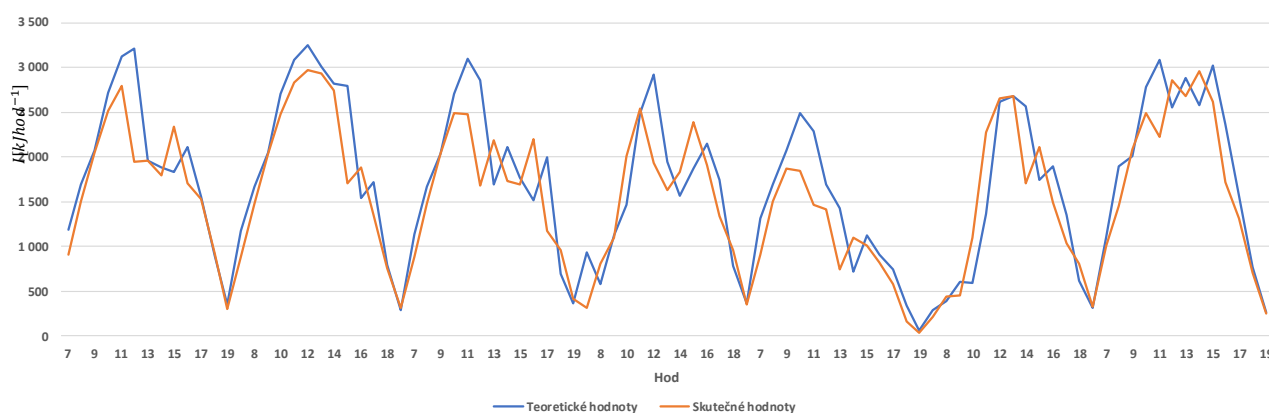
Tab. 13 Průměrná chyba pro jednotlivé hodiny v roce 2016 a 2017

8.4 SHRUTÍ

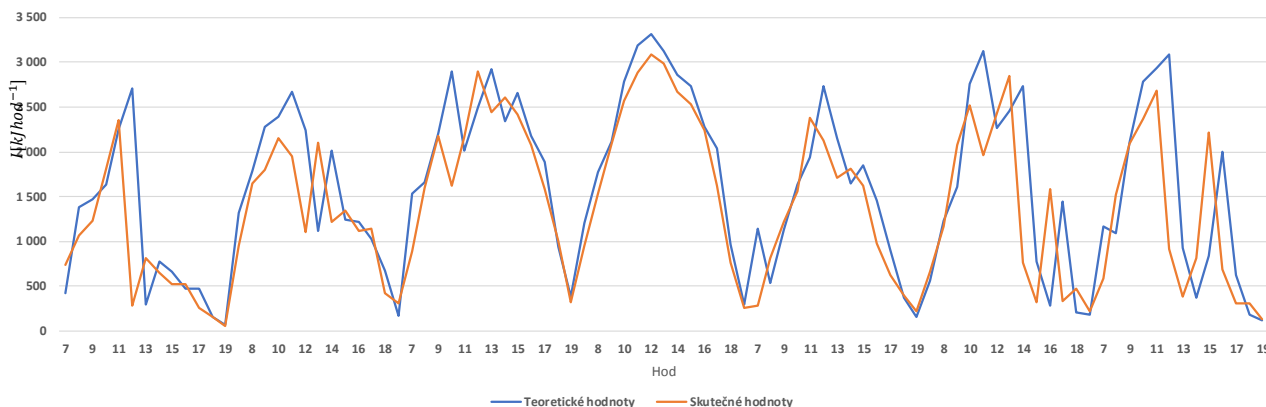
Navržená prediktivní funkce využívá náhradu koeficientu růstu intenzity slunečního záření prostřednictvím kubické spline funkce pro hodinové intervaly a je navržena na základě teoretické analýzy dat denního chodu intenzity slunečního záření v období 2007 až 2015. Výpočetní náročnost je minimalizována pomocí stanovených parametrů kubické spline funkce a následně zpracována do individualizovaného algoritmu. Tento postup lze aplikovat na libovolnou lokalitu, a to buď při využití historických dat anebo díky korelaci mezi denním chodem teploty a intenzitou slunečního záření lze odvodit funkci $I_i = f(T_i)$. Tímto postupem je možno inicializovat predikci a postupně vytvářet historické časové řady pro zpřesnění budoucích výpočtů nastavení parametrů spline funkce.

Při umístění pyranometru do lokalit, kde dochází k masivnímu připojování solárních elektráren, může provozovatel DS měřit a zaznamenávat denní průběh intenzity slunečního záření a postupně si vytvářet denní vektory chodu intenzity a na základě těchto hodnot stanovit predikci vývoje intenzity v čase pro danou lokalitu a tím pádem získá možnost reagovat na simulované výkyvy vhodným nápravným opatřením pro zajištění stabilního chodu DS.

Cílem analýzy bylo navrhnout výpočetně nenáročný postup, který by bylo možné aplikovat do mechanismů pro řízení spotřeby elektrické energie na úrovni domácnosti a zároveň nebude vyžadovat dodatečné technické vybavení v podobě měřících sond a další řídicí a komunikační jednotky.



Obr. 39 Ověření modelu (skutečné vs. teoretické hodnoty) pro rok 2016



Obr. 40 Ověření modelu (skutečné vs. teoretické hodnoty) pro rok 2017

Navržený prediktivní model na bázi kubické spline funkce byl ověřen na naměřených hodnotách intenzity v 19. týdnu pro období 2016 a 2017. Toto období nebylo použito pro stanovení parametrů modelu, aby se na něm mohl model reálně ověřit. Simulace vykazovala průměrnou chybou 0,245. Jak znázorňuje Obr. 39 a Obr. 40, predikce efektivně kopíruje skutečný průběh naměřené hodnoty. Diferenci mezi teoretickou a naměřenou hodnotou pro účely dalšího využití navržené metody lze považovat v rozsahu přesnosti, má zajímavý potenciál pro rozšíření modelu.

Metodický postup stanovení prediktivní funkce zahrnuje následující kroky:

1. Výběr vstupních dat, kapitola 8.2.1(ověření podmínky (7-1))
2. Kontrola vychýlených hodnot, kapitola 8.2.4 (stanovení intervalu podle (7-7))
3. Stanovení parametrů kubické spline funkce, kapitola 8.3.2 (soustava lineárních rovnic (7-12), (7-13))
 - i. Stanovení intervalů pro potřeby výpočtů parametrů rovnice (7-8)
 - ii. Výpočet parametrů kubické spline funkce pomocí soustavy lineárních rovnic (7-12)
 - iii. Výpočet koeficientů růstu použitím rovnice (7-14)
4. Výpočet modelu predikce (rovnice (7-15) se zakomponovanou náhodností podle (7-20)

Metoda predikce intenzity slunečního záření s využitím spline funkce, včetně výsledků simulace metody s využitím reálných naměřených hodnot bylo publikováno:

HRŮZA, T.: **PREDIKCE INTENZITY SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ S VYUŽITÍM INTERPOLACE POMOCÍ SPLINE FUNKCE**. Energetika, ISSN 0375-8842, 1, 2018, ročník 68, strana 56-60.

Výsledky analýzy intenzity slunečního záření a parametrů ovlivňující efektivitu FV panelů bylo autorem publikováno:

HRŮZA, T.: **ANALYSIS OF SOLAR RADIATION AND PV PANEL EFFICIENCY AT PRAGUE SUCHDOL, March 29-31, 2017 London**, ISBN 978-0-9935191-4-7, Proceedings and Research Track of the 7th Biannual CER Comparative European Research Conference CER 2017 (issue I.), pp 44-47. Collection of selected peer-reviewed papers presented at the 7th international scientific conference Comparative European Research – CER 2017 (issue I, March 29-31, 2017). ISBN 978-0-9935191-4-7.

9 REKAPITULACE A ZHODNOCENÍ STANOVENÝCH CÍLŮ

9.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÍ CÍLŮ PRÁCE

Výzkumný problém, který byl definován pro předkládanou disertační práci v podobě návrhu modelu řízení inteligentní sítě domácnosti zaměřeného na optimalizaci spotřeby elektrické energie na bázi individuální poptávky od jednotlivých zařízení, byl vyřešen v rámci zvoleného postupu.

Propojení výzkumného problému s prioritní oblastí energetických úspor má praktické využití a jeho rozvoj je podporován ze strany orgánů Evropské unie a představuje priority vlády České republiky.

Hlavních cílů práce nastavených v souladu s výzkumným problémem bylo dosaženo.

V práci byla provedena analýza aktuálního stavu poznání a na základě syntézy bylo navrženo řešení výzkumného problému prostřednictvím nastavených cílů.

Hlavní cíl č. 1 „Navrhnout konceptuální model inteligentní sítě domácnosti zaměřený na optimalizaci využívání zdrojů elektrické energie“ se podařilo naplnit prostřednictvím:

- vymezení pojmu inteligentní domácnost (cíle bylo dosaženo v kapitole 5);
- návrhu modelu inteligentní domácnost s využitím matematického aparátu pro jeho popis (cíle bylo dosaženo v kapitole 5);
- návrhu základního rámce řídicího protokolu, jehož úkolem je zajistit komunikaci mezi jednotlivými zařízeními zapojenými do inteligentní domácnosti (cíle bylo dosaženo v kapitole 0).

Jednotlivé dílčí cíle přispěly k dosažení hlavního cíle č. 1 a bylo jich dosaženo takto:

Dílčí cíl číslo 1.A „Vytvoření popisného aparátu pro vymezení modelu“ byl splněn prostřednictvím:

- stanovení definice domácnosti pro účely vymezení celé práce a vytvoření vhodného aparátu pro konceptuální model (cíle dosaženo v kapitole 5.2);
- návrh popisného aparátu pro vytvoření konceptuálního modelu (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.2);
- vymezením předpokladů modelu inteligentní domácnosti (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.4);
- vytvořením typových kategorií zařízení zapojených do inteligentní sítě domácnosti (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.6).

Dílčí cíl číslo 1.B „Navrhnout způsob objektivního ohodnocování významu jednotlivých zařízení pro potřeby přidělování elektrické energie“ byl realizován prostřednictvím:

- identifikace vhodného aparátu pro objektivní posouzení významu zařízení, která žádají o elektrickou energii (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.3.2);
- odvození preferenčního modelu využívající vhodný aparát objektivizace posuzování požadavků (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.3.3);

- odvození časové dimenze do preferenčního systému (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.3.4).

Dílčí cíl číslo 1.C „Zajistit efektivní balancování spotřeby elektrické energie s využitím omezujících podmínek pro vhodný mix výroby a dodávky elektrické energie na úrovni domácnosti“ byl dosažen:

- nastavením charakteristik modelu a chování okolí modelu (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.4);
- stanovením chování modelu (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.5);
- vytvoření modelu nabídky a poptávky po elektrické energii uvnitř inteligentní domácnosti (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.5.1);
- vytvořením energetického modelu inteligentní domácnosti (cíle bylo dosaženo v kapitole 6.5.2).

Dílčí cíl číslo 1.D „Navrhnout základní architekturu komunikačního uzlu s ohledem na řídicí protokol inteligentní sítě domácnosti“ byl realizován:

- stanovením požadavků na popis řídicího komunikačního protokolu (cíle bylo dosaženo v kapitole 7.1);
- určením požadavků na nástroj pro návrh a simulaci řídicího komunikačního protokolu (cíle bylo dosaženo v kapitole 7.2);
- vytvořením základního konceptu architektury komunikačního uzlu pro realizaci algoritmů řízení poptávky a nabídky (cíle bylo dosaženo v kapitole 7.4).

Hlavního cíle č. 2 „Vytvořit vhodný predikční model pro objem výroby elektrické energie dodávané z fotovoltaického zdroje zapojeného do inteligentní domácnosti“ bylo dosaženo prostřednictvím:

- analýzy vstupních veličin, návrhem predikční funkce na bázi kubického spline a simulace nad reálnými vstupními daty pro ověření vlastního návrhu predikční funkce (cíle bylo dosaženo v kapitole 0).

Naplnění hlavního cíle č.2 bylo dosaženo prostřednictvím těchto dílčích cílů:

Dílčí cíl číslo 2.A „Analyzovat veličiny ovlivňující schopnost predikce množství vyrobené elektrické energie“ a toho bylo dosaženo:

- analýzou vhodných vstupních dat pro predikci výroby FV zdroje jako funkce intenzity slunečního záření (cíle bylo dosaženo v kapitole 8.1);
- analýzou závislostí intenzity slunečního záření na ostatních klimatologických veličinách (cíle bylo dosaženo v kapitole 8.2).

Dílčí cíl číslo 2.B „Navrhnout vhodný prediktivní model“ byl realizován:

- identifikací vhodného matematického aparátu pro prediktivní model (cíle bylo dosaženo v kapitole 8.3.1);
- odvozením prediktivního modelu (cíle bylo dosaženo v kapitole 8.3.2);
- návrhem prediktivní funkce (cíle bylo dosaženo v kapitole 8.3.3);

- ověřením prediktivní funkce simulací nad reálnými vstupními daty (cíle bylo dosaženo v kapitolách 8.3.4 a 8.3.5).

9.2 VYMEZENÍ VLASTNÍHO PŘÍNOSU

Konceptuální model inteligentní domácnosti je navržen tak, aby byl schopen efektivně reagovat na změny v poptávce a nabídce elektrické energie v prostředí domácnosti. Základní koncept vychází z ekonometrické teorie řízení poptávky a nabídky, kdy se hledá takový rovnovážný stav, aby bylo uspokojeno co největší množství poptávané elektrické energie při zajištění nejvyšší míry užítka domácnosti reprezentované preferenčním schématem. **Zvolený přístup propojuje technický pohled v podobě stanoveného modelu a ekonometrický přístup kvantifikující nabídku a poptávku s využitím preferencí.** Zavedením preferenčního modelu dochází ke kvantifikaci užítka jako přínosu funkčnosti konkrétního zařízení pro domácnost (kapitola 6.3.3).

Cílem systému je přizpůsobit současnou spotřebu ke stávajícím zdrojům, a to jak interních v rámci domácnosti, tak k externímu zdroji realizovaném v podobě zajištěné dodávky elektrické energie z lokální distribuční soustavy. **Cílem modelu je zajistit rovnováhu mezi nabídkou a poptávkou reprezentovanou bilanční rovnicí** (rovnice (6-19), kapitola 6.5.1). Takto zvolený postup umožňuje nastavit omezení systému na objem elektrické energie dodávaný do systému a zároveň individualizovat přístup v rámci konkrétních časových intervalů. V aplikaci tohoto postupu je vlastní inovativní přínos předkládané práce.

Individualizovat užitek jednotlivých zařízení v čase v rámci vymezených časových intervalů představuje nový pohled na výzkumný problém. Pro kvantifikaci preferencí zařízení na základě několika faktorů bylo dokázáno, že časová preference rozhodování systému neovlivňuje (kapitola 6.3.4). Tento postup představuje další aspekt vlastního přínosu práce ke stavu poznání.

K teoretickému poznání přispívá i exaktní vymezení pojmu domácnost (kapitola 5.2), které představuje komplexní architekturu skládající se ze dvou fyzických vrstev v podobě energetické a komunikační sítě a logické řídicí vrstvy, která zajišťuje realizaci rozhodovacích algoritmů v jednotlivých uzlech na základě výměny informací nutných pro rozhodování. Podmínkou nezávislosti na konkrétních technologických standardech pro možnost dalšího rozvoje modelu byl motivován návrh komunikačního modelu (kapitola 7.4). Tato motivace byla podpořena požadavkem na zajištění vyšší míry budoucí interoperability komunikace mezi prvky zapojenými do inteligentní domácnosti podle předloženého návrhu.

Při návrhu prediktivního modelu bylo v analytické části (kapitola 8.2.2) **dokázáno, že lze pro intenzitu slunečního záření aplikovat identické postupy jako pro analýzu chodu denní teploty** včetně stanovení období růstu a poklesu teplot. Důkaz odvozený v kapitole 8.2.2 představuje jeden ze základních přínosů autora využitý následně v části návrhu prognostické funkce.

Využití koeficientu růstu standardizovaného denního chodu intenzity slunečního záření pro **určení parametrů kubické spline funkce na stanovených časových intervalech poskytuje dostatečně spolehlivé výsledky a zároveň je stabilní oproti extrémním hodnotám.** Výpočetní náročnost pro aplikaci modelu je minimalizována díky dopředu vypočteným parametrům spline funkce a následně

zpracována do individualizovaného algoritmu pro jednotlivé týdny realizujícího pouze výpočty polynomu 3. stupně pro aktuální časový interval. Použití kubické spline funkce (kapitoly 8.3.1 a 8.3.2) v oblasti predikce růstu nebo poklesu intenzity slunečního záření je hlavním přínosem této práce.

9.3 NÁMĚTY NA DALŠÍ SMĚRY VÝZKUMU V DANÉ OBLASTI

Na základě řešené výzkumné otázky byly identifikovány směry dalšího výzkumu ve třech oblastech představující:

1. **preferenční funkce,**
2. **komunikační řídicí protokol a**
3. **využití prediktivní funkce kubického spline do oblasti predikce objemu vyrobené elektrické energie z připojených fotovoltaických elektráren výkonu do 10kW zapojených do konkrétní elektrické přípojky lokální distribuční soustavy.**

Nosným námětem zaměření dalšího výzkumu představují kategorie zařízení definované v kapitole 6.6. Jejich další rozpracování do přesnějších preferenčních funkcí umožní zpřesnit rozhodovací mechanismus a zároveň zvýší efektivitu v oblasti spotřeby elektrické energie a rozložení zátěže v čase.

Využití prostředků návrhu řídicí logiky vystavěné na standardizovaných nástrojích návrhu a simulace komunikačních protokolů přibližuje návrh k otevřeným standardům. Použití jazyka Estelle jako nástroje pro návrh a simulaci distribuovaného systému umožňuje snadnou implementaci řídicí logiky postavené na protokolech TCP/IP a tím i snadné rozšíření funkčnosti modelu řízení. Volba platformě nezávislého návrhu je benefitem snadné implementace v budoucnu v rámci tzv. Universal/Home Plug and Play konceptů. Rozpracování řídicí logiky v oblasti návrhu komunikačního protokolu s cílem užší integrace s uvedenými koncepty vnímá autor jako další oblast aplikačního rozvoje návrhu směrem k podpoře otevřených standardů (v souladu s doporučením podle kapitoly 7.3).

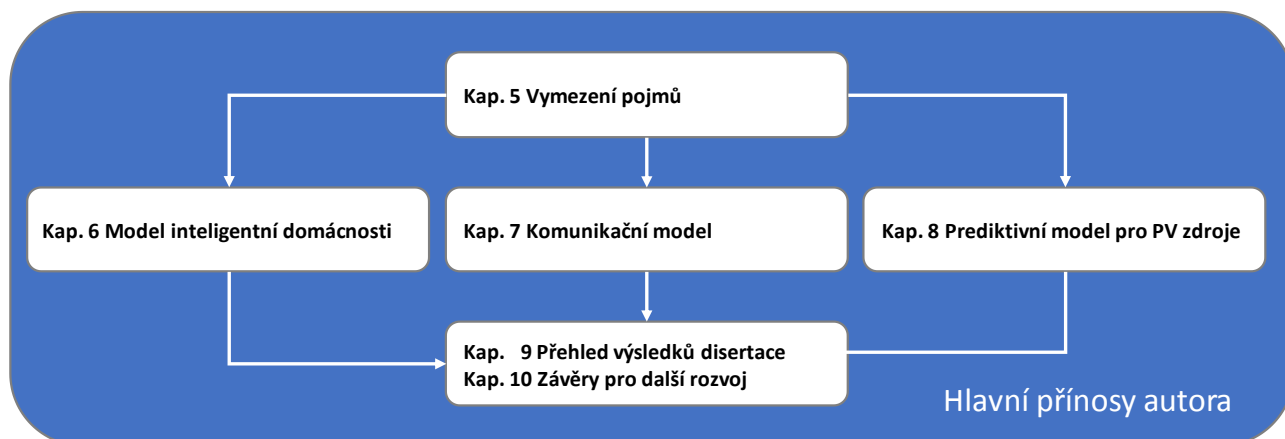
Jako příležitost dalšího výzkumu v oblasti prediktivního modelu se nabízí korekce průběhu intenzity slunečního záření oproti vektoru standardizovaných průběhů, který by automaticky prováděl korekce na základě odchylek hodnot vektoru od naměřených hodnot. Možností, jak u modelu zvýšit jeho přesnost tkví v použití fuzzy logiky, která může pro kubickou spline funkce přinést neurčitost do výpočtu a teoreticky větší schopnost reagovat na vychýlené hodnoty bez nutnosti při stanovení parametrů kubické spline funkce provádět jejich korekci.

Pro využití prediktivního modelu pro odhad růstu výroby z fotovoltaických elektráren výkonu do 10kW v závislosti na odhadovaném trendu změny intenzity slunečního záření je vhodné provést pilotní ověřovací měření na úrovni elektrických stanic lokální distribuční soustavy a vytvořit metodu vycházející z měření geograficky rozdílných bodů.

10 ZÁVĚR

Přínosy realizované práce jsou zaměřeny jak na rozvoj teoretické v oblasti inteligentních sítí v podobě návrhu konceptuálního modelu a příslušného popisného aparátu, tak v oblasti praktické,

kdy je navržen algoritmus optimalizace řízení poptávky ze strany jednotlivých zařízení a nabídky interních zdrojů a dodávky z lokální distribuční soustavy.



Obr. 41 Vymezení vlastního přínosu disertační práce

Přínosy práce v oblasti rozvoje teoretické jsou realizovány prostřednictvím:

- návrhu konceptuálního modelu,
- teoretického vymezení rámce modelu,
- terminologického vymezení domácnosti,
- popisného aparátu pro modelování inteligentní domácnosti,
- návrhu preferenčních schémat pro optimalizaci nabídky a poptávky v rámci inteligentní domácnosti,
- návrhu predikčního modelu na základě analýzy vstupních dat.

Přínosy práce pro praktické využití jsou realizovány:

- predikčním modelem pro odhad intenzity slunečního záření s využitím funkce kubický spline,
- algoritmem řídicí optimální rozložení zdrojů na bázi preferenčních schémat,
- doporučením struktury řídicího protokolu inteligentní domácnosti.

Klíčové inovativní oblasti předkládané práce představují odvození preferenčního systému (kapitola 6.3.3) a využití kubické spline funkce pro predikci vývoje intenzity slunečního záření (kapitola 8.3.3). Preferenční systém je inovativní ve způsobu jeho odvození a použití pro optimalizaci spotřeby elektrické energie domácnosti. Použití kubické spline funkce je unikátní s ohledem na její vlastnost spojitě derivace v hraničních bodech intervalů.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] P. Toman, J. Drápela, S. Mišák, J. Orságová, M. Paar a D. Topolánek, Provoz distribučních soustav, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [2] „Zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon),“ Praha, 2000.
- [3] *Úplné znění zákona č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně*, 2009.
- [4] Department of Energy and Climate Change UK, "Smart grid: the opportunity," 2009. [Online]. Available: www.decc.gov.uk. [Accessed 28 6 2017].
- [5] Department of Energy U.S., "Smart grid system report," 2009. [Online]. Available: www.doe.energy.gov. [Accessed 28 6 2017].
- [6] European Technology Platform, "SmartGrids—Strategic Deployment Document for European Electricity Network of the Future," April 2010. [Online]. Available: <http://www.smartgrids.eu/ETP Documents>. [Accessed 20 August 2014].
- [7] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, „Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG),“ MPO, Praha, 2015.
- [8] M. p. a. o. ČR, „Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG),“ 9 6 2015. [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/dokument156514.html>. [Přístup získán 15 1 2017].
- [9] „Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů,“ 2012.
- [10] Česká zemědělská univerzita v Praze, „Meteorologická stanice České zemědělské univerzity v Praze,“ ČZU Praha, [Online]. Available: <http://meteostanice.agrobiologie.cz/>. [Přístup získán 24 11 2016].
- [11] EUROSTAT, "Electricity consumption by industry, transport activities and households/services (GWH)," EUROSTAT, 2017. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=ten00094>. [Accessed 5 1 2018].
- [12] A. de Almeida, P. Fonseca and B. Schloman, "Characterization of the household electricity consumption in the EU, potential energy savings and specific policy recommendations," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 8, pp. 1884-1894, 2011.
- [13] Státní energetická koncepce ČR, „Státní energetická koncepce ČR,“ Praha, 2010.

- [14] S. Karnouskos and T. N. de Holanda, "Simulation of a Smart Grid City with Software Agents," in *Third UKSim European Symposium on on Computer Modeling and Simulation*, Athens, 2009.
- [15] D. Kirschen and G. Strbac, *Fundamental of Power System Economics*, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [16] S. Hunt and G. Shuttleworth, *Competition and Choice in Electricity*, Wiley, 1997.
- [17] European Parliament and Council, *European End-Use Energy Efficiency and Energy Services Directive*, 2006.
- [18] ERÚ, „www.eru.cz,“ [Online]. Available: www.eru.cz. [Přístup získán 25 11 2015].
- [19] European Commission, "Clean Energy For All Europeans," 30 10 2016. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/news/commission-proposes-new-rules-consumer-centred-clean-energy-transition>. [Accessed 14 2 2017].
- [20] European Commission, "Energy Efficiency," [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency>. [Accessed 27 11 2017].
- [21] M. Caramanis, R. Bohn a F. Schweppe, „Optimal spot pricing: practice & theory,“ *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, sv. No.9, September 1982.
- [22] F. C. Schweppe, R. D. Tabors, J. L. Kirtley Jr, H. R. Outhred, F. H. Pickel and A. J. Cox, "Homeostatic utility control," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. No.3, pp. 1151-1163, May-June 1980.
- [23] P. Varaiya, F. Wu and J. Bialek, "Smart operation of smart grid: Risk-limiting dispatch," *IEEE*, vol. 99, no. 1, p. 40–57, 2011.
- [24] C. Block, D. Neumann and C. Weinhardt, "A market mechanism for energy allocation in micro-CHP grids," in *41st Hawaii International Conference on System Sciences*, Waikoloa, Big Island, Hawaii, 2008.
- [25] S. Karnouskos, A. Weidlich, J. Ringelstein, A. Dimeas, K. Kok, C. Warmer, P. Selzam, S. Drenkard, N. Hatziargyriou and V. Lioliou, "Monitoring and Control for Energy Efficiency in the Smart House," Athens, 2010.
- [26] Research project SmartHouse/SmartGrid, "Final architecture for SmartHouse/SmartGrid," 17 3 2011. [Online]. Available: www.smarthouse-smartgrid.eu. [Accessed 20 9 2014].
- [27] J. K. Kok, M. J. Scheepers and I. G. Kamphuis, "Intelligence in Electricity Networks for Embedding Renewables and Distributed Generation," in *Intelligent Infrastructures*, vol. 42, Springer, 2010, pp. 179-209.
- [28] S. Karnouskos and T. N. de Holanda, "Simulation of a Smart Grid City with Software Agents," in *Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, 2009.

- [29] K. C. BUDKA, J. G. DESHPANDE and M. THOTTAN, Communication networks for smart grids: making smart grid real, Computer communications and networks ed., London: Springer, 2014.
- [30] C. E. Adams, "Home Area Network Technologies," *BT Technology Journal*, vol. 20, no. 2, p. 53–72, 4 2002.
- [31] S. Saponara and T. Bacchillone, "Network Architecture, Security Issues, and Hardware Implementation of a Home Area Network for Smart Grid," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 2012, 2012.
- [32] S. LEE, J. KIM and T. SHON, "User Privacy-Enhanced Security Architecture for Home Area Network of Smartgrid," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 75, no. 20, pp. 12749-12764, 10 2016.
- [33] Z. Li and Q. Liang, "Capacity Optimization in Heterogeneous Home Area Networks With Application to Smart Grid," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 699-706, 2 2016.
- [34] P. Fox-Penner, Smart power : climate change, the smart grid, and the future of electric utilities, Washington: ISLANDPRESS, 2014.
- [35] M. G. Brosman, V. Bakker, A. Molderink, J. L. Hurink and G. J. Smith, "Planning the production of a fleet of domestic combined heat and power generators," *European Journal of Operational Research*, vol. 216, no. 1, p. 140–151, 2012.
- [36] F. P. Sioshansi, "(2011). So what's so smart about the smart grid?," *The Electricity Journal*, vol. 24, no. 10, pp. 91-99, 2011.
- [37] M. Hu, J. Weir a T. Wu, „Decentralized operation strategies for an integrated building energy system using a memetic algorithm,“ *European Journal of Operational Research*, sv. 217, č. 1, p. 185–197, 2012.
- [38] S. Karnouskos, A. Weidlich, J. Ringelstein, A. Dimeas, K. Kok, C. Warmer, P. Selzam, S. Drenkard, N. Hatziargyriou and V. Lioliou, "Monitoring and Control for Energy Efficiency in the Smart House," in *Proceedings of the 1st International ICTS Conference on E-Energy*, Athens, 2010.
- [39] K. Kok, S. Karnouskos, D. Nestle, A. Dimeas, A. Weidlich, C. Warmer, P. Strauss, B. Buchholz, N. Hatziargyriou and V. Lioliou, "Smart houses for a smart grid," in *Electricity Distribution 20th International Conference and Exhibition*, Prague, 2009.
- [40] European Technology Platform, „SmartGrids SRA 2035 Summary of Priorities for SmartGrids Research Topics,“ 19 June 2013. [Online]. Available: <http://www.smartgrids.eu/ETP Documents>. [Přístup získán 20 August 2014].
- [41] J. Hsu, S. Zahedi, A. Kansal, M. Srivastava and V. Raghunathan, "Adaptive Duty Cycling for Energy Harvesting Systems," in *International Symposium on Low Electronics and Design*, New York, 2006.
- [42] T. Zhu, A. Mishra, D. Irwin, N. Sharma, P. Shenoy and D. Towsley, "The Case for Efficient Renewable Energy Management for Smart Homes," in *Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings*, Seattle, WA, 2011.

- [43] C. Moser, L. Thiele, D. Brunelli and L. Benini, "Adaptive Power Management in Energy Harvesting Systems," in *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*, 2007.
- [44] S. Karnouskos, A. Weidlich, J. Ringelstein, A. Dimeas, K. Kok, C. Warmer, P. Selzam, S. Drenkard, N. Hatziargyriou and V. Lioliou, "Monitoring and Control for Energy Efficiency in the Smart House," Athens, 2010.
- [45] K. Kok, *The PowerMatcher: Smart Coordination for the Smart Electricity Grid*, Vols. SIKS Dissertation Series No.2013-17, Amsterdam: TNO, 2013.
- [46] K. Kok, S. Karnouskos, D. Nestle, A. Dimeas, A. Weidlich, C. Warmer, P. Strauss, B. Buchholz, N. Hatziargyriou and V. Lioliou, "Smart houses for a smart grid," in *20th International Conference on Electricity Distribution*, Prague, 2009.
- [47] C. W. Potter, A. Archambault and K. Westrick, "Building a smarter smart grid through better renewable energy information," in *Power Systems Conference and Exposition*, Seattle, WA, 2009.
- [48] D. Li and S. K. Jayweera, "Distributed Smart-Home Decision-Making in a Hierarchical Interactive Smart Grid Architecture," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 1, pp. 75-84, January 2015.
- [49] A. KWASINSKI, W. WEAVER and R. S. BALOG, *Microgrids and other local area power and energy systems*, Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [50] J. B. EKANAYAKE, *Smart grid: technology and applications*, Chichester: Wiley, 2012.
- [51] A. A. B. M. SHAWKAT, *Smart grids: opportunities, developments, and trends*, Green energy and technology ed., London: Springer, 2013.
- [52] F. Tariq and L. S. Dooley, "Smart Grid Communication and Networking Technologies: Recent Developments and Future Challenges," in *Smart grids: opportunities, developments, and trends*, London, Springer-Verlag, 2013, pp. 199-.
- [53] M. D. Hossain, A. M. Oo and A. B. Shawkat Ali, "Smart Grid," in *Smart grids: opportunities, developments, and trends*, London, Springer-Verlag, 2013, pp. 23-.
- [54] Š. Marcel, H. A. Thomas, D. D. Ewan and H. A. Ossenbrink, "Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries," *Solar Energy*, vol. 81, no. 10, pp. 1295-1305, 10 2007.
- [55] Český hydrometeorologický ústav, „Měsíční přehledy pozorování,“ [Online]. Available: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data>. [Přístup získán 24 1 2018].
- [56] V. QUASCHNING, *Obnovitelné zdroje energií*, Praha: Grada, 2010, 2010.
- [57] N. Sharma, P. Sharma, D. Irwin and P. Shenoy, "Predicting Solar Generation from Weather Forecasts Using Machine Learning," in *Smart Grid Communications*, Brussels, 2011.

- [58] J. P. Rothe, A. K. Wadhvani and S. Wadhvani, "Short Term Load Forecasting Using Multi Parameter Regression," *International Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 303-306, 2009.
- [59] B. s. Bisht and H. M. Rajesh, "ELECTRICITY LOAD FORECASTING BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK MODEL USING WEATHER DATA," *International Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 1, pp. 91-99, January- February 2013.
- [60] L. Ghods and M. Kalantar, "Methods for long-term electric load demand forecasting; a comprehensive investigation," *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 855-858, 21-24 April 2008.
- [61] H. Chen, C. A. Canizares and A. Singh, "ANN-Based Short-Term Load Forecasting in Electricity Markets," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, p. 411-415.
- [62] E. A. Feinberg, D. Genethliou and J. T. Hajagos, "Statistical load modeling," in *Power and Energy Systems (PES 2003)*, Palm Spring, 2003.
- [63] L. B. Dunn, "Modern weather forecasting," in *Handbook of weather, climate, and water: dynamics, climate, physical meteorology, weather systems, and measurements*, Hoboken: Wiley-Interscience, 2003, pp. 679-688.
- [64] C. M. Randall and R. Bird, "Insolation Models and Algorithms," in *Solar Resources*, Cambridge, London, The MIT Press, 1989, pp. 61-141.
- [65] N. Sharma, J. Gummeson, D. Irwin and P. Shenoy, "Cloudy Computing: Leveraging Weather Forecasts in Energy Harvesting Sensor Systems," in *7th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, Boston, 2010.
- [66] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18-28, January-February 2010.
- [67] B. Balcar a P. Štěpánek, *Teorie množin*, Praha: Academia, 1986.
- [68] S. Horowitz and L. Lave, "Equity in Residential Electricity Pricing," *The Energy Journal*, vol. 35, no. 2, pp. 1-23, April 2014.
- [69] I. Fleischer, "NUMERICAL REPRESENTATION OF UTILITY," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 9, no. 1, pp. 48-50, March 1961.
- [70] P. C. Fishburn, "Utility Theory," *Management Science*, vol. 14, no. 5, pp. 335-378, Jan. 1968.
- [71] J. von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, New Jersey: Princeton University Press, 2004.
- [72] R. B. Myerson, *Game theory: Analysis of Conflict*, London: Harvard University Press, 1997.
- [73] J. Kolář, O. Štěpánková a M. Chytil, *Logika, algebry a grafy*, Praha: SNTL/ALFA, 1989, pp. 92-102.

- [74] J. Bednář, *Meteorologie: úvod do studia dějů v zemské atmosféře*, 1 editor, Praha: Portál, 2003.
- [75] J. M. MORAN and M. D. MORGAN, *Meteorology: The atmosphere and the science of weather*, 2 ed., New York: Macmillan Publ. Co, 1989.
- [76] C. Moser, D. Brunelli, L. Thiele and L. Benini, "Real-Time Scheduling with Regenerative Energy," in *Proceeding of the 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems*, Washington, DC, USA, 2006.
- [77] A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt and F. Díaz-González, *Energy storage in power systems*, New York: John Wiley & Sons, 2016.
- [78] C. D. Rahn and C.-Y. Wang, *Battery Systems Engineering*, John Wiley & Sons, 2013.
- [79] F. Mattera, "Energy Storage in Photovoltaic Systems," in *Energy Stotage*, London, Hoboken, ISTE, 2011.
- [80] S. Santhanagopalan, "Mathematical Modeling of Bateries," in *Linden's handbook of batteries*, 4 ed., New York, McGraw-Hill, 2011.
- [81] M. J. Coffin, *Direct digital control for building HVAC Systems*, 2 ed., Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [82] J. E. Braun, "Load Control Using Building Thermal Mass," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 125, no. 3, pp. 292-301, 4 4 2003.
- [83] N. Li, L. Chen and S. H. Low, "Optimal demand response based on utility maximization in power networks," in *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, 2011.
- [84] L. Chen, N. Li, L. Jiang and S. H. Low, "Optimal Demand Response: Problem Formulation and Deterministic Case," in *Control and optimization methods for electric smart grids*, New York, Springer, 2012.
- [85] ČSN 73 0580-2 (730580), ČR, 2007.
- [86] ČSN 73 0580-1 (730580), ČR, 2007.
- [87] ČSN EN 12464-1 (360450), ČR, 2012.
- [88] ČSN EN 12665 (360001), ČR, 2012.
- [89] D. E. KNUTH, *The art of computer programming*, Addison-Wesley, 1973.
- [90] G. J. Holzmann, *Design and validation of computer protocols*, Prentice Hall, 1991.
- [91] S. BUDKOWSKI, P. DEMBINSKI and M. DIAZ, "ISO STANDARDIZED DESCRIPTION TECHNIQUE E S T E L L E," in *The Formal Description Technique*, North Holland, 1989.
- [92] A. Rockstrom and R. Saracco, "SDL - CCITT Specification and Description Language," *IEE Transactions and communications*, vol. 30, 1982.

- [93] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, "Specification and description language (SDL)," 11 1999. [Online]. Available: http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com10/languages/Z.100_1199.pdf. [Accessed 20 9 2014].
- [94] ČSÚ, „VYDÁNÍ A SPOTŘEBA DOMÁCNOSTÍ STATISTIKY RODINNÝCH ÚČTŮ ZA ROK 2016,“ ČSÚ, Praha, 2017.
- [95] ČZU Praha, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů - katedra agroekologie a biometeorologie, „Meteorologická stanice České zemědělské univerzity v Praze,“ ČZU Praha, Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů - katedra agroekologie a biometeorologie, 2016. [Online]. Available: <http://meteostanice.agrobiologie.cz/>. [Přístup získán 2 2017].
- [96] M. Nosek, *Metody v klimatologii*, Praha: Academia, 1972.
- [97] ČHMÚ, „Denní data,“ [Online]. Available: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data>. [Přístup získán 25 9 2017].
- [98] I. Sládek, „Určování nástupu a ukončení zvolených teplot vzduchu metodou součtových řad a odchylek,“ *Meteorologické Zprávy*, sv. 42, č. 2, pp. 52-56, 1989.
- [99] P. Tremel, „Vymezení období největšího růstu a největšího poklesu teploty vzduchu a vody metodou součtových řad,“ sv. 63, č. 4, pp. 52-56, 2010.
- [100] J. Anděl, *Statistická analýza časových řad*, Technická knihovna inženýra editor, Praha: SNTL, 1976.
- [101] P. Štěpánek, *Metodologie kontroly a homogenizace časových řad v klimatologii*, Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2012.
- [102] I. Nejezchleba, J. Kolafa a M. Kotrla, *Úvod do počítačových simulací*, Praha: KAROLINUM, 2003, pp. 175-181.
- [103] Česká meteorologická společnost, „Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS),“ ČMeS, 10 2017. [Online]. Available: <http://slovník.cmes.cz/>. [Přístup získán 17 11 2017].

12 VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

12.1 PUBLIKACE VZTAHUJÍCÍ SE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

PUBLIKACE V RECENZOVANÉM ODBORNÉM ČASOPISE

HRŮZA, T.: **PREDIKCE INTENZITY SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ S VYUŽITÍM INTERPOLACE POMOCÍ SPLINE FUNKCE**. Energetika, ISSN 0375-8842, 1, 2018, ročník 68, strana 56-60.

DALŠÍ PUBLIKACE EXCERPOVANÉ WEB OF SCIENCE

BRABEC, Z. – HOLEČEK, J. – HRŮZA, T.: **OVERVIEW OF APPLICABILITY OF ICT TECHNOLOGIES FOR SMART GRIDS**. In Proceeding of 15th Mechatronika 2012. Praha: Czech Technical University at Prague, 2012, pp. 169-173. ISBN 978-80-01-04987-7.

Times Cited: 2

Spoluautorský podíl doktoranda je 33 %.

PUBLIKACE VE SBORNÍCÍCH MEZINÁRODNÍCH KONFERENCÍ

- [1] HRŮZA, T.: **ANALYSIS OF SOLAR RADIATION AND PV PANEL EFFICIENCY AT PRAGUE SUCHDOL, March 29-31, 2017 London**, ISBN 978-0-9935191-4-7, Proceedings and Research Track of the 7th Biannual CER Comparative European Research Conference CER 2017 (issue I.), pp 44-47. Collection of selected peer-reviewed papers presented at the 7th international scientific conference Comparative European Research – CER 2017 (issue I, March 29-31, 2017). ISBN 978-0-9935191-4-7.
- [2] HRŮZA, T.: **METODY ODHADU SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE V PROSTŘEDÍ SMART GRID SÍTÍ**. In Conference Proceeding – International Masaryk Scientific Conference for Ph.D. Students and Young Researchers. Vol. VI., pp. 2084 - 2092. Recenzovaný sborník příspěvků. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2015. ISBN 978-80-87952-12-2.
- [3] HRŮZA, T.: **IN-HOUSE SMART GRID ARCHITECTURE**. Michael McGreevy and Rita Robert. London: Sciemcee Publishing, 2015. Proceeding of the 3rd CER Comparative European Conference - International Scientific Conference for PhD Students of EU Countries. Vols. II., Issue I., pp. 117 - 119. Independently reviewed. 978-0-9928772-6-2.
- [4] HRŮZA, T.: **CONCEPT OF THE SMART GRID MANAGING PROTOCOL**. Conference Proceeding - International Masaryk Scientific Conference for Ph.D. Students and Young Researchers. Vol. V., pp. 3385 - 3391. Recenzovaný sborník příspěvků. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2014. ISBN 978-80-87952-07-8.

12.2 PUBLIKACE OSTATNÍ

SKRIPTA

- [1] KOCH, M. – NENIČKOVÁ, H. – HRŮZA, T.: **MANAGEMENT INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ**. Scriptum, CERM, 2010. 193 s. ISBN 978-80-214-4157-9.

Spoluautorský podíl doktoranda je 40 %.

OSTATNÍ PUBLIKACE

- [1] HRŮZA, T.: **ŽIVOTNÍ CYKLUS OUTSOURCINGU**. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, 2010. Sborník konference Mezinárodní Baťova konference. 6. Ročník mezinárodní konference. ISBN 978-80-7318-922-8. Zlín.
- [2] HRŮZA, T.: **PŘÍSTUP KE ZNALOSTEM A INFORMACÍM PŘI REALIZACI OUTSOURCINGU ICT**. Praha: Vysoká škola ekonomická Praha, Fakulty informatiky a statistiky, Katedra systémové analýzy 2009. Sborník konference Systémové přístupy'09. Mezinárodní konference. ISBN 978-80-245-1614-1. Praha.
- [3] HRŮZA, T.: **PŘÍSTUP KE ZNALOSTEM A INFORMACÍM PŘI REALIZACI OUTSOURCINGU ICT**. Praha: Vysoká škola ekonomická Praha, Fakulty informatiky a statistiky, Katedra systémové analýzy 2009. Sborník konference Systémové přístupy'09. Mezinárodní konference. ISBN 978-80-245-1614-1. Praha.
- [4] HRŮZA, T.: **ENTERPRISE ARCHITECTURE, WHAT CAN PROVIDE TO THE BUSINESS**. Brno: Vysoké učení technické Brno, Fakulta podnikatelská, 2009. Sborník příspěvků MANAGEMENT, ECONOMICS AND BUSINESS DEVELOPMENT IN EUROPEAN CONDITIONS. Pp. III. /24 – III. /32. VII. International Scientific Conference. ISBN 978-80-214-3893-4. Brno
- [5] HRŮZA, T.: **PODNIKOVÁ ARCHITEKTURA A MODERNÍ DYNAMICKÉ IT SLUŽBY**. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, 2009. Sborník konference Mezinárodní Baťova konference. 5. Ročník mezinárodní konference. ISBN 978-80-7318-812-2. Zlín.
- [6] HRŮZA, T.: **VYHODNOCOVÁNÍ A VYLEPŠOVÁNÍ ITIL PROCESŮ**. Sborník konference ISACA IT Governance 2004 „Pokročilé přístupy k řízení a správě informatiky“. Znojmo, 2004. ISBN 80-86284-47-6. Praha.