



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PILOTNÍ PROJEKT ŘÍZENÍ FLEXIBILITY NA ÚROVNI NN

PILOT PROJECT ON FLEXIBILITY MANAGEMENT AT LV LEVEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Sýkora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Jan Sýkora

ID: 217653

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Pilotní projekt řízení flexibility na úrovni NN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis a vysvětlení pojmů rebound effect a baseline
2. Vyhodnocení využití flexibility v domácnosti
3. Definice a metodiky pro výpočet výchozího diagramu zatížení
4. Vytvoření scénářů zapínání a vypínání spotřebičů pro využití flexibility
5. Analýza reálně naměřených dat z daného portfolia
6. Zhodnocení jednotlivých způsobů měření a uplatněných metodik

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce pojednává o tématu flexibility, především pak na straně spotřeby. Její součástí je vydefinování pojmů spojených s danou problematikou, základní principy fungování a možnosti využití. Hlavním zkoumaným odvětvím je pak využití potenciálu flexibility tepelných čerpadel. Práce je založena na reálných datech z pilotního projektu uskutečněného v zimním období roku 2021/22, jež zkoumá portfolio domácností disponujících tepelným čerpadlem, na kterých pozoruje možnosti využití flexibility, jejího řízení a především pak vliv na změnu zatížení v závislosti na stanovené baseline.

KLÍČOVÁ SLOVA

flexibilita, tepelné čerpadlo, demand response, baseline, rebound effect, agregátor, obnovitelné zdroje, národní akční plán, chytrá síť

ABSTRACT

The thesis deals with the topic of flexibility, especially on the demand side. It includes the definition of terms related to the issue, the basic principles of operation and possibilities of use. The main researched branch of the study is the usage of the flexibility potential of heat pumps. The work is based on real data from a pilot project executed in the winter of 2021/22, which examines the portfolio of households with a heat pump and observes the possibilities of using flexibility, its management and especially the impact on load change depending on the established baseline.

KEYWORDS

flexibility, heat pump, demand response, baseline, rebound effect, aggregator, renewable energy, national action plan, smart grid

SÝKORA, Jan. *Pilotní projekt řízení flexibility na úrovni NN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2022, 83 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Jan Sýkora
VUT ID autora: 217653
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Pilotní projekt řízení flexibility na úrovni NN

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukáši Radilovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Zároveň bych rád poděkoval společnosti ČEZ Prodej, a.s. za nabídku zajímavého téma bakalářské práce a poskytnutá data z reálného měření.

Obsah

Úvod	13
1 Flexibilita	15
1.1 Definice flexibility	15
1.2 Pojmy užívané v rámci flexibility	16
1.3 Potenciální problémy přenosové soustavy	17
1.4 Flexibilita výrobních zařízení	18
1.4.1 Potenciál kladné flexibility	19
1.4.2 Potenciál záporné flexibility	20
1.5 Flexibilita spotřebních zařízení	21
1.5.1 Peak shaving	21
1.5.2 Load shifting	22
Cíle práce	24
2 Flexibilita v domácnosti	25
2.1 Potenciál tepelných čerpadel	26
3 Výchozí diagram zatížení	28
3.1 Metodiky stanovení baseline	28
3.1.1 Průběh aktivace	29
3.1.2 Základní metodiky stanovení baseline	31
3.2 Baseline typ 1	32
3.2.1 Průměrování	32
3.2.2 Další metody typu 1	34
3.3 Metoda maximálního zatížení	35
3.4 Baseline typ 2	35
3.5 Proveditelné metodiky pro malý měřený vzorek	35
3.5.1 Měření před/po	36
3.5.2 Metodika referenční skupiny	37
3.5.3 Upravená metodika typu 1	39
3.6 Rebound effect	41
4 Scénáře aktivačních pokynů flexibility	42
4.1 Typový diagram dodávky	42
4.2 Scénáře pro konkrétní skupinu spotřebitelů	42
4.2.1 Scénář č.1 (pondělí)	43
4.2.2 Scénář č.2 (úterý)	43

4.2.3	Scénář č.3 (středa)	44
4.2.4	Scénář č.4 (čtvrtek)	44
4.2.5	Scénář č.5 (pátek)	45
4.2.6	Scénář č.6 (sobota)	45
4.2.7	Scénář č.7 (neděle)	46
5	Analýza a vyhodnocení měřených dat	47
5.1	Zpracování naměřených dat	48
5.1.1	Selekce dat	48
5.2	Volba vhodné metodiky	51
5.3	Stanovení výpočtového okna	51
6	Vyhodnocení měřených dat	55
6.1	Vyhodnocení věrohodnosti vybraných metodik	55
6.2	Četnost reakce TČ na pokyn	58
6.3	Poměrná změna zatížení dle typu pokynu	58
6.3.1	Pokyny pondělí	59
6.3.2	Pokyny úterý	62
6.3.3	Pokyny středa	64
6.3.4	Pokyny čtvrtek	65
6.3.5	Pokyny sobota	67
6.3.6	Pokyny neděle	69
6.4	Trvání rebound effectu dle typu pokynu	70
7	diskuze	71
	Závěr	73
	Literatura	76
	Seznam symbolů a zkratk	78
	Seznam příloh	80
A	Dataset 01. 01. 2022–28. 02. 2022	81
B	Dataset 11. 12. 2021–26. 03. 2022	81
C	Dataset 10. 03. 2021–30. 06. 2021	81
D	Vyhodnocení výpočtového okna	81
E	Výpočet relativní odchylky metodik	81

F	Výpočet směrodatné odchylky	81
G	Trvání rebound effectu	82

Seznam obrázků

1.1	Peak shaving	22
1.2	Load shifting	22
2.1	Poměrné zatížení zřízenými v domácnosti ČR	25
2.2	Poměrné zatížení zřízenými v domácnosti EU	25
3.1	Průběh a změny zatížení spotřebiče	28
3.2	Průběh aktivace	30
3.3	Výchozí diagram zatížení	31
3.4	Výběr X z Y dní	34
3.5	Příklad užití metodiky měření před/po	36
3.6	Příklad užití metodiky referenční skupiny	38
3.7	příklad užití upravené metodiky typu 1	39
3.8	Vliv rebound effectu	41
4.1	TDD 7 pro 1. týden měření	43
4.2	Aktivační pokyny (pondělí)	43
4.3	Aktivační pokyny (úterý)	44
4.4	Aktivační pokyny (středa)	44
4.5	Aktivační pokyny (čtvrtek)	45
4.6	Aktivační pokyny (pátek)	45
4.7	Aktivační pokyny (sobota)	46
4.8	Aktivační pokyny (neděle)	46
5.1	Poměrná změna zatížení pro výpočtové okno 1 minuta	53
5.2	Poměrná změna zatížení pro výpočtové okno 5 minut	53
5.3	Poměrná změna zatížení pro výpočtové okno 10 minut	53
5.4	Poměrná změna zatížení pro výpočtové okno 15 minut	53
6.1	průběh poměrné změny zatížení 24. 01. 2022–30. 01. 2022	57
7.1	Průběh pokynu 1B ($VO = 10$ min)	72
7.2	Průběh pokynu 1B ($VO = 15$ min)	72

Seznam tabulek

1.1	Očekávaný vývoj instalovaného výkonu v MW	19
1.2	potenciál kladné flexibility v MW	20
1.3	potenciál záporné flexibility v MW	21
5.1	Vzorová data z měření	48
5.2	Spolehlivost měření na ovládaných tepelných čerpadlech	49
5.3	Spolehlivost měření na ovládaných tepelných čerpadlech (rozšířený dataset)	50
5.4	Trvání RE pro VO 1 minuta	52
5.5	Trvání RE pro VO 5 minut	52
5.6	Trvání RE pro VO 10 minut	52
5.7	Trvání RE pro VO 15 minut	52
6.1	Úspěšnost pokynu pro snížení příkonu	58
6.2	Úspěšnost pokynu pro zvýšení příkonu	58
6.3	pokyn 1A(měření před/po)	59
6.4	pokyn 1A(baseline typ 1)	59
6.5	pokyn 1B(měření před/po)	60
6.6	pokyn 1B(baseline typ 1)	60
6.7	pokyn 1C(měření před/po)	60
6.8	pokyn 1C(baseline typ 1)	60
6.9	pokyn 1D(měření před/po)	60
6.10	pokyn 1D(baseline typ 1)	60
6.11	pokyn 2A(měření před/po)	62
6.12	pokyn 2A(baseline typ 1)	62
6.13	pokyn 2B(měření před/po)	62
6.14	pokyn 2B(baseline typ 1)	62
6.15	pokyn 2C(měření před/po)	63
6.16	pokyn 2C(baseline typ 1)	63
6.17	pokyn 2D(měření před/po)	63
6.18	pokyn 2D(baseline typ 1)	63
6.19	pokyn 3A(měření před/po)	64
6.20	pokyn 3A(baseline typ 1)	64
6.21	pokyn 3B(měření před/po)	65
6.22	pokyn 3B(baseline typ 1)	65
6.23	pokyn 4A(měření před/po)	66
6.24	pokyn 4A(baseline typ 1)	66
6.25	pokyn 4B(měření před/po)	66
6.26	pokyn 4B(baseline typ 1)	66

6.27	pokyn 6A(měření před/po)	67
6.28	pokyn 6A(baseline typ 1)	67
6.29	pokyn 6B(měření před/po)	67
6.30	pokyn 6B(baseline typ 1)	67
6.31	pokyn 6C(měření před/po)	68
6.32	pokyn 6C(baseline typ 1)	68
6.33	pokyn 6D(měření před/po)	68
6.34	pokyn 6D(baseline typ 1)	68
6.35	pokyn 7A(měření před/po)	69
6.36	pokyn 7A(baseline typ 1)	69
6.37	pokyn 7B(měření před/po)	69
6.38	pokyn 7B(baseline typ 1)	69
7.1	pokyn 2B($VO = 10$ min)	71
7.2	pokyn 2B($VO = 15$ min)	71
7.3	Trvání RE pro pokyn 1A ($VO = 10$ min)	72
7.4	Trvání RE pro pokyn 1A ($VO = 15$ min)	72
G.1	Trvání RE pro pokyn 1A	82
G.2	Trvání RE pro pokyn 1B	82
G.3	Trvání RE pro pokyn 1C	82
G.4	Trvání RE pro pokyn 1D	82
G.5	Trvání RE pro pokyn 2A	82
G.6	Trvání RE pro pokyn 2B	82
G.7	Trvání RE pro pokyn 2C	83
G.8	Trvání RE pro pokyn 2D	83
G.9	Trvání RE pro pokyn 3A	83
G.10	Trvání RE pro pokyn 3B	83
G.11	Trvání RE pro pokyn 4A	83
G.12	Trvání RE pro pokyn 4B	83
G.13	Trvání RE pro pokyn 6A	83
G.14	Trvání RE pro pokyn 6B	83

Úvod

Aktuální nastavení české elektrické soustavy odpovídá řízení výroby dle požadavků spotřeby. Tato vyrovnávací činnost byla doposud zabezpečována především kondenzačními zdroji elektrárenského typu zapojených v distribuční soustavě, které je možné dobře regulovat s poměrně krátkou dobou reakce. V tomto smyslu se jedná o existující formu kladné nebo záporné flexibility na straně výroby. Pokud se v síti objeví nepředpokládaná odchylka spotřeby, je automaticky nebo manuálně vydán aktivační pokyn a tepelná elektrárna, která krátkodobě upraví svůj výkon o volnou rezervu, tuto odchylku pokryje.

Ovšem vzhledem k aktuálnímu trendu, kdy se Evropská unie zavázala ke snížení skleníkových plynů s příslibem klimatické neutrality dochází k pozvolnému ústupu od klasických zdrojů. Novou cestou má být především „zelená energie“, které přímo neprodukují žádné nebo minimální množství skleníkových plynů. Tento tah sebou však nese riziko, spojené se závislostí těchto zdrojů na klimatických podmínkách v dané oblasti. V takových situacích může nastat stav, kdy výroba nebude mít možnost dodávat požadované množství energie pro uspokojení požadavků spotřeby, což samo o sobě je velice problematické, nehledě na výrazné zvýšení cen energií v období špiček. Proto je do budoucna zapotřebí nastavit systém, jež bude využívat vyrobenou elektrickou energii s maximální efektivitou. Tohoto lze dosáhnout obecně dvěma způsoby, tzv. „Peak shavingem“ nebo „Load shiftingem“.

V případně první zmiňované varianty dochází k redukci spotřeby v období špiček omezováním určitých typů zátěže, tak aby bylo možné předejít nechtěnému „peaku“. Podmínky, pro možnosti využití takového zásahu je však zapotřebí vyhodnotit před zahájením samotného provozu, tak aby daný zásah neovlivnil poskytovatele flexibility. Druhou možností využití flexibilního řízení je „load shifting“, který představuje přesun zátěže na část dne, která bude výhodnější jak pro poskytovatele tak pro provozovatele soustavy.

Flexibilitu lze mimo jiné nalézt také v domácnostech, především pak těch disponujících elektrickým topným systémem. Vzhledem k tepelné kapacitě domácností, je možné prostor předtopit na požadovanou teplotu v období mimo špičku, případně na určitý čas ve špičce čerpadlo odstavit, avšak s ohledem na komfort poskytovatele. Jednou z překážek pro toto uplatnění řízené flexibility může představovat neochota zákazníků flexibilitu poskytovat, proto je do budoucna nutné přijít s vhodným, přímým nebo nepřímým způsobem jak zákazníka motivovat.

Pokud však aktivace flexibility probíhá na základě povelů vydaných nezávislým agregátorem, dochází k narušení předpokládaného diagramu zatížení daného odběrného místa a významně tak ovlivňuje obchodníka. Pro následné vypořádání je tak nutné stanovit náhradní baseline, na základě vybrané metodiky. Ta může vycházet například z historických dat nebo z dat získaných z referenčních skupin. Následně je provedena korekce, která může vycházet z měřených hodnot před a po aktivaci, případně pak z počasí nebo jiných možných proměnných. Z následného vyhodnocení naměřeného zatížení a stanovené náhradní baseline lze provést vyhodnocení vlivu aktivace spotřebu v čase aktivace.

1 Flexibilita

Flexibilita se obecně uvažuje jako potenciál zařízení (výrobního/spotřebního nebo akumulačního charakteru) aktivně měnit množství svojí výroby/spotřeby/akumulované energie na základě cenových signálů nebo pokynu. Tato regulace je řízena za účelem korekce odchylek elektrizační sítě nebo zajištění výhodnosti nákupu/prodeje elektrické energie pro poskytovatele flexibility. Potenciál takové flexibility je dán ekonomickou, ale i mimo-ekonomickou výhodností jejího poskytování.

1.1 Definice flexibility

(definice v následující kapitole vychází ze studie „Model zapojení DECE, akumulace a spotřeby včetně elektromobility do procesu řízení ES ČR“ zpracované pracovní skupinou A12 v listopadu 2018. [1].)

Flexibilitu lze dělit na základě více kritérii, například podle jejího zdroje:

- **Flexibilita výrobních zařízení** je chápána jako potenciál výrobního zařízení aktivně reagovat na aktuální zatížení, nebo na cenové signály, snižováním/zvyšováním množství vyráběné elektřiny v rozsahu, který je dán typem výrobního zařízení. Nejčastěji se jedná o zdroje s časem reakce v řádu sekund.
- **Flexibilita spotřebních zařízení**, nebo-li Demand side response, je potenciál spotřebních zařízení měnit množství spotřeby vypínáním, nebo omezováním jednotlivých zařízení způsobem, který nebude výrazně zasahovat do komfortu nebo potřeb poskytovatele flexibility.
- **Flexibilita akumulačních zařízení** je specifická svojí povahou, která se může měnit v závislosti na potřebách sítě či poskytovatele flexibility. Jak už název napovídá, jedná se o zařízení schopné ukládat elektrickou energii např. v akumulačních úložištích nebo převodem na jiný druh energie (vodní elektrárna disponující přečerpávacími nádržemi, gravitační úložiště apod.). V případě přebytku elektrické energie je možné pomocí zařízení akumulovat energii, kterou lze následně využít k pokrytí spotřebních špiček.

Toto řešení má dobrý potenciál, avšak aktuální technologie jsou zatíženy poměrně vysokými ztrátami, proto nachází využití především ve specifických aplikacích, např. v kombinaci se solárními panely, nebo pro uchování přebytků energie z výrobních zařízení s omezenou regulací typicky JE, VTE, FVE.

Dále lze flexibilitu dělit na základě délky trvání její aktivace:

- **Reakční flexibilita** má potenciál zejména pro řízení soustavy, kde se využívá za účelem zkrácení výkonové rampy, což je žádné z hlediska plynulosti připojování/odpojování větších výrobních/zátěží do elektrizační soustavy. Aktivační doba se pohybuje v jednotkách minut.
- **Krátkodobá flexibilita** je tou nejběžnější formou a nachází uplatnění v produktech pro PPS, PDS, ale i pro dodavatele elektrické energie. Lze ji využít pro vyrovnání výkonových odchylek v síti, úpravu účinníku, odkládání přebytků pro budoucí využití či pro regulaci vlastní odchylky dodavatele. Dále také pro účely obchodování silové elektřiny na denních a vnitrodenních trzích.
- **Dlouhodobá flexibilita** nachází své uplatnění především na dlouhodobém trhu se silovou elektřinou a využívá se především na straně výrobních zdrojů s dlouhodobě predikovatelným množstvím výroby.

Posledním významným způsobem dělení flexibility je dle způsobu její aktivace na implicitní a explicitní.

- **Flexibilita implicitní** je typ flexibility řízený na základě cenových signálů samotným poskytovatelem flexibility v reakci na proměnlivou cenu elektřiny, nebo odlišnou výši nákladů na přenos a distribuci elektrické energie v různých časových intervalech.
- **Flexibilita explicitní** je typ flexibility řízený na základě aktivačních pokynů ze strany subjektů na trhu nebo agregátora za účelem pokrytí případných odchylek a obnovení rovnováhy v síti, úpravy toků určitými částmi distribuční soustavy, nebo vyrovnání vlastních odchylek subjektu zúčtování.

1.2 Pojmy užívané v rámci flexibility

- **Denní diagram zatížení** reprezentuje závislost výkonu sítě (v našem případě Elektrizační soustavy ČR) v čase, konkrétně v horizontu 24 h a slouží řízení provozu dané sítě.
- **Kladná odchylka** nastává, pokud bylo do sítě dodáno více, nebo bylo ze sítě odebráno méně elektřiny.
- **Záporná odchylka** nastává, pokud bylo do sítě dodáno méně, nebo bylo ze sítě odebráno více elektřiny.
- **Flexibilita** je chápána jako schopnost spotřebního/výrobního/akumulačního zařízení měnit na základě cenových signálů nebo pokynů množství svojí spotřeby/výroby nebo skladované energie v určitém rozsahu a časovém intervalu oproti smluvenému/předpokládanému diagramu.
- **Zdroj flexibility** je zařízení jež flexibilitu poskytuje. Takové zařízení může být spotřebního, výrobního nebo akumulačního charakteru.

- **Baseline**, nebo také základní referenční úroveň zařízení, je diagram smluveného/předpokládaného odběru/dodávky daného zdroje flexibility, který by nastal v případě, že by flexibilita nebyla aktivována.
- **Rebound effect**, je chápán jako zpětný dopad aktivace flexibility především na straně spotřeby nebo akumulace, kdy se snížené zatížení sítě v čase aktivace projeví zvýšeným zatížením v čase následujícím po aktivaci.
- **Kladný potenciál flexibility** je chápán jako potenciál **snížení** množství odebírané energie na straně spotřeby, nebo naopak potenciál **zvýšení** výroby na straně výrobních zařízení.
- **Záporný potenciál flexibility** je chápán jako potenciál **zvýšení** množství odebírané energie na straně spotřeby, nebo naopak potenciál **snížení** výroby na straně výrobních zařízení.
- **Poskytovatel flexibility** je subjekt poskytující flexibilitu na svých zařízeních individuálně nebo prostřednictvím agregátora.
- **Prosumer** je spotřebitel, jenž má ve svém odběrovém místě instalovanou výrobu elektrické energie pro pokrytí vlastní spotřeby nebo dodávky do sítě.
- **DSR (Demand Side Response)**, se rozumí jako změna zatížení na straně spotřeby vlivem cenových signálů nebo na pokyn.
- **Agregátor flexibility** je účastník trhu jenž pod sebou sdružuje jednotlivé poskytovatele flexibility, čímž jim umožňuje přístup na trhy s elektřinou nebo podpůrnými službami, pro které by za jiných okolností byla jejich poskytovaná flexibilita příliš malá a nedostatečná.
- **Agregátor integrovaný** spojuje roli agregátora a dodavatele (výrobce/obchodníka s elektřinou) a s tím také přebírá odpovědnost za odchylku poskytovatele.
- **Agregátor nezávislý** uzavírá smlouvu s poskytovatelem flexibility na využití jimi poskytované flexibility, ale nestává se jejich dodavatelem a nepřebírá odpovědnost za jejich odchylku, tím pádem není odpovědný za odchylku způsobenou aktivací flexibility a odpovídá pouze za svoji odchylku, které by se případně mohl dopustit nedodáním nasmlouvaných produktů.

1.3 Potenciální problémy přenosové soustavy

Vzhledem k rostoucímu podílu volatilních zdrojů na trhu s elektrickou energií, jako jsou FVE nebo VTE, se stává čím dál větším problémem právě volatilita těchto zdrojů. Toto se týká především FVE, které jsou z principu schopny v poledních hodinách vyrábět své maximum, oproti tomu však ve večerních/nočních hodinách je množství vyráběné energie na minimální nebo nulové úrovni. S omezením výroby ze stabilních zdrojů je nevyhnutelné přistoupit k řízení na straně spotřeby, nebo

ukládání přebytečné elektrické energie z odpoledních hodin, k jejímu pozdějšímu využití.

Další problém nastává ve zhoršené predikovatelnosti těchto zdrojů, vzhledem k jejich závislosti na aktuálních klimatických podmínkách v dané oblasti. Avšak s ohledem na relativně spolehlivé předpovědi klimatických podmínek se tento problém dá opět řešit využitím DSR regulace. Například lze při nepříznivém klimatickém výhledu trh s předstihem cenově motivovat k nižší spotřebě elektrické energie.

Problematika se navíc rozrůstá na straně spotřeby, kde dochází k růstu špičkových zatížení sítě, které jsou způsobeny převážně rozmachem elektromobility, společně s hojnějším využitím tepelných čerpadel. Tyto dvě zařízení již principem svojí funkce do budoucna představují riziko zvýšené spotřeby koncentrované do určitých časových úseků.

1.4 Flexibilita výrobních zařízení

(Kapitola vychází ze studie „Model zapojení DECE, akumulace a spotřeby včetně elektromobility do procesu řízení ES ČR“ zpracované pracovní skupinou A12 v listopadu 2018 [1].)

Za Reálný potenciál flexibility na straně výroby lze považovat schopnost daného zdroje výhodně (ekonomicky i mimoekonomicky) změnit okamžitý výkon dodávaný do sítě. Tento potenciál je ovlivněn především hlavním účelem daného zdroje, kdy například kombinovaná výroba v teplárnách bude poskytovat mnohem větší potenciální výkon mimo topnou sezónu. Dalšími faktory jsou denní doba nebo klimatické podmínky v případě FVE či VTE. Je také zapotřebí brát zřetel na požadované využití flexibility, zda poputuje na trh se silovou elektřinou nebo na trh s podpůrnými službami.

Flexibilita poskytnutá na výrobních zdrojích je především dána strukturou těchto zdrojů, kdy se dle uvedeného reálného potenciálu každá výroba pokouší ekonomicky i mimoekonomicky vytěžit ze svého portfolia maximum, protože je zapotřebí provozovatele daných zdrojů motivovat k vymezení volného výkonu.

Z tabulky 1.1 je patrné, že se do budoucna pracuje s výrazným poklesem instalovaného výkonu u zdrojů nad 10 MW, s čímž také koreluje pokles potenciální flexibility těchto zdrojů. Toto je dáno především postupnou tendencí omezování a odstavování kondenzačních zdrojů využívajících uhlí. Avšak tuto změnu kompenzuje předpokládaný nárůst instalovaného výkonu v oblasti menších zdrojů jako jsou FVE, VTE a kogenerační jednotky.

Tab. 1.1: Očekávaný vývoj instalovaného výkonu v MW, převzato z [1] a upraveno autorem

	2018	2020	2030	2040
Zdroje v síti VVN >10MW vyjma FVE a VTE	6350	6350	4740	4220
Zdroje v síti VN >10MW vyjma FVE a VTE	510	500	380	360
Kogenerační jednotky	240	290	560	830
Malé vodní elektrárny	350	355	360	365
Bioplynové stanice	400	400	575	600
Biomasové stanice	70	100	170	230
VTE	310	350	800	1150
FVE na úrovni VN	1830	1850	2500	3600
FVE na úrovni NN	300	350	1100	2300
Mikrokogenerace	10	12	50	80
Souhrn	10370	10560	11235	13735

1.4.1 Potenciál kladné flexibility

Tato pomyslná výměna pokrytí však není pro síť ideální hned z několika důvodů. V případě FVE a VTE by tak teoreticky, z důvodu zajištění kladné flexibility, docházelo k nevyužití maximálního výrobního výkonu, který by v daný čas mohly dodávat. Tudíž by bylo nutné takového dodavatele flexibility významně cenově motivovat, aby na úkor své výroby danou flexibilitu poskytoval, což se stává ekonomicky nevýhodné. Nicméně větší problém u tohoto typu zdrojů představuje jejich zhoršená predikovatelnost. U klasických zdrojů je poskytovaný výkon a s tím spojená flexibilita stabilní a není ovlivněna sezonními ani klimatickými podmínkami, tudíž je snadno predikovatelná.

U zdrojů teplotního typu je výkon ovlivněn především sezonností, ale ve schopnosti dodávky flexibility zásadní rozdíl nenastává, jelikož v zimním období je dodávka elektřiny limitována především dostupným volným výkonem a naopak v letním období nízkou dodávkou tepla.

Tato změna ve složení však zásadně ovlivňuje možnost **kladné flexibility**, jelikož tyto typy zdrojů jsou převážně provozovány na horní hranici své kapacity a tedy nemají příliš prostoru kam výkon navyšovat. V tomto ohledu lze očekávat pouze růst v oblasti flexibility poskytované kogeneračními jednotkami v přechodném a letním období.

Tab. 1.2: potenciál kladné flexibility v MW, převzato z [1] a upraveno autorem

	2018	2020	2030	2040
Zdroje v síti VVN >10MW vyjma FVE a VTE	890	850	770	690
Zdroje v síti VN >10MW vyjma FVE a VTE	160	155	140	130
Kogenerační jednotky	50	60	110	170
Malé vodní elektrárny	5	5	10	20
Bioplynové stanice	-	-	-	-
Biomasové stanice	-	-	-	-
VTE	-	-	-	-
FVE na úrovni VN	-	-	-	-
FVE na úrovni NN	-	-	-	-
Mikrokogenerace	-	-	10	20
Souhrn	1105	1070	1040	1030

Jelikož je momentálně velká část kladné flexibility dostupná právě na velkých zdrojích (cca 80 %), budeme do budoucna muset přistoupit právě k agregaci malých výrobních zdrojů jak lze pozorovat v tabulce 1.2.

1.4.2 Potenciál záporné flexibility

V případě záporné flexibility je však i přes pokles u velkých klasických zdrojů, očekávaný celkový růst. Klasické zdroje jsou z hlediska sezonnosti poměrně stabilní, stejně tak na bioplynové a biomasové zdroje sezonnost nemá přímý dopad, přičemž po celý rok mohou poskytovat vyrovnaný provozní výkon. Co se týče tepláren je opět množství volného elektrického výkonu v topné sezoně ovlivněno potřebnou dodávkou tepla a naopak v letní sezoně sníženým výkonem kotelny. Kogenerační jednotky jsou schopny dodávat zápornou flexibilitu především v zimním období snížením výkonu a následnou změnou poměru výroby, což vede k menšímu množství vyrobené elektrické energie. Potenciál záporné flexibility fotovoltaiky lze uplatnit především v letním období, naopak u větrných elektráren v období zimním.

Stejně jako u flexibility kladné je momentálně většina záporné flexibility poskytována velkými zdroji (cca 70 %). V případě budoucího využití flexibility poskytované menšími zdroji bude opět zapotřebí využití agregace.

Tab. 1.3: potenciál záporné flexibility v MW, převzato z [1] a upraveno autorem

	2018	2020	2030	2040
Zdroje v síti VVN >10MW vyjma FVE a VTE	520	500	490	450
Zdroje v síti VN >10MW vyjma FVE a VTE	70	55	40	35
Kogenerační jednotky	25	30	60	80
Malé vodní elektrárny	35	35	70	100
Bioplynové stanice	-	-	190	200
Biomasové stanice	-	-	50	70
VTE	-	-	40	60
FVE na úrovni VN	-	-	75	110
FVE na úrovni NN	-	-	30	70
Mikrokogenerace	-	-	5	10
Souhrn	650	620	1050	1185

1.5 Flexibilita spotřebních zařízení

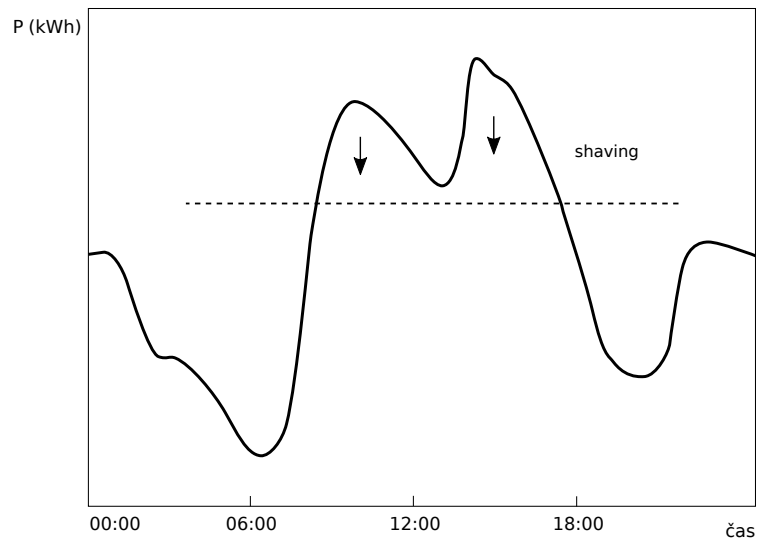
DSR, neboli flexibilita na straně spotřebních zařízení je odvětvím, jež u nás nebylo dosud efektivně využíváno a potenciálně nabízí řešení problémů spojených s přerušáním výroby klasických zdrojů, z důvodů vynucování zdrojů obnovitelných. DSR tak nabízí optimální využití stávající elektrizační soustavy s možností oddálení nutných investic do nové infrastruktury sítě [3]. V principu se pak nabízejí dvě základní řešení, „Peak shaving“, omezení špiček a „Load shifting“, přesunutí zátěže.

1.5.1 Peak shaving

Peak shaving ve své podstatě označuje vyrovnávání záporných odchylek s využitím DSR mechanismů s cílem udržení rovnováhy v síti, ale i snížení cen silové elektřiny pro velkoodběratele, pro které je cena stanovena s ohledem na jejich maximální špičkové zatížení [4]. Odlehčení zátěže lze dosáhnout krátkodobým snížením spotřeby:

- odstavením určitých zařízení v místě spotřeby,
- pokrytím špičkové zátěže za pomoci zdroje elektrické energie v místě spotřeby,
- využitím energie uložené v bateriových systémech.

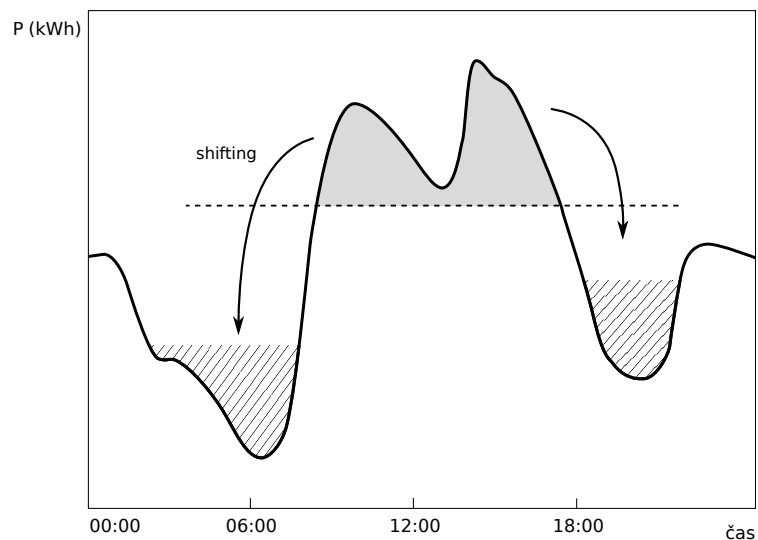
Špičkové zatížení sítě představuje pro poskytovatele přenosové a distribuční soustavy nežádoucí stav, jelikož síť musí být dimenzovaná právě na toto zatížení, s tím jsou spojeny i zvýšené náklady na provoz takové sítě. Tyto stavy také zpravidla nastávají v hodinách, kdy je cena silové elektřiny nejvyšší, proto je i v zájmu spotřebitele snaha o potlačení špičkových zatížení.



Obr. 1.1: Peak shaving, převzato z [4] a upraveno autorem

1.5.2 Load shifting

Řešení pomocí load shiftingu představuje aktivní řízení spotřeby s ohledem na ceny elektrické energie dané časovým obdobím. Vzhledem k proměnlivé ceně elektrické energie v průběhu dne je dobré směřovat svoji spotřebu právě do období mimo špičku [5]. Tento systém je tedy stavěný spíše na základě implicitní flexibility řízené cenovými signály.



Obr. 1.2: Load shifting, převzato z [4] a upraveno autorem

V oblasti velkoodběru, ale i maloodběru se nachází velké množství zařízení, které lze pro toto řízení přizpůsobit a přispět tak k vyrovnanému rozložení zátěže v průběhu dne. Jako příklady lze uvést oblasti vodohospodářství, zpracování kovů nebo mrazírny, kdy tyto zařízení disponují určitou tepelnou kapacitou, nebo v případě vodohospodářství časovou flexibilitou a tak lze s jejich zatížením v různých částech dne pracovat. Pokud se zaměříme na domácnosti jedná se například o vytápění, nabíjení elektromobilu nebo odložený start zařízení typu myčka, pračka, sušička.

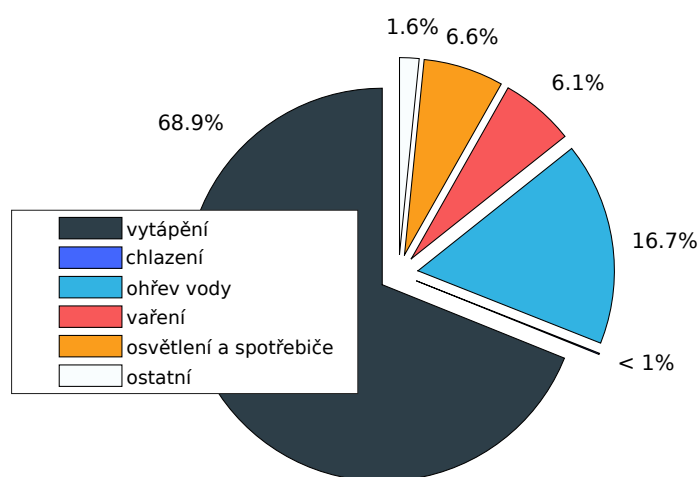
Cíle práce

Hlavním cílem bakalářské práce je zhodnocení využití flexibility v domácnostech, na základě pilotního projektu uskutečněného společností ČEZ Prodej, a.s.. K dosažení tohoto cíle je zapotřebí splnit řadu dílčích problémů a otázek:

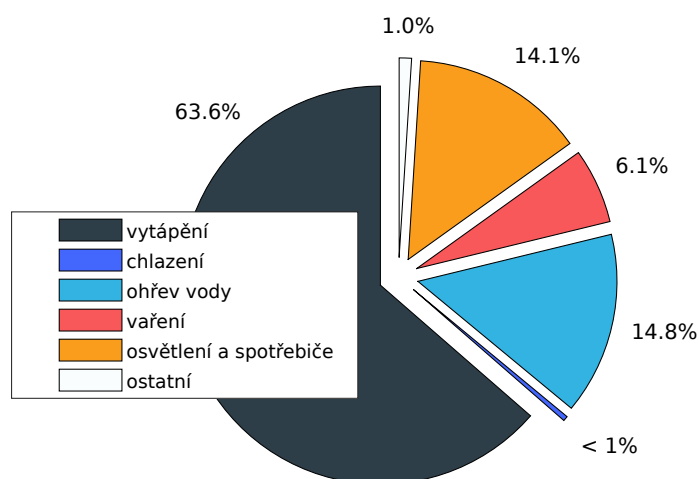
- vymezení možného využití flexibility v domácnosti
- návrh metodik vhodných pro vytvoření výchozího diagramu zatížení v čase aktivace
- vytvoření testovacích scénářů pro pilotní projekt, které systematicky prověří možnosti řízení flexibility v domácnosti
- zpracování naměřených dat za pomoci výhodných postupů a následné zhodnocení
- stanovení věrohodnosti vybraných metodik
- vyhodnocení četnosti reakce na řídicí pokyn pro jednotlivé typy pokynů
- stanovení typické změny zatížení v závislosti na čase a typu pokynu
- vyhodnocení dopadů aktivace na následný průběh zatížení domácnosti

2 Flexibilita v domácnosti

Pokud se zaměříme na oblast malooběru, především pak na domácnosti, tak i zde nalezneme nemalý potenciál flexibility. V domácnosti se nachází řada spotřebičů, která svým charakterem umožňuje využití řízení zátěže pro účely flexibility. Z grafů 2.1 a 2.2 vycházejících z šetření Energo 2015, provedeného ČSÚ [6], a ze studie zpracované statistickým úřadem Evropské unie [7] vyplývá, že mezi zařízení v domácnostech tvořící největší zátěž, patří především systém vytápění a ohřev teplé vody.



Obr. 2.1: Poměrné zatížení zřízenými v domácnosti ČR z [6]



Obr. 2.2: Poměrné zatížení zřízenými v domácnosti EU z [7]

Podstatnými skupinami jsou i „vaření“ a „osvětlení a spotřebiče“, do které spadají například pračka, sušička a myčka, které rovněž představují potenciál. Zbylou částí této skupiny je pak obvykle spotřební elektronika a jiná drobná zařízení, které stejně jako „vaření“ pro potřeby flexibility nevyhovují z hlediska výrazného narušení komfortu uživatele. S uvážením velikosti zátěže a charakteru jednotlivých zařízení jasně vyplývá, že právě systém vytápění a ohřev teplé vody představují největší potenciální zdroj DSR flexibility v domácnostech.

Vytápění společně s ohřevem vody (soubor představující největší zátěž), může tvořit celá řada zařízení a jejich kombinace. Pokud se však zaměříme pouze na zařízení využívající pro vytápění nebo ohřev vody primárně nebo sekundárně elektřinu, jsou možnostmi **tepelná čerpadla** různých typů nebo **elektrické přímotopy**, oboje v kombinaci s plynovým nebo **elektrickým ohříváčem vody**.

2.1 Potenciál tepelných čerpadel

Jako jedno z potenciálně nadějných zařízení pro DSR se jeví zmiňovaná tepelná čerpadla, která již nyní představují nezanedbatelný podíl odběru a disponují dobrou tepelnou kapacitou. Dle studie provedené v Dánsku, až 70 % nově postavených rodinných domů disponuje účinnými systémy podlahového vytápění v kombinaci právě s tepelnými čerpadly [8]. Tento trend lze pozorovat i na území ČR, kde tepelná čerpadla rovněž nachází uplatnění ve velkém množství domácností. Tato tendence na jednu stranu představuje rostoucí zatížení na úrovni domácností, avšak vzhledem k významné tepelné kapacitě objektů s tepelným čerpadlem přináší rovněž možnosti právě na poli flexibility, jak pro potřeby vyrovnávacího trhu tak obchodní flexibilitu.

Studie *Heat pumps in private residences used for grid balancing by demand response methods* [8] rovněž navrhuje možná řešení užití tepelných čerpadel na základně různých podmínek. Základními předpoklady pro tyto modely řízení je především možnost operátora trhu upravit plán spotřeby v krátkém čase, což je zapotřebí například v situaci nepředpokládaného klimatického jevu. Tyto změny ve vnitrodenním plánu však vyžadují smlouvu mezi ovlivněnými účastníky trhu a spotřebitelem. Tato smlouva stanoví povolené manévry a jejich ceny. Řízení pak probíhá na základě jedné ze tří možností:

- řízení na základě cenových signálů,
- řízení na základě stanovené spotřeby,
- řízení na základě aktuální teploty v objektu.

Základním typem řízení tepelných čerpadel je pak model „ON-OFF“, kdy v případě aktivačního signálu a splnění všech podmínek přejde čerpadlo do vypnutého stavu. Po odeznění potřeby nebo při porušení podmínek, jako například minimální teplota v budově, je čerpadlo opět uvedeno do provozu. Tento model řízení odpovídá

metodě Load shiftingu, kdy při odpojení čerpadla ze sítě teplotní hladina v budově klesá a po jeho následném připojení je nutné tuto ztrátu nahradit.

Studie *Voltage Control of Aggregate Electric Water Heater Load for Distribution System Peak Load Shaving Using Field Data* [9] navrhuje jako jednu z dalších variant, na místo úplného vypínání tepelného čerpadla jít cestou napěťového omezení v časech špičky, čímž dočasně dojde ke snížení výkonu daného čerpadla. Tento způsob řízení nabízí, při dostatečném počtu agregovaných čerpadel, efektivní metodu peak shavingu s minimálním dopadem na komfort zákazníka, nicméně na něj nebere přímo zřetel. Avšak je zřejmé, že vzhledem ke konstrukci kompresorů tepelných čerpadel, může dlouhodobý provoz se sníženým napětím vést ke zkrácení životnosti stroje.

Další model řízení tepelného čerpadla, který navrhuje *Intelligent control of flexible loads for improving low voltage grids utilization* [10] je již o poznání komplexnější a pracuje s modelem rodinného domu využívající tepelné čerpadlo v kombinaci s akumulací nádrží. Systém v počátku pracuje s plnou kapacitou nádrže, kdy po jejím naplnění vyřadí tepelné čerpadlo z chodu a stanoví dolní hranici opětovného spuštění na 80 % standardního rozsahu tepelné kapacity. Pro následovnou DSR je využíváno měření napětí v síti. Pokud tedy napětí v síti klesne pod minimální hranici, klesne i hranice pro opětovné spuštění tepelného čerpadla a to na 20 % standardního rozsahu tepelné kapacity. Po odeznění této nerovnováhy v síti je pak limit spuštění čerpadla opět nastaven na původní hodnotu. Aby však nedošlo k prudkému nárůstu zatížení při připojení většího počtu takto řízených tepelných čerpadel, využívá se postupného navyšování limitu.

Využití tepelného čerpadla na základě tohoto systému sice bere v potaz spotřebitelský komfort a využití místní sítě, nicméně však ignoruje cenu elektřiny, která je z pohledu spotřebitele tím nejdůležitějším faktorem. V tomto ohledu je výhodná první metoda, jež umožňuje v reálném čase, na základě cenových signálů, uvádět čerpadlo do provozu nebo naopak odpojovat a tím respektovat ceny elektřiny. Vzhledem k přímému ovládnutí zátěže však může ovlivnit uživatelský komfort.

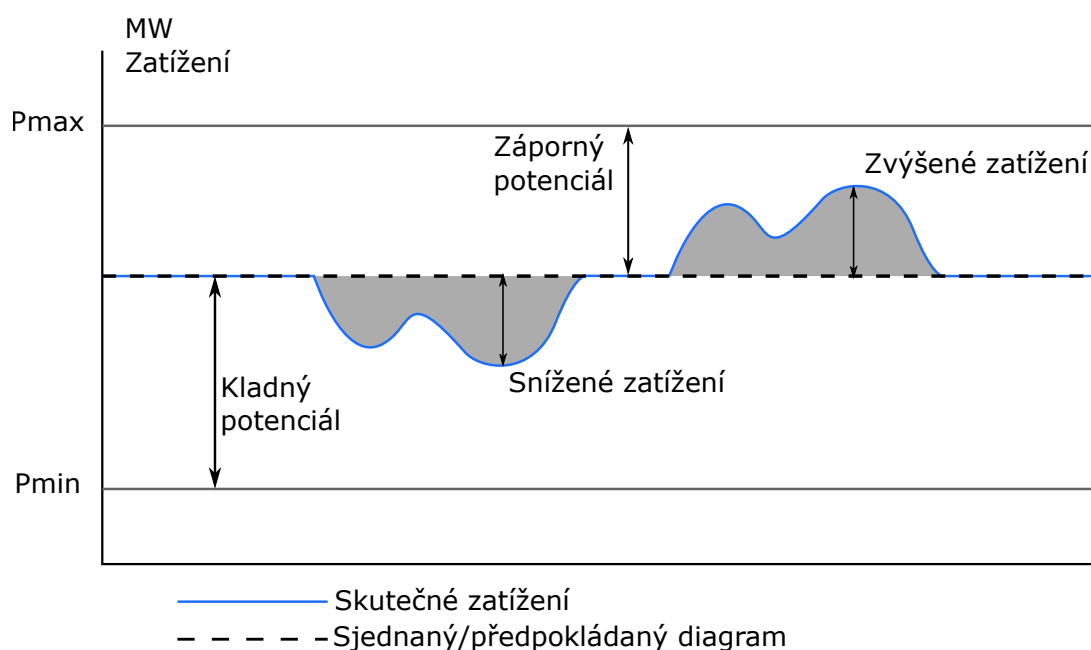
Pro efektivní využití maximální flexibility tepelných čerpadel při respektování všech tří parametrů jež jsou uživatelský komfort, stav sítě a ekonomický aspekt, je nutný vhodný adaptivní algoritmus, který bude všechny tyto parametry zohledňovat.

Současný výzkum tedy navrhuje tři metody řízení pro realizaci výše uvedených strategií řízení. Jmenovitě plánování založené na ceně, následovaně centrální řízení dle poptávky dispečinku a místní řízení na základě napětí [3].

3 Výchozí diagram zatížení

Výchozí diagram zatížení se vztahuje ke konkrétnímu odběrnému místu a představuje velikost odběru v čase, za předpokladu, že by nebyla aktivována flexibilita, obr.3.1. Tento diagram je tedy základním nástrojem pro vyhodnocení potenciální i reálné flexibility daného poskytovatele, především pak vlivu na obchodníka. **Baseline**, jak lze jinak nazvat výchozí diagram zatížení, tedy umožňuje měřit zátěž odběrných míst a její kvalitní návrh přináší prospěch všem zúčastněným stranám, tím že sladí podmínky aktivace a zájmy poskytovatelů flexibility, agregátorů, dodavatelů a provozovatelů sítí.

Baseline je však stále jen odhad a podmínkou pro její návrh je zvolení vhodné metodiky.



Obr. 3.1: Průběh a změny zatížení spotřebiče

3.1 Metodiky stanovení baseline

Metodik lze uplatnit více a žádná není dokonalá, každá přináší jiné výhody a jiné možnosti uplatnění. Nicméně pro její zvolení jsou kritické 3 základní faktory – přesnost, jednoduchost a integrita[2].

- **Přesnost** – Zákazníci by měli být vyúčtováni na základě skutečně poskytnuté flexibility, ne více či méně. Zvolená metodika by tak měla vycházet z dostupných dat k vytvoření přesného odhadu, jaké zatížení by bylo, kdyby nedošlo k aktivaci.
- **Jednoduchost** – Baseline by měla být dostatečně jednoduchá, aby ji pochopily, vypočetili a implementovali všechny zúčastněné strany, včetně koncových zákazníků. Mimo jiné by také mělo být možné stanovit baseline již před zahájením aktivace, nebo v jejím průběhu, aby ji bylo možné následně využít k monitorování omezované zátěže v reálném čase.
- **Integrita** – Metodika by neměla zahrnovat atributy, které by podporovaly nebo umožňovaly zákazníkům zkreslovat jejich výchozí hodnoty nepravdivou spotřebou.

Vybalancování těchto atributů není jednoduché. V některých případech může být baseline odolná vůči zkreslení tak složitá, že ji nebudou všichni účastníci schopni aplikovat. Na druhé straně pak nejjednodušší možné metodiky by mohli umožnit využití baseline ve svůj prospěch. Tudíž je při výběru správné metodiky podstatné brát ohled na všechny zmiňované atributy [11].

Pro vybrání vhodné metodiky je však také nutné zohlednit pro jaký typ poskytovatele metodiku navrhujeme, proto lze z pohledu baseline oblast DSR rozdělit do tří kategorií [12].

- **Kategorie 1** zahrnuje velké poskytovatele flexibility, u kterých je baseline sjednávána individuálně podle možností technologie daného zákazníka. Jedná se pak o pevný sjednaný hodinový diagram, nebo dohodnuté sofistikovanější řešení)
- **Kategorie 2** zahrnuje poskytovatele flexibility se stabilním tvarem denního diagramu a lze tak s dostatečnou přesností vycházet z historických dat daného zákazníka.
- **Kategorie 3** zahrnuje poskytovatele flexibility s proměnlivým tvarem denního diagramu spotřeby, kde historická data nedosahují prakticky využitelných výsledků (pro tyto PoFl je možné zvážit využití tzv. dynamických tarifů – implicitní, cenově řízená flexibilita)

3.1.1 Průběh aktivace

Je zde mnoho možností průběhů aktivace avšak pro sjednocení a zjednodušení se americká organizace NAESB udávající energetické standardy zasadila o jednu základní strukturu, jež definuje jak by měl průběh aktivace vypadat [13]. Jak je z obr. 3.2 patrné, struktura obsahuje dva typy notifikací na nadcházející událost. V

některých případech má možnost operátor trhu upozornit poskytovatele flexibility nebo agregátora, že s vysokou pravděpodobností dojde k aktivaci právě na jejich zařízení. Druhý typ upozornění nastane při vyslání aktivačního pokynu opět operátorem trhu [13].

Fáze 1

Po vydání pokynu ke snížení zátěže na daném zařízení proběhne 1. fáze, která je spojená s rampou poklesu zátěže na daném zařízení.

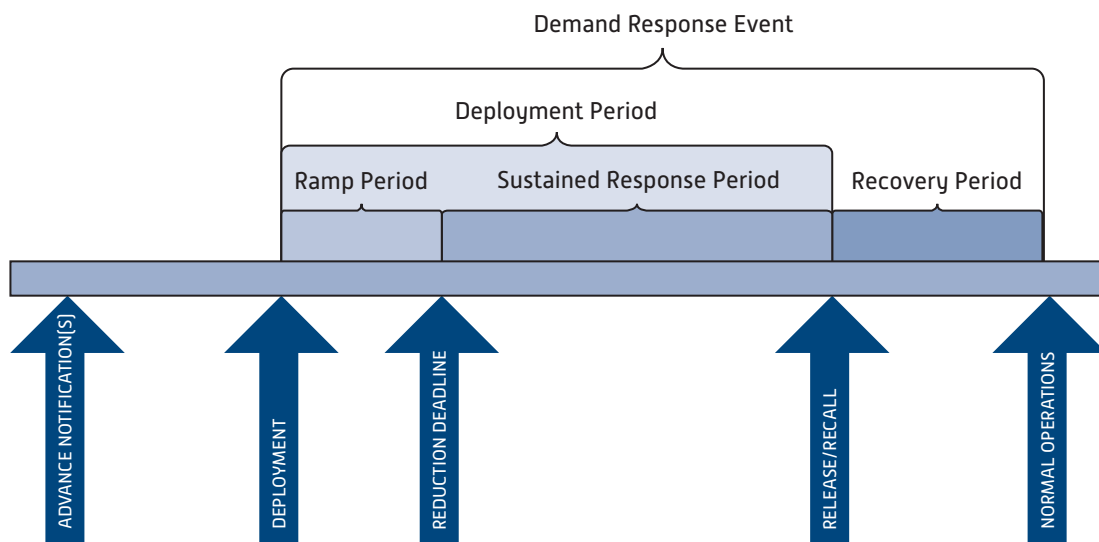
Fáze 2

Druhou fází je pak udržovaná doba odezvy, což představuje časový úsek po který je udržována snížená spotřeba a je zakončena uvolňovacím pokynem nebo zásahem komfortního limitu poskytovatele flexibility.

fáze 3

V průběhu poslední fáze nastává zotavovací doba, během které nastává takzvaný rebound effect, který představuje odchylku od výchozího diagramu zatížení vlivem předchozí aktivace.

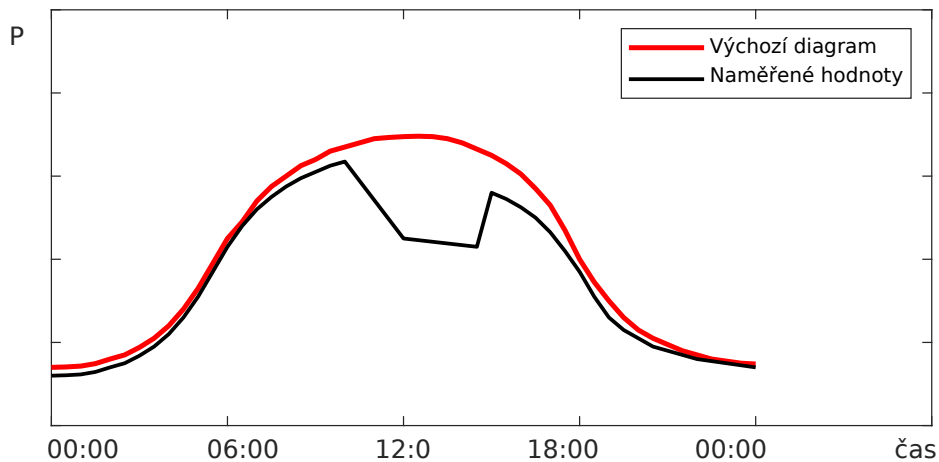
Po ustálení a vyrovnaní rebound effectu již probíhá odběr za standardních podmínek.



Obr. 3.2: Průběh aktivace převzato z [13]

Baseline tedy udává základní zátěž, kterou by zákazník měl, pokud by nedošlo k aktivaci. Následně dojde k porovnání s daty naměřenými v období aktivace a na základě tohoto srovnání dojde k vyúčtování zákazníka.

Na obr. 3.3, jež představuje zjednodušený výchozí diagram zatížení, je tento princip dobře patrný. V čase 11.00 dochází k aktivaci, na kterou poskytovatel flexibility reaguje a po následující čas udržuje svoji spotřebu pod sjednanou hranicí až do času 14.00, kdy dochází k ukončení (černá linie). Červená linie pak představuje navrhovanou baseline, neboli výchozí diagram, který představuje odhadovanou zátěž, pokud by nedošlo k aktivaci.



Obr. 3.3: Výchozí diagram zatížení převzato a upraveno z [2]

3.1.2 Základní metodiky stanovení baseline

Ve své publikaci „Demand response standards“, uvádí organizace NAESB, 5 základních metodik stanovení baseline [12].

- **Baseline Typ 1** je nejrozšířenější metodou pro poskytovatele flexibility 2. kategorie a využívá zprůměrovaná historická data, umožňuje úpravu vytvořeného diagramu na základě vybraných parametrů jako je například počasí nebo průběhů hodin předcházející aktivaci.
- **Maximum Base Load** využívá data z předchozího období a určuje tak konstantní linii, pod kterou se zákazník musí po dobu aktivace udržet.
- **Měření před/po** je metoda určená především pro krátkodobé aktivace typicky v rozmezí desítek minut až maximálně 3 hodin, kdy výsledná hodnota

baseline vznikne proložením aktivace konstantní linií vycházející z času před aktivací.

- **Baseline Typ 2** se využívá tam, kde není k dispozici měření z každého jednoho odběrného místa, tudíž je také omezena na skupiny s obdobným denním diagramem.
- **Generační** je velice specifickou metodou, a své uplatnění nachází pouze u zařízení disponující vlastní výrobou, jelikož pro její uplatnění jsou zapotřebí data z generátorů vlastní výroby.

3.2 Baseline typ 1

V dnešní době je nejběžnější metodikou baseline typu 1, mezi obvyklé variace se pak řadí:

- průměrování,
- regrese,
- klouzavý průměr,
- srovnatelný den.

Charakteristickými prvky baseline typu 1 je tvar baseline vycházející z průměrného historického zatížení, měřená data pro každé odběrné místo, využití dat naměřených ve dnech bezprostředně před aktivací a navíc také může zohledňovat vlivy počasí nebo jiných událostí. Další velkou výhodou této metody je poměrně jednoduchá aplikace a při vhodné volbě časového horizontu a metodiky vylučování nevhodných dat i relativní přesnost [2].

3.2.1 Průměrování

Průměrování je nejrozšířenější variací metodiky typu 1. Metodika je založena na průměrování dat z nedávných období za účelem vytvoření odhadů zatížení pro konkrétní časové intervaly. Tyto metody se pak nazývají „metoda reprezentativního dne“ nebo „metoda High/Middle X of Y“.

Metoda High/Middle X of Y zohledňuje Y dnů předcházející aktivaci a následně k návrhu baseline využívá průměrné hodnoty z X dnů s nejvyšším/středním zatížením (v závislosti na období). Zpráva společnosti EnerNOC [11] pak udává různé variace této metody nacházející uplatnění v různých částech Spojených států amerických. Například společnost PJM Interconnection působící na Východním pobřeží a Středozápadě využívá metody High 4 of 5, v Ontariu se lze setkat s High 15 of 20 a v Kalifornii zase High 10 of 10 [13]. Výběr počtu dní, pak závisí na následujících faktorech.

Časový horizont

Časový horizont vyjadřuje rozsah dní předcházející aktivaci, které zohledňujeme při výběru vhodných Y dní pro stanovení baseline. Ze studie provedené společností PJM pak vychází, že 30denní interval je pro návrh příliš omezující z hlediska dalšího vylučování a interval delší než 60 dní je již nadbytečný a nedoporučuje se z důvodu zastaralosti dat, která již nejsou reprezentativní [13].

Vylučovací pravidlo

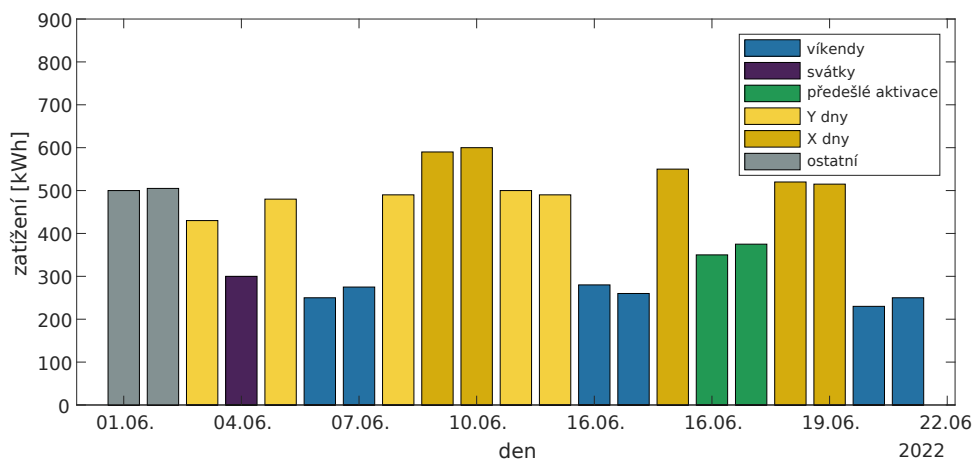
Vylučovací pravidlo je zde především pro vyhodnocení a nezahrnutí dní, jež nepředstavují reprezentativní data a jsou charakteristicky odlišné od zatížení v běžný pracovní den. Obecně se vylučují dny jako víkendy, svátky a především pak dny, během kterých proběhla aktivace flexibility na daném zařízení [2].

Pro vyšší přesnost navrhované baseline, lze dále výběr zúžit pomocí prahové hodnoty průměrné spotřeby daného dne. Pokud nastavíme danou hodnotu například na 10 %, znamená to tedy, že dny, jejichž průměrná hodnota denního zatížení se liší o více než 10 % průměrného zatížení všech Y dní, jsou následně z výběru vyřazeny [13].

Vztah mezi X a Y

Pokud již máme identifikovanou určitou řadu Y dní, tak se tato řada zúží na podskupinu X dní, tak aby jsme zajistili lepší reprezentativnost skupin. Tato podmnožina dní by měla být vytvořena na základě povahy aktivačního programu. Obecně však vyplývá, že v období sezóny (zima – vytápění, léto – klimatizace) je nevhodnější uvažovat nejvyšší hodnoty z možného výběru a během přechodných období je naopak vhodnější uvažovat střední hodnoty [13].

Jak lze pozorovat na obr. 3.4, při využití metody High 5 of 10, jsou na základě požadovaných kritérií v prvním kroku vyloučena data představující dny, kdy byla aktivována flexibilita, víkendy a obdobně nevyhovující. Následně získáváme skupinu Y, čítající požadovaných 10 dnů, tak aby byla data nejaktuálnější. Z těchto dnů pak na základě pravidla High 5 of 10 vybereme 5 nejvíce vyhovujících dní s průměrně největším zatížením [13]. Na základě průměrné hodnoty zatížení těchto dnů v čase lze pokračovat ke stanovení baseline.



Obr. 3.4: Výběr X z Y dní převzato a upraveno z [13]

Úprava baseline

Jak již bylo zmíněno, výchozí diagram je založen na X podobných dní předcházejících aktivaci, avšak podmínky ve stanovený den se oproti těm předchozím mohou v určitých ohledech lišit, především pak u zákazníků, jejichž zátěž je závislá na počasí. Z tohoto důvodu se výchozí diagram zatížení dále upravuje na základě dat ze dne probíhající aktivace, především pak z období 2-4 hodiny před aktivací. Takové úpravy mohou být skalární či aditivní.

Úpravy lze vypočítat pomocí skalární nebo aditivní metody. Skalární metoda je založena na procentuálním srovnání. Pokud je zatížení v období před oznámením o 30 % vyšší než vypočtená baseline, pak každý časový interval upravené baseline bude roven 130 % vypočtené baseline. Aditivní přístup místo toho vypočítává skutečný rozdíl zátěže v kW. Pokud je zatížení během výpočtového období 50 kW nad vypočtenou baseline, pak se každý interval upravené baseline v průběhu aktivace sníží o 50 kW [11].

3.2.2 Další metody typu 1

Mezi další metody typu 1 se řadí metoda „Srovnatelný den“ a metoda „Klouzavý průměr“.

Metoda „Srovnatelný den“ umožňuje za pomoci historických dat vyhledat srovnatelný den, během kterého nedošlo k aktivaci a využít jeho data k návrhu výchozího diagramu zatížení. Na rozdíl od metody průměrování však využívá pouze data z jednoho dne. Tato metoda má však nevýhody v neznalosti výchozího diagramu v čase

aktivace a také velice problematické srovnání a zhoršenou objektivitu při výběru dne.

Metoda „Klouzavého průměru“ funguje obdobně jako metoda průměrování, s tím rozdílem že jednotlivým dnům přiděluje různou váhu, těm vzdálenějším nižší a naopak těm nejbližší ke dni aktivace nejvyšší. Zároveň také využívá data z většího počtu dnů. Tato metoda se tedy opírá o větší počet bodů, což může potenciálně zvýšit přesnost, avšak pro zákazníky, jejichž spotřeba se sezóně výrazně mění, může představovat naopak sníženou přesnost, vzhledem k zahrnutí i zastaralých dat.

3.3 Metoda maximálního zatížení

Metoda maximálního zatížení je závislá na schopnosti zákazníka snížit svoje zatížení na přesně danou úroveň. V zásadě se stanoví maximální očekávaná spotřeba daného zákazníka a od té se určí konkrétní úroveň zatížení, na kterou by měl zákazník v průběhu aktivace přejít. Tato úroveň je pak dána jako maximální očekávaná zátěž mínus vázaná zátěž zákazníka. Jedná se tedy princip „poklesu na“ místo „poklesu o“, jak je tomu u metodiky typu 1. Mezi charakteristické vlastnosti této metody pak patří statický tvar výchozího diagramu, měření na každém odběrném místě a výstup z dat měření předešlého roku.

3.4 Baseline typ 2

Metodika typ 2 na rozdíl od ostatních metod nevyužívá data naměřená u konkrétních odběrových míst, ale pracuje s agregovanými daty od více odběratelů s obdobnou spotřebou a chováním. Následně pak využívá měření na několika jednotlivých lokalitách pro vytvoření odhadu průměrné zátěže daných jednotek a poté tato data využije k přerozdělení mezi jednotlivá odběrová místa. Této metoda je výhodná pouze v úspore za snížení počtu měřící zařízení.

3.5 Proveditelné metodiky pro malý měřený vzorek

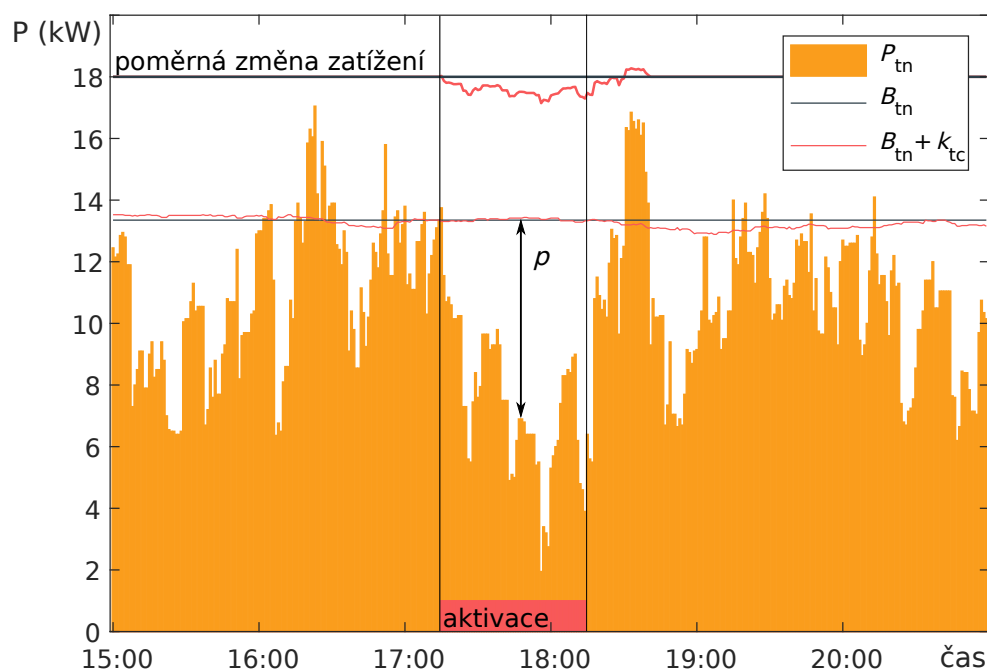
Vzhledem k náročnosti výše zmíněných metodik, především pak primární metodiky „Baseline typu 1“, je u nižšího vzorku nutné přistoupit k určitým zjednodušením a zvolení odlišných, nebo upravených postupů. S uvažováním nižšího vzorku je v první řadě nutné provést analýzu na agregovaných datech z celé skupiny domácností, díky čemuž lze následně dosáhnout vyšší stability diagramu zatížení, což umožňuje zvýšení přesnosti navrhované metodiky.

Jako alternativní metodiky lze uvažovat:

- metodiku měření před/po,
- metodiku referenční skupiny,
- upravenou metodiku Baseline typu 1.

3.5.1 Měření před/po

Metodu měření před/po lze uplatnit především v případě, že doba aktivace má krátké trvání, typicky od 10 minut do maximálně 3 hodin. V případě aktivace o delším trvání ji již nelze považovat za spolehlivou.



Obr. 3.5: Příklad užití metodiky měření před/po

Tato metodika vyhodnocuje výchozí diagram na základě dat z momentu těsně před aktivací, a ty následně využívá k proložení doby aktivace. Pro konkrétní aktivaci tedy platí, že změna zatížení je dána jako:

$$p_{tn} = B_{tn} - P_{tn}, \quad (3.1)$$

kde B_{tn} je rovno okamžitému příkonu podle stanovené baseline a P_{tn} je okamžitý měřený příkon.

$$B_{tn} = P_0 \quad (3.2)$$

P_0 odpovídá příkonu moment před aktivací. Průměrná změna zatížení je dále rovna

$$\bar{p}_{\text{tavg}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n p_t. \quad (3.3)$$

Pro tuto metodiku lze následně využít korekci na teplotu jež je definována jako:

$$k_{\text{tc}} = k_t(\vartheta_n - \vartheta_0), \quad (3.4)$$

kdy ϑ_n odpovídá okamžité měřené teplotě a ϑ_0 teplotě pro stanovenou baseline, v tomto případě venkovní teplotu moment před aktivací. k_t představuje teplotní koeficient. Teplotní koeficient k_t je určen na základě regresní analýzy závislosti aktuálního příkonu na venkovní teplotě u zkoumané skupiny domácností za celou dobu měření s výjimkou dnů, kdy probíhala aktivace.

Z naměřených dat bylo zjištěno, že závislost příkonu na teplotě pro původní dataset je přibližně dána jako:

$$k_t \approx -0,66 \text{ kW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}, \quad (3.5)$$

pro rozšířený dataset je pak dána jako:

$$k_t \approx -2,15 \text{ kW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}, \quad (3.6)$$

S uvažováním korekčního činitele tedy změnu zatížení určíme jako:

$$p_t = (B_{\text{tn}} + k_{\text{tc}}) - P_{\text{tn}}, \quad (3.7)$$

3.5.2 Metodika referenční skupiny

Metodika referenční skupiny, jak už název napovídá, vychází ze srovnání s referenční skupinou typově blízkých objektů ze stejné oblasti, jejichž odběr nebyl ovlivněn za pomoci pokynů vydaných třetí stranou. Období aktivace tedy lze vyplnit daty naměřených na referenční skupině.

Vzhledem k faktu, že objekty pochází ze shodné oblasti, není nutné provádět korekci na teplotu, jelikož je teplota pro obě skupiny totožná.

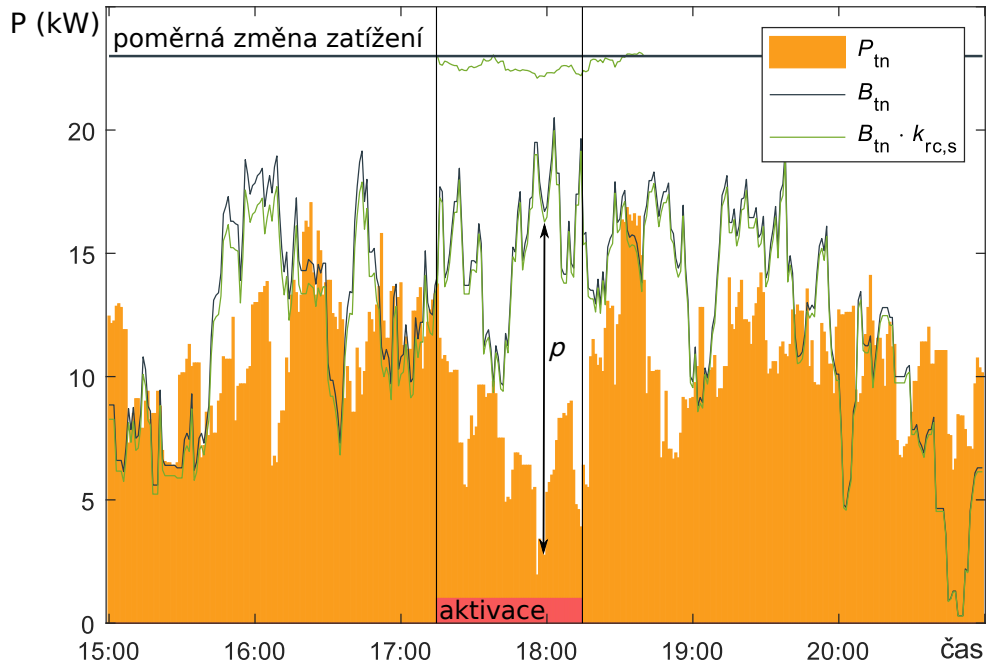
$$p_t = B_{\text{tn}} - P_{\text{tn}}, \quad (3.8)$$

kde

$$B_{\text{tn}} = P_{\text{ref},n}, \quad (3.9)$$

$P_{\text{ref},n}$ odpovídá okamžitému příkonu referenční skupiny. Průměrná změna zatížení je dána jako

$$\bar{p}_{\text{tavg}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n p_t. \quad (3.10)$$



Obr. 3.6: Příklad užití metodiky referenční skupiny

Pro tuto metodiku je však nutné zavést korekční rozdílový činitel, který vyrovnává rozdíl zatížení měřené a referenční skupiny, daný jejich odlišností. Pro toto lze využít skalární či aditivní metodu. Pro skalární metodu

$$k_{rc,s} = \frac{P_0}{P_{ref,0}}, \quad (3.11)$$

P_0 je rovno okamžitému zatížení moment před aktivací pro měřený vzorek a $P_{ref,0}$ pro referenční skupinu. Změna zatížení je pak rovna

$$p_t = (B_{tn} \cdot k_{rc,s}) - P_{tn}. \quad (3.12)$$

Pro metodu aditivní pak

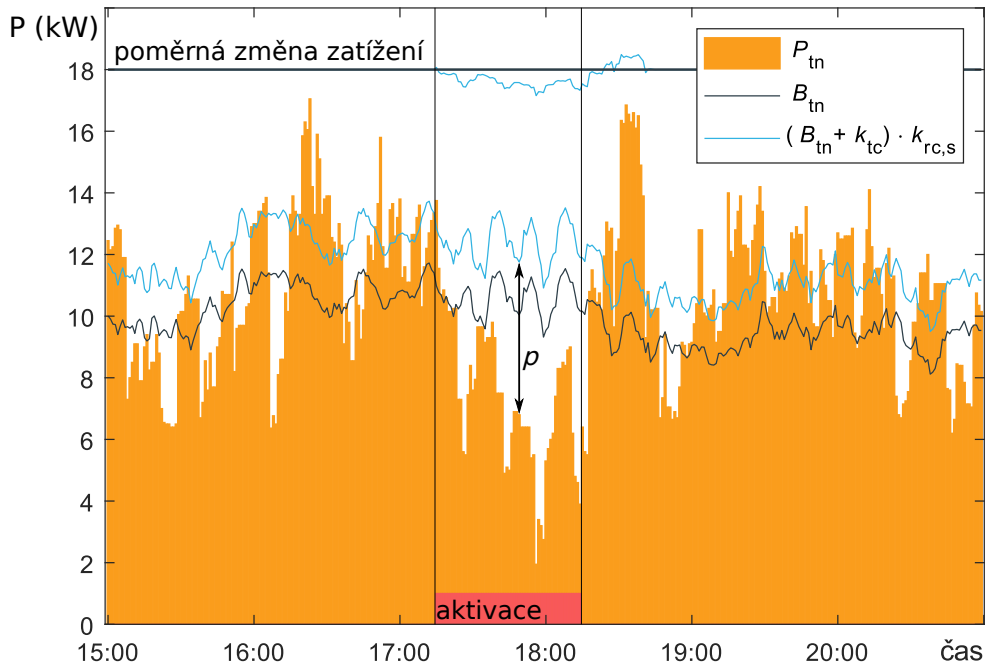
$$k_{rc,a} = P_0 - P_{ref,0} \quad (3.13)$$

$$p_{tn} = (B_{tn} + k_{rc,a}) - P_{tn}. \quad (3.14)$$

Tato metodika je však spíše orientační a nedosahuje potřebné přesnosti, vzhledem k rozdílným vlastnostem domácností a tepelných čerpadel, na kterých probíhá měření. Jako relevantní lze považovat charakter a chování baseline, nikoli však velikost těchto hodnot.

3.5.3 Upravená metodika typu 1

Vzhledem k základu této metodiky ji lze z výše uvedené trojice považovat za nej-
přesnější, jelikož vychází z dat získaných na stejných objektech na kterých je vyu-
žita a zároveň kopíruje typický profil zatížení dané skupiny. Tato metodika uvažuje
historická data ze dnů předcházející aktivaci, za předpokladu že tyto dny nebyly na-
rušeny aktivací či jinou neobvyklou událostí. Tyto dny jsou následně průměrovány
za účelem vzniku referenční baseline.



Obr. 3.7: příklad užití upravené metodiky typu 1

Změna zatížení je dána jako:

$$p_t = B_{tn} - P_{tn} \quad (3.15)$$

$$B_{tn} = \bar{P}_{hn} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{hn,n} \quad (3.16)$$

Baseline B_{tn} je stanovena na základě vhodných historických dat jako průměr oka-
mžitých hodnot příkonu jednotlivých objektů $P_{hn,n}$ v těchto dnech. Průměrná změna
zatížení je dána jako

$$\bar{p}_{tavg} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n p_t \quad (3.17)$$

Pro tuto metodiku je rovněž nutná korekce na teplotu, jelikož zprůměrovaná teplota z dnů předcházející aktivaci je odlišná od aktuální teploty při aktivaci. Korekce probíhá obdobně jako u metodiky měření před/po. Jelikož se jedná o shodné skupiny jako v případě metodiky měření před/po, uvažujme rovněž $k_t \approx -0,66 \text{ kW} \cdot \text{°C}^{-1}$, resp. $k_t \approx -2,15 \text{ kW} \cdot \text{°C}^{-1}$.

$$k_{tc} = k_t(\vartheta_n - \bar{\vartheta}_{hn}) \quad (3.18)$$

$\bar{\vartheta}_{hn}$ odpovídá průměrné okamžité teplotě všech dnů uvažovaných pro stanovení historické baseline.

Je také možné, ne však nutné, zavést korekční rozdílový činitel, vyrovnávající rozdíl zatížení předcházející dané aktivaci od historické baseline. Rozdílový činitel lze opět zavést skalární či aditivní metodou. Při využití teplotní a rozdílové korekce současně, je nutné při návrhu $k_{rc,a}$ či $k_{rc,s}$ uvažovat hodnoty již po korekci ne teplotu.

$$k_{rc,s} = \frac{P_0}{(\bar{P}_{h0} + k_{tc})}, \quad (3.19)$$

$$k_{rc,a} = P_0 - (\bar{P}_{h0} + k_{tc}). \quad (3.20)$$

Výsledná změna zatížení je tedy dána jako:

$$p_{tn} = (B_{tn} + k_{tc} + k_{rc,a}) - P_{tn} \quad (3.21)$$

pro aditivní metodu nebo jako:

$$p_{tn} = ((B_{tn} + k_{tc}) \cdot k_{rc,s}) - P_{tn} \quad (3.22)$$

pro metodu skalární.

Ze zmiňovaných metodik představuje největší potenciál upravená metodika Baseline typu 1. Tento fakt vyplývá z charakteru metodiky, kdy jsou využita data z měřené skupiny zohledňující charakter dané skupiny, společně s vyloučením narušených dnů a zavedením potřebných korekčních činitelů.

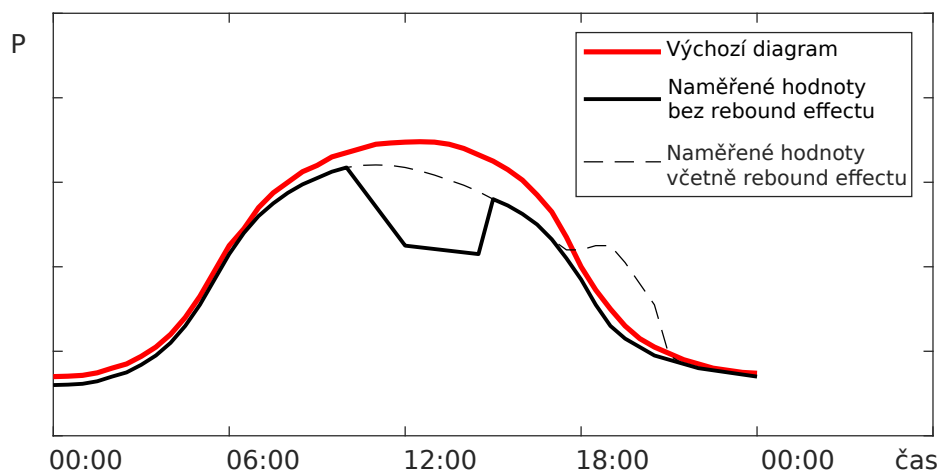
Metodika měření před/po představuje zjednodušení s ohledem na způsob navržené baseline jako statické hodnoty po celou dobu aktivace, vycházející z dat moment před aktivací. Tato metodika tedy nepředstavuje reálné chování měřených domácností v případě, že by aktivace nebyla uplatněna. I přes tyto nedostatky se pro krátké aktivace jedná o jednoduchou a relativně spolehlivou metodiku, která může posloužit jako dobré srovnání pro metodiky ostatní.

Metodika referenční skupiny je v základu z hlediska přesnosti nevyhovující. Avšak při zvolení vhodné referenční skupiny a zavedení potřebných korekčních činitelů může přinést uspokojivé výsledky a především pak skvělou integritu, jelikož zákazník není žádným způsobem schopen ovlivnit její chování.

Pro všechny metodiky pak platí, že s rostoucím vzorkem přímo úměrně rostou i jejich požadované vlastnosti jako je přesnost a integrita.

3.6 Rebound effect

Aktivace flexibility má v případě DSR také dopad i v čase následujícím po aktivaci, tento jev označujeme jako „Rebound effect“ nebo také zpětný efekt flexibility. Rebound effect má rovněž vliv na obchodníka, jelikož prodlužuje trvání odchylky od stanoveného typového diagramu, na základě kterého obchodník nakupuje energii, a tudíž je v případě poskytování flexibility prostřednictvím nezávislého agregátora nutné stanovit způsob vypořádání tohoto jevu [12].



Obr. 3.8: Vliv rebound effectu převzato a upraveno z [2]

Do budoucna je nutné kategorizovat poskytovatele flexibility na základě možnosti vzniku rebound effectu a délky jeho trvání. Odpovědnost za vzniklou odchylku vlivem odložené spotřeby spadá na agregátora flexibility společně s odchylkou vzniklou samotným poskytováním flexibility [2].

Pro stanovení trvání rebound effectu a tudíž i odchylky vlivem odložené spotřeby navrhuji využití dat z pilotního projektu. Vzhledem k zaměření projektu na využití flexibility topných systémů, uvažují moment odeznění rebound effectu jako moment, kdy reálná spotřeba topného systému překročí navrhovanou baseline ve směru, ve kterém působila předcházející aktivace.

Na základě takto naměřených hodnot lze stanovit standardizované časové okno, které bude odpovídat průměrnému trvání vlivu rebound effectu. Toto časové okno následně navrhuji sloučit s časem trvání aktivace a řešit vliv celé události jako jeden celek za pomoci stanovené baseline.

4 Scénáře aktivačních pokynů flexibility

Jednotlivé scénáře byly vytvořeny na základě podkladů daných společností ČEZ Prodej, a.s. ve spolupráci se společností Tenauro s.r.o., která fyzicky prováděla montáž a řízení jednotlivých tepelných čerpadel portfolia.

Na základě podkladů a možností byly vytvořeny následující scénáře pro jednotlivé dny v týdnu. Scénáře byly tvořeny tak, aby systematicky prověřili možnosti řízení tepelných čerpadel, jejich limitace a celkový přínos. Z tohoto důvodu se scénáře opakují v týdenních cyklech a k jednotlivým typům aktivací dochází vždy ve stejný den a čas. Scénáře jsou jednotné pro všechna tepelná čerpadla v ovládané části portfolia. Pro účely získání nenarušených dat pro konkrétní skupinu je stanoven jeden všední den, který probíhá bez jakéhokoli zásahu. Tyto prerekvizity byly stanoveny za účelem vytvoření ucelené statistiky z dosažených výsledků.

4.1 Typový diagram dodávky

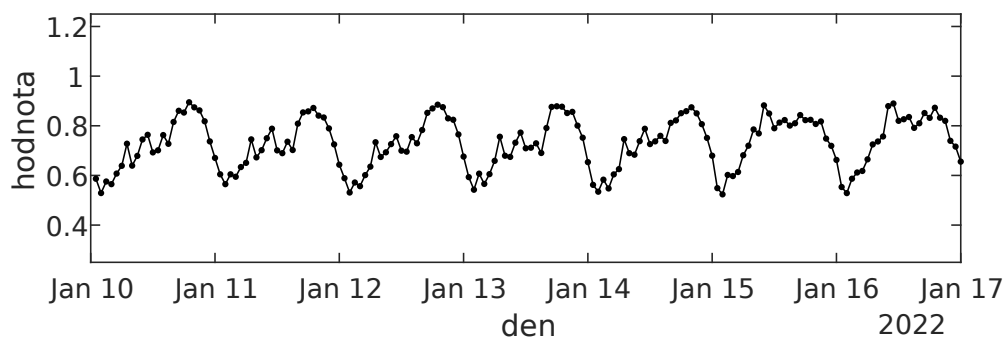
Dané scénáře rovněž vychází z normalizovaných TDD (Typových Diagramů Dodávky) vydávaných společností OTE, a.s.. Tyto diagramy udávají předpokládanou spotřebu pro danou skupinu domácností a daný den.

Normalizované typové diagramy dodávky představují 8760 relativních hodnot průměrných hodinových odběrů, jež jsou vztažené k hodnotě ročního maxima průměrných hodinových odběrů. Tento diagram je stanoven na základě měření normalizovaného vzorku vybrané skupiny spotřebitelů [15].

4.2 Scénáře pro konkrétní skupinu spotřebitelů

Objekty zkoumané v této práci spadají do tarifní sazby D57d, jež je určena pro spotřebitele využívající jako hlavní zdroj vytápění topný elektrický spotřebič, především pak tepelné čerpadlo. Jedná se o dvoutarifní sazbu, kdy je po 20 hodin denně využíván nízký tarif. Objekty s touto tarifní sazbou spadají do skupiny TDD 7, ta má např. pro první vyhodnocovaný týden následující normalizovaný průběh, viz obr.4.1

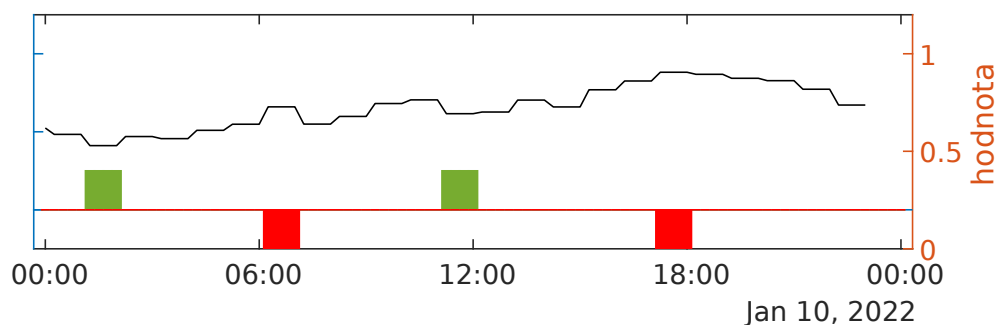
Z diagramu je patrné, že pro všední dny je průběh denní spotřeby téměř identický, stejně tak i pro víkendové dny. Tudíž z hlediska chování domácnosti je zapotřebí rozlišovat jako typické pouze všední a víkendové dny.



Obr. 4.1: TDD 7 pro 1. týden měření

4.2.1 Scénář č.1 (pondělí)

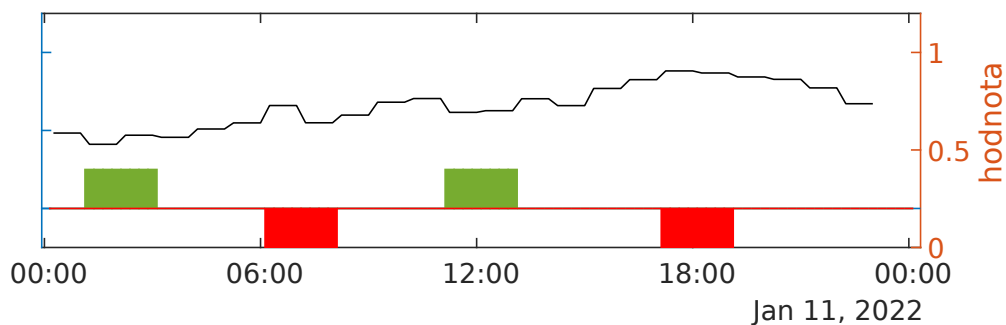
Scénář uplatňovaný každé pondělí je zaměřen na vyhlazování spotřeby v průběhu celého dne. Pomocí ranního pokynu ke zvýšení příkonu tepelných čerpadel dochází k předtopu objektů v čase od 01:00 do 2:00 a vykrytí přítomného propadu odběru. Následně v období první špičky, ke které dochází mezi 06:00–07:00, je vydán pokyn pro snížení příkonu tepelných čerpadel, ten má za účel tuto ranní špičku omezit. Obdobné aktivace nastávají rovněž v dopoledním propadu po 10:00, kdy je vydán pokyn na zvýšení příkonu a předtop objektu, a v období večerní špičky, která nastává mezi 17:00–18:00, kdy je vydán pokyn ke snížení příkonu.



Obr. 4.2: Aktivační pokyny (pondělí)

4.2.2 Scénář č.2 (úterý)

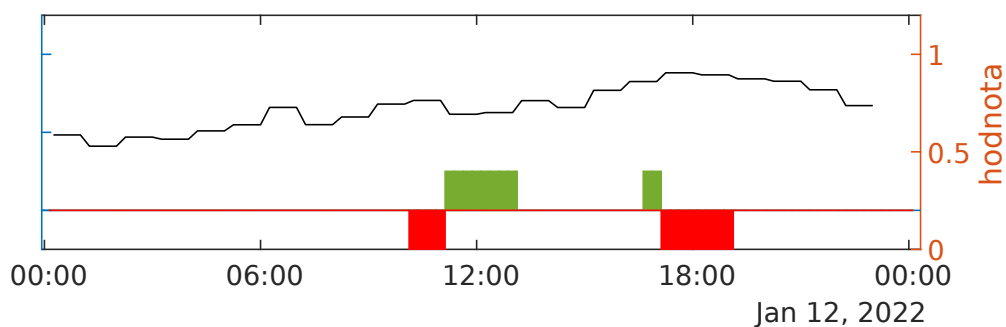
Scénář pro úterní aktivace kopíruje scénář 1 s tím rozdílem, že využívá maximální možnou délku aktivace. To umožňuje otestovat do jaké míry je možné uplatňovat pokyny bez narušení vzdáleného ovládání komfortním limitem uživatele při vyhlazování diagramu.



Obr. 4.3: Aktivační pokyny (úterý)

4.2.3 Scénář č.3 (středa)

Scénář č.3 zkoumá možnosti prodloužení potřebné aktivace za pomoci předcházejícího pokynu opačného charakteru. K první aktivaci (snižujícímu pokynu) dochází hodinu před poledním propadem. Tato aktivace má za úkol snížit teplotu v objektu. Okamžitě po skončení snižujícího pokynu dochází k vydání pokynu na zvýšení, jehož účelem je vykrytí přítomného propadu odběru. V období večerního maxima dochází k obdobné aktivaci opačného rázu. V čase 16:30, půl hodiny před očekávaným maximem, je vydán pokyn na zvýšení za účelem rychlého předtopu objektu. Smyslem této aktivace je prodloužit možnost trvání následujícího snižujícího pokynu a omezit dopad rebound effectu.

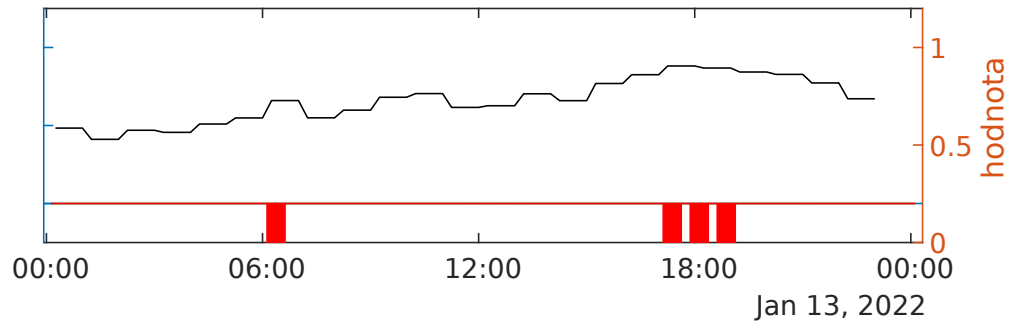


Obr. 4.4: Aktivační pokyny (středa)

4.2.4 Scénář č.4 (čtvrtek)

Scénář aktivačních pokynů pro čtvrtek má za úkol zkoumat vliv krátkých pokynů. V období ranní špičky se jedná pouze o jeden snižující pokyn trvajícím půl hodiny,

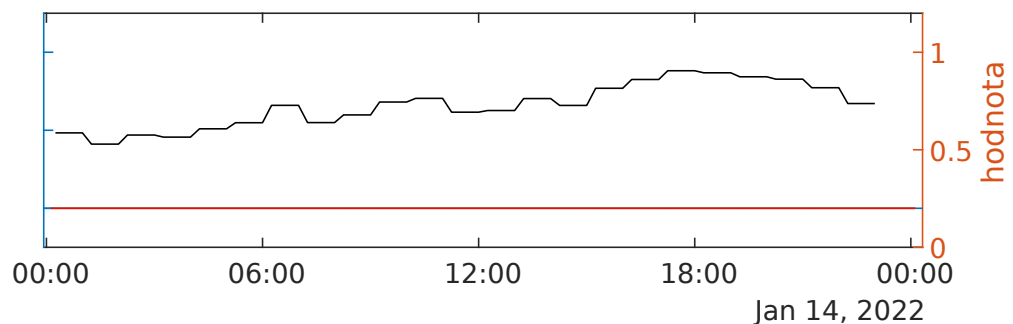
se začátkem v 6:00. V období večerní špičky je využito 3 po sobě jdoucích, půlhodinových, snižujících pokynů, mezi kterými je 15minutový rozestup. Zkoumanými parametry jsou především změna zatížení a reakce komfortního limitu v porovnání s dlouhotrvajícím pokynem.



Obr. 4.5: Aktivační pokyny (čtvrtek)

4.2.5 Scénář č.5 (pátek)

Páteční spotřeba probíhá bez zásahu dálkového řízení, za účelem získání nenarušených hodnot.

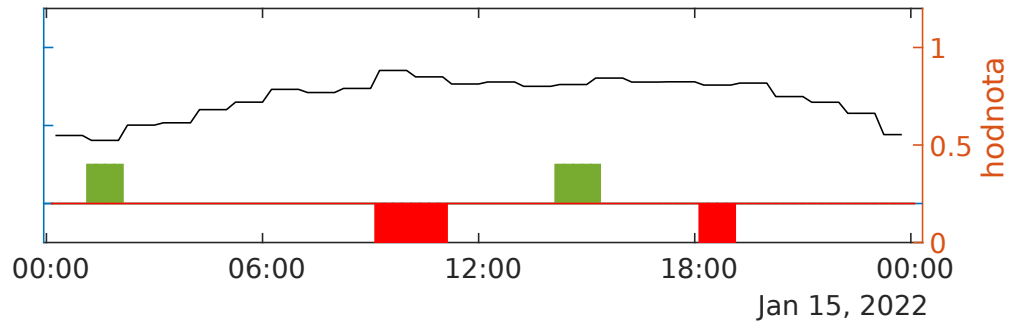


Obr. 4.6: Aktivační pokyny (pátek)

4.2.6 Scénář č.6 (sobota)

Sobotní scénář aktivací je navržen opět pro vyhlazování denního diagramu pro víkendový profil spotřeby. V nočních hodinách má za úkol, za pomoci zvyšujícího pokynu

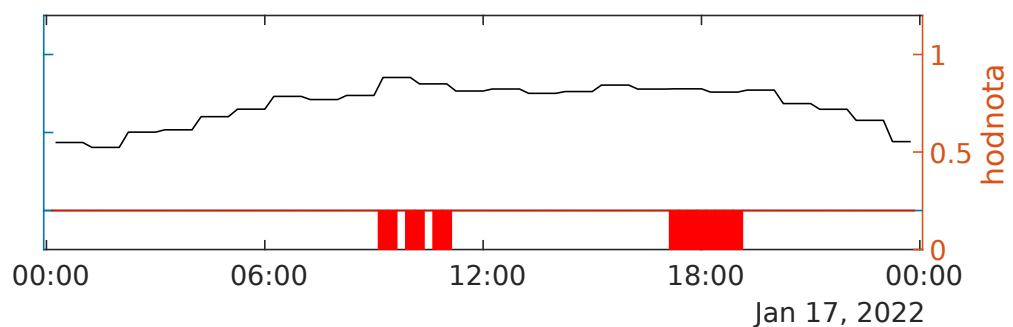
s trváním 1 hodiny, vykryt přítomný propad spotřeby, následně v dopoledních hodinách jedním dlouhým 2hodinovým snižujícím pokynem omezit dopolední špičku. Odpolední aktivace jsou obdobného charakteru, v trvání 1.5 hodiny pro zvyšující pokyn uplatněný ve 14:00 a 1 hodina pro snižující v 18:00.



Obr. 4.7: Aktivační pokyny (sobota)

4.2.7 Scénář č.7 (neděle)

Nedělní scénář, obdobně jako čtvrteční, zkoumá rozdíl ve využití krátkých po sobě jdoucích pokynů a jednoho dlouhého, dále také zda je zde rozdílné chování pro víkendový charakter zatížení v porovnání s všedním dnem.



Obr. 4.8: Aktivační pokyny (neděle)

5 Analýza a vyhodnocení měřených dat

V rámci spolupráce se společností ČEZ Prodej, a.s. byla získána data z reálného měření, které probíhalo od prosince 2021 do března 2022. Původním záměrem bylo vyhodnocení měřených dat z portfolia čítající 60 objektů. V plánu bylo využít část jakožto referenční skupinu a zbytek pro samotné měření využití flexibility.

Vlivem nepříznivých podmínek, chyb měření a častých výpadků zasílaných dat byla velikost tohoto portfolia značně snížena. Výsledky měření, ke kterým mi byl v rámci mé práce umožněn přístup, byly nasbírány celkem z 10 odběrných míst s určitou chybovostí viz Tab. 5.2. Následně byl poskytnut rozšířený dataset, obsahující 35 odběrných míst, avšak kvalita těchto dat byla značně zatížena chybou. Data z tohoto rozšířeného datasetu použitelná pro následné vyhodnocení činila pouze 20 řízených odběrných míst a 6 neřízených v období 13. 12. 2021–30. 01. 2022. Výběr období a těchto odběrných míst byl proveden na základě četnosti výpadků měření viz Tab.5.3. Přesto i na tomto menším vzorku lze vypořizovat jisté vzorce chování, a tak lze ověřit funkčnost dříve uvedených metodik, určit procentuální úspěšnost pokynů, průměrnou změnu zatížení pro danou skupinu a typ pokynu, průměrnou délku trvání rebound effectu a vliv výpočtového okna na získaná data. Statistický vzorek je malý, tudíž lze očekávat nižší relevantnost získaných výsledků.

Měřené objekty se nachází ve stejné lokalitě - Plzeňský kraj (Domažlicko), tudíž pro ně byla zaslána pouze zprůměrovaná venkovní teplota. Dále v rámci úspory předávaných dat byly zapisovány pouze změnové stavy všech měřených veličin, Tab.5.1. Celý soubor měřených dat z původního datasetu a z rozšířeného datasetu je k nahlédnutí v Příloze A a příloze B.

Následující Tab. 5.1 zobrazuje část původního datasetu v podobě, ve které k nim byl umožněn přístup. Ve sloupci „DT“ se nachází časová značka, sloupec „ \bar{t} (°C)“ zobrazuje aritmetický průměr okolních teplot všech objektů ve sledované skupině, sloupec č. 3 zobrazuje stav pokynu dle uvedeného systému, následující sloupce představují aktuální příkon jednotlivých čerpadel, kdy poznámky „True“ a „False“ charakterizují, do jaké skupiny objekt spadá, „True“ připadá skupině řízených čerpadel a „False“ skupině neřízených.

Čerpadla byla řízena v režimu, kdy snižující pokyn znamenal snížení příkonu na nulovou hodnotu a naopak zvyšující pokyn znamenal přechod do stavu 100%. Jak lze pozorovat z dat, viz příloha A, ne vždy čerpadlo přešlo do absolutního stupně 0%/100%, což však nelze považovat za neúspěšnost daného pokynu, jelikož ke znatelné změně zatížení došlo.

Tab. 5.1: Vzorová data z měření

DT	\bar{t} (°C)	[0 nic/1 sníž/2 zvýš]	P_n TČ 0_True	P_n TČ 1_False	...
1/11/22 6:12	-0,27	0	2,80	3,70	
1/11/22 6:13	-0,27	0	2,80	3,70	
1/11/22 6:14	-0,23	0	2,80	3,70	
1/11/22 6:15	-0,23	1	2,80	4,10	
1/11/22 6:16	-0,23	1	0,45	3,70	...
1/11/22 6:17	-0,13	1	0,00	3,70	
1/11/22 6:18	-0,13	1	0,00	3,90	
1/11/22 6:19	-0,13	1	0,00	3,90	
...	

Vzhledem k faktu, že jedním ze zamýšlených výstupů práce je vyhodnocení procentuální úspěšnosti reakce na pokyn, je tento soubor dat nevyhovující, jelikož jeho součástí je pouze vydání pokynu, nikoliv však úspěšnost reakce. Pro tento dílčí závěr lze namísto toho využít data z měření, jež probíhalo v jarním přechodném období od 10. 03. 2021 do 30. 06. 2021 viz Příloha C, jejichž součástí je i informace o úspěšnosti reakce na vydaný pokyn.

5.1 Zpracování naměřených dat

Pro úspěšné zpracování dat je nutné provést selekci chybových dat. Rovněž je zapotřebí vybrat vhodnou metodiku pro daný soubor a provést výběr vhodného výpočtového okna, jenž nám poslouží ke spolehlivému vyhodnocení trvání rebound effectu.

5.1.1 Selekcce dat

V průběhu pilotního projektu došlo od úterý 01. 02. 2022 k výpadku ovládacích pokynů, tento výpadek trval do 28. 02. 2022, kdy i po tomto datu docházelo k častým výpadkům zasílaných dat, jak v původním tak v rozšířeném datasetu. Tudíž data po 01. 02. 2022 nebylo možné využít. Dále v průběhu celého měření docházelo k občasným výpadkům zasílaných dat z měření aktuálního příkonu. Řešením této situace bylo rozhodnutí ke zúžení výběru týdnů, které budou pro následnou analýzu využity. Tab. 5.2 zobrazuje procentuální spolehlivost zasílaných dat z původního datasetu. Data z 52. týdne 2021 nelze využít, jelikož se v rámci původního datasetu jedná o týden neúplný, data od 5. týdne 2022 jsou bez pokynů.

Tab. 5.2: Spolehlivost měření na ovládaných tepelných čerpadlech

hodnoty v (%)	TČ0	TČ11	TČ13	TČ15	TČ30	průměr
2021 W52	58,31	86,84	80,53	93,02	77,16	79,17
2022 W1	72,78	86,55	94,51	98,86	85,33	87,61
2022 W2	85,82	95,48	100,00	98,95	93,72	94,79
2022 W3	74,40	96,69	100,00	16,89	96,64	76,92
2022 W4	76,70	94,57	99,99	79,62	93,32	88,84
2022 W5	65,89	90,88	98,79	99,37	88,04	88,59
...

Z těchto důvodů lze provést analýzu pouze na datech z týdnů 1 až 4 2022, kdy nejvyšší spolehlivosti dosahují data z 2. (10. 01.–16. 01. 2022) a 4. (24. 01.–30. 01. 2022) týdne, které budou v rámci zachování dostatečné spolehlivosti, dále uvažovány pro vytvoření prerekvizit pro vyhodnocení rozšířeného datasetu.

Pro vyhodnocení vlivu aktivačních pokynů a dopadů aktivace je využito rozšířeného datasetu. Z důvodu zachování věrohodnosti s ponecháním co nejširšího portfolia bylo přijato vylučující kritérium stanovující minimum 70 % týdenní spolehlivosti uvažovaných dat. Tedy pokud na odběrovém místě došlo k výpadkům zasílaných dat přesahující 30 % týdenních hodnot, byl tento týden pro konkrétní čerpadlo vyloučen ze statistiky.

Tab. 5.3: Spolehlivost měření na ovládaných tepelných čerpadlech (rozšířený dataset)

	TČ 1	TČ 2	TČ 3	TČ 4	TČ 6	TČ 9	TČ 10	TČ 11	TČ 12	TČ 13
2021 W50	85,30	77,09	90,09	72,38	79,73	79,19	79,35	83,01	75,71	85,19
2021 W51	91,98	83,69	81,42	76,07	83,68	79,80	82,87	95,62	80,14	95,55
2021 W52	82,87	76,29	70,82	69,98	78,98	71,93	80,97	88,71	70,58	89,63
2022 W1	86,66	79,64	92,99	84,90	77,53	82,03	77,64	86,54	83,95	94,51
2022 W2	91,44	93,13	100,00	100,00	77,85	79,91	82,24	95,48	91,02	100,00
2022 W3	92,10	90,66	100,00	100,00	87,07	81,61	77,00	96,69	70,62	100,00
2022 W4	90,50	88,53	100,00	100,00	82,60	75,45	80,70	94,57	72,63	99,99

	TČ 14	TČ 15	TČ 17	TČ 19	TČ 20	TČ 21	TČ 23	TČ 24	TČ 25	TČ 29	průměr
	70,73	88,54	88,57	73,09	83,92	71,90	70,57	84,47	79,28	26,18	79,90
	71,05	96,32	89,02	84,50	92,43	73,67	77,08	81,02	88,13	91,42	84,77
	71,48	84,14	78,30	87,00	87,06	73,02	77,52	58,97	71,83	72,03	78,06
	77,19	98,86	85,89	74,28	80,48	71,84	79,97	77,92	79,94	72,41	82,26
	81,54	98,95	87,04	89,00	91,44	80,35	77,82	85,90	83,23	82,25	88,43
	75,33	16,90	84,52	91,73	83,41	74,76	74,84	85,60	87,24	83,71	86,15
	81,49	79,61	81,37	79,33	88,84	54,81	74,58	83,25	84,25	88,51	85,59

5.2 Volba vhodné metodiky

Vzhledem k velikosti měřeného portfolia lze uvažovat jako relevantní pouze metodiky použitelné pro malý měřený vzorek, tedy

- Měření před/po,
- Metodika referenční skupiny,
- Upravená metodika typu 1,

z nichž, jak už bylo v rešeršní části zmíněno, nejspolehlivější výsledky slibuje, s ohledem na komplexnost a charakter metodiky, **upravená metodika typu 1**. Z tohoto důvodu je tato metodika v následující analýze a vyhodnocení uvažována jako metodika hlavní, kdy zbylé dvě jsou využity pro kontrolní účely.

5.3 Stanovení výpočtového okna

Data byla zapisována v intervalu 1 minuta, toto okno však není pro vyhodnocení vhodné hned z několika důvodů. Těmito důvody jsou například zanesení výrazných odchylek především krátkodobého rázu, vlivem výpadků zasílaných dat, či nestabilním chováním samotné jednotky. Dalším z důvodů je vysoká náročnost na výpočetní techniku a přenosy výrazně větších objemů dat.

S růstem počtu objektů v řízeném portfoliu úměrně roste i stabilita agregovaných dat, avšak pro portfolia čítající menší počet odběrových míst, je vhodné využití menšího výpočtového okna, než je standardních 15 minut. Výchozími možnostmi jsou právě 1minutové, jakožto základní forma dat, 15minutové, které je využíváno pro potřeby obchodního měření, a také 5minutové a 10minutové, jakožto možné alternativy.

- 1minutové
- 5minutové
- 10minutové
- 15minutové

Na zkoumané parametry jako je procentuální účinnost pokynů nebo průměrná změna zatížení na pokyn nemá velikost výpočtového okna přímý dopad. Avšak při zkoumání délky rebound effectu je tento parametr zásadní.

Pro vyhodnocení konce rebound effectu pozorujeme moment, kdy reálná spotřeba topného systému překročí navrhovanou baseline ve směru, ve kterém působila předcházející aktivace.

Jak lze pozorovat na průbězích Obr. 5.1–5.4 vytvořených na základě původního datasetu, je zřejmé, že při využití 1minutového výpočtového okna je hodnota zatížení značně rozkolísaná a především pro metodiku referenční skupiny je zde zanesena výrazná chyba, tudíž při uvažování 1minutového výpočtového okna není pro stanovení

rebound effectu metodika referenční skupiny směrodatná. Ostatní metodiky nesou stejné chyby, avšak v menší míře.

Při rozšíření výpočtového okna na 5 minut lze pozorovat vyhlazení a částečné ustálení výrazných výkyvů, avšak pro metodiku referenční skupiny jsou odchylky stále příliš vysoké pro legitimizaci této metodiky.

Výpočtové okno 10 minut pro malá portfolia představuje největší potenciál. Pro metodiku referenční skupiny je velikost úchylek přijatelná a jak lze pozorovat na ukázkových datech z původního datasetu v Tab. 5.6 je mezi všemi metodikami určitá konjunkce.

Výpočtové okno 15 minut, které bylo ze strany společnosti ČEZ Prodej, a.s primárně doporučováno představuje ze všech zkoumaných velikostí okna nejstabilnější hodnoty zatížení. Avšak při využití malého portfolia jako je například původní dataset, není samotná zkoumaná skupina příliš stabilní. Tento fakt vede k ignorování drobných změn, které se v malém portfoliu často vyskytují. Jako ukázkou tohoto jevu lze využít aktivaci „B“, Tab. 5.7. V průběhu aktivace „B“ byl vydán pokyn na snížení okamžitého příkonu, při odeznění následného rebound effectu však reálná spotřeba topného systému zcela nedosáhla u dvou zkoumaných typů baseline požadované hodnoty. Tudíž působení rebound effectu nebylo pro tyto metodiky formálně ukončeno a bylo pouze zastřešeno na maximální hodnotě 120 minut.

Rozšířené srovnání lze nalézt v příloze D.

	A	B	C	D
R1 (min)	42	25	37	37
R2 (min)	10	43	37	41
R3 (min)	58	25	31	41

Tab. 5.4: Trvání RE pro VO 1 minuta

	A	B	C	D
R1 (min)	55	45	50	35
R2 (min)	55	45	40	40
R3 (min)	60	45	45	40

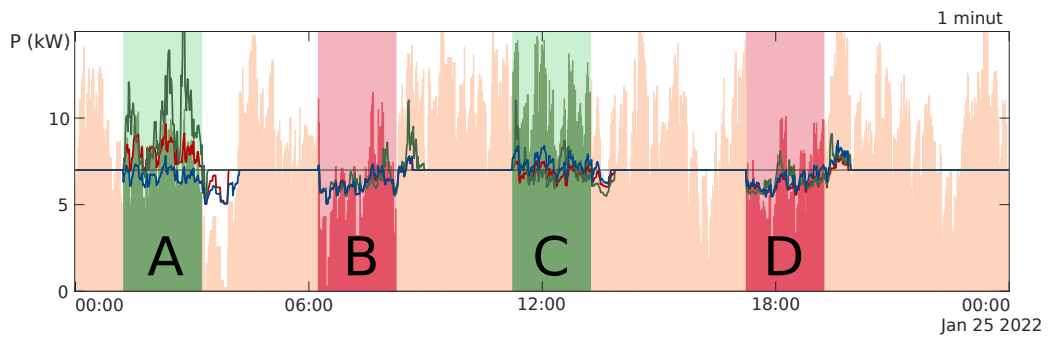
Tab. 5.5: Trvání RE pro VO 5 minut

	A	B	C	D
R1 (min)	50	40	70	40
R2 (min)	50	40	80	40
R3 (min)	60	40	60	40

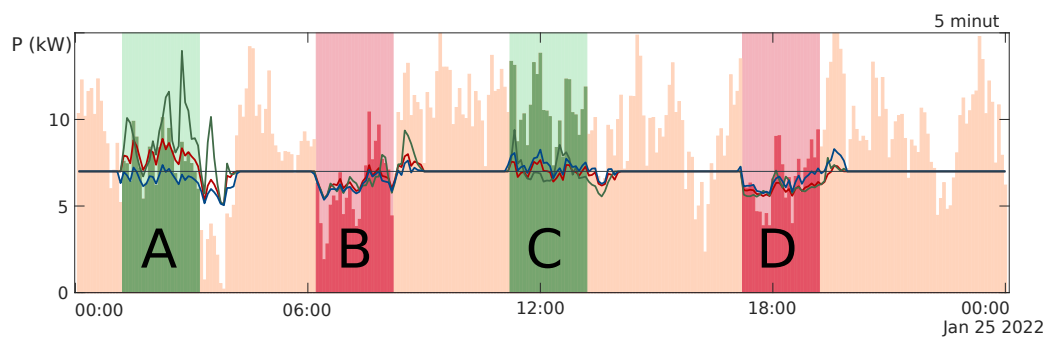
Tab. 5.6: Trvání RE pro VO 10 minut

	A	B	C	D
R1 (min)	60	120	75	30
R2 (min)	60	120	75	120
R3 (min)	60	45	75	60

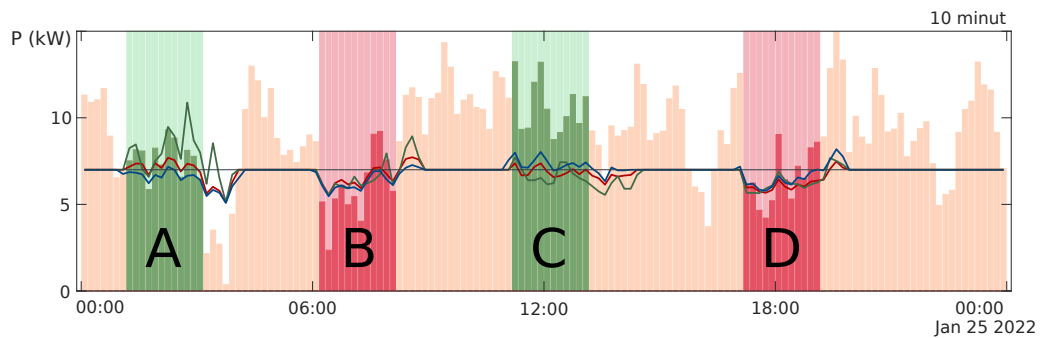
Tab. 5.7: Trvání RE pro VO 15 minut



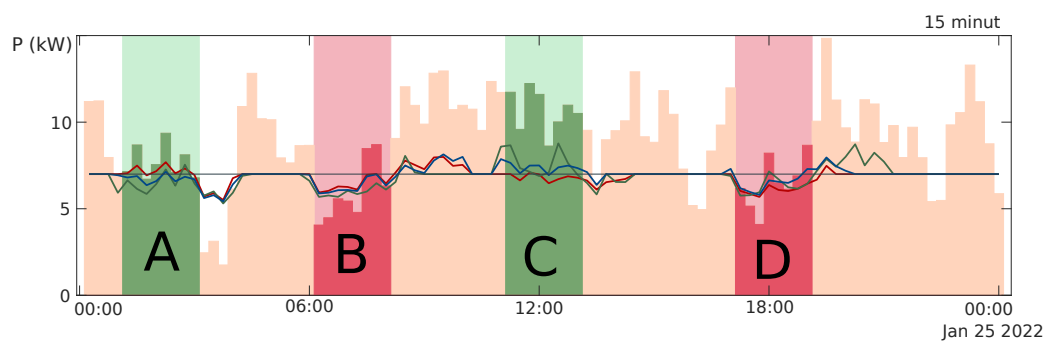
Obr. 5.1: Poměrná změna zatížení pro výpočtové okno 1 minuta



Obr. 5.2: Poměrná změna zatížení pro výpočtové okno 5 minut



Obr. 5.3: Poměrná změna zatížení pro výpočtové okno 10 minut



Obr. 5.4: Poměrná změna zatížení pro výpočtové okno 15 minut

I přes tyto poznatky bude následná analýza využívat výpočtové okno 15 minut. Je tak dáno především kvůli nastaveným časům aktivací, které jsou uzpůsobeny právě na 15 minutové výpočtové okno, tudíž přizpůsobení pro 10 minutové výpočtové okno nelze vždy provést správně. Při využití rozšířeného datasetu čítajícího 20 odběrových míst nebude uvažování 15 minutového výpočtového okna představovat výraznou odchylku.

6 Vyhodnocení měřených dat

Vyhodnocení měřených dat má za účel stanovit věrohodnost vybraných metodik, stanovit četnost reakce na aktivační pokyn, průměrnou změnu zatížení pro jednotlivé typy pokynů a průměrnou délku trvání rebound effectu.

Vyhodnocení vytyčených cílů je provedeno na základě rozšířeného datasetu obsahujícího data z období 13. 12. 2021–30. 01 2022, pro vyhodnocení četnosti reakce na aktivační pokyn jsou využita data z přechodného období 10. 03. 2021–30. 06. 2021.

6.1 Vyhodnocení věrohodnosti vybraných metodik

Jakožto hlavní metodika je uvažována **upravená metodika typ 1** s využitím korekce na teplotu a korekčního rozdílového činitele. Jakožto kontrolní, resp. alternativní metodiky jsou brány v úvahu **metodika měření před/po** a **metodika referenční skupiny**. Na základě těchto předpokladů vznikl výčet hodnot poměrné změny zatížení vycházející z jednotlivých metodik viz příloha E. Jako příklad zde uvádím průběh poměrné změny zatížení v období 24. 01. 2022–30. 01. 2022, viz Obr. 6.1. Na první pohled je patrné, že mezi metodikami měření před/po a metodikou baseline typ 1 dochází ke konjunkci. Metodika využívající srovnání s referenční skupinou (bez ovládacích pokynů) je výrazně rozkolísaná a oproti dalším dvěma metodikám obsahuje značné odchylky.

Pokud zavedeme předpoklad, že metodika baseline typ 1 udává správnou poměrnou změnu zatížení, lze následně provést výpočet relativní odchylky zbylých metodik.

Absolutní odchylka měření je rovna rozdílu měřené hodnoty a hodnoty „správné“:

$$\Delta x = x_m - x_s. \quad (6.1)$$

Relativní odchylka měření je dána jako:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x_s} \cdot 100 \quad (6.2)$$

Poměrná změna zatížení je dána jako:

$$z = \frac{P_{tn}}{B_{tn}} \cdot 100 \quad (6.3)$$

Absolutní odchylka poměrné změny zatížení je tedy dána jako:

$$\Delta z_{1n} = z_{1n} - z_{3n}, \quad (6.4)$$

$$\Delta z_{2n} = z_{2n} - z_{3n} \quad (6.5)$$

Poměrná změna zatížení je značena následovně:

- z_{1n} pro metodiku měření před/po,
- z_{2n} pro metodiku referenční skupiny a
- z_{3n} pro metodiku baseline typ 1.

Z toho plyne, že

- Δ_{1n} vyjadřuje absolutní chybu metodiky měření před/po vůči metodice baseline typu 1,
- Δ_{2n} absolutní chybu metodiky referenční skupiny vůči metodice baseline typu 1.

Relativní odchylka měření pro kontrolní metodiky je tedy dána jako:

$$\delta_{1n} = \frac{\Delta_{1n}}{z_{3n}} \cdot 100, \quad (6.6)$$

resp.,

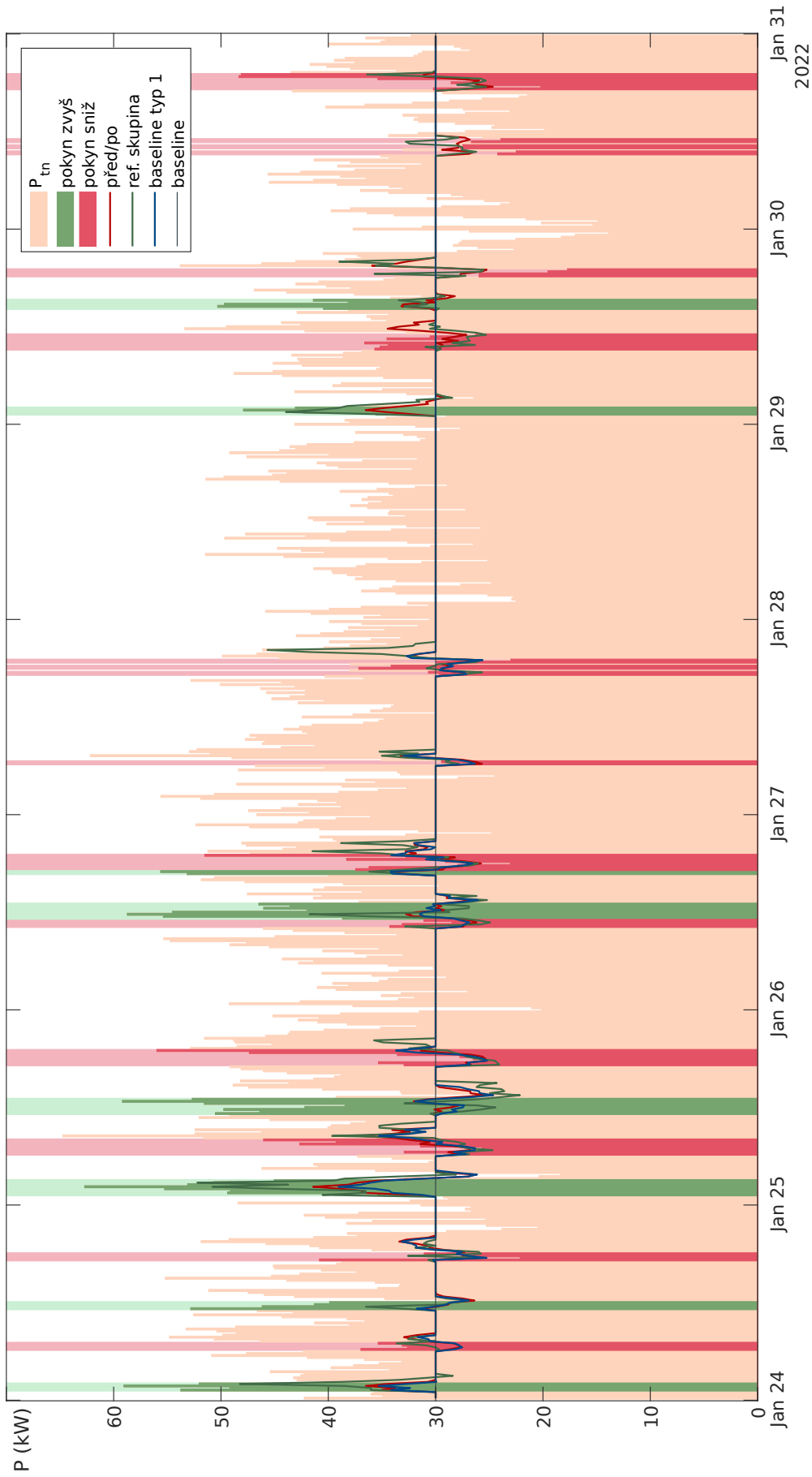
$$\delta_{2n} = \frac{\Delta_{2n}}{z_{3n}} \cdot 100, \quad (6.7)$$

Z tohoto vyjádření plyne, že průměrná relativní odchylka kontrolních metodik je rovna:

$$\bar{\delta}_1 = 1,14 \%$$

$$\bar{\delta}_2 = 14,78 \%$$

Toto zjištění podkládá tezi z úvodu, a vyjadřuje nespolehlivost metodiky referenční skupiny. Z tohoto důvodu a z výsledků srovnání průběhů z celého měření ji nelze pro následnou práci uvažovat jako relevantní. Zároveň lze považovat metodiky měření před/po a baseline typ 1 za relativně spolehlivé vzhledem k faktu, že i přes jejich rozdílné prerekvizity disponují relativní odchylkou pouze 1,14 %.



Obr. 6.1: průběh poměrné změny zatížení 24. 01. 2022–30. 01. 2022

6.2 Četnost reakce TČ na pokyn

Průměrná četnost reakce na pokyn je základní informací udávající úspěšnost proběhlé aktivace. Pro tuto statistiku lze využít data naměřená v jarním období 2021 od 10.03.2021 do 30.06.2021 viz Příloha C, jelikož tento soubor obsahuje vedle informace o vydaném pokynu rovněž informaci o skutečném provedení. Skupina využita při tomto měření čítá 6 odběrových míst ze stejné lokality označených dle Tab. 6.1–6.2. Pro toto vyhodnocení neuvažují pokyn jako jeden celek, ale jako každou samostatnou minutu, po kterou vydání/splnění pokynu trvalo.

Tab. 6.1: Úspěšnost pokynu pro snížení příkonu

pokyn	splněn	vydán
device_000005e533933	2902	3180
device_000007b6cc4d0	1430	2041
device_000001f790a8f	8660	8762
device_00000c3e269f2	2616	3359
device_000006663d7b7	2741	3240
device_00000e06cec3c	3205	3660
suma	21554	24242

Úspěšnost pokynu na snížení činí
88,91 %

Tab. 6.2: Úspěšnost pokynu pro zvýšení příkonu

pokyn	splněn	vydán
device_000005e533933	1098	3005
device_000007b6cc4d0	2892	3614
device_000001f790a8f	480	780
device_00000c3e269f2	1199	2496
device_000006663d7b7	1340	3067
device_00000e06cec3c	1851	9059
suma	8860	22021

Úspěšnost pokynu na zvýšení činí
40,23 %

Z měření vyplývá, že pokyn ke zvýšení příkonu má méně než poloviční úspěšnost, oproti pokynu ke snížení. To je dáno především povahou tepelného čerpadla, které má tendenci udržovat teplotu u horní hranice komfortního limitu a při poklesu „dohřívát“. Z toho vyplývá, že pro zvyšování příkonu je zde podstatně menší prostor, než pro jeho snižování. Tento fakt je dobře znatelný i na průbězích z celého měření, kdy pokyny pro zvýšení jsou výrazně rozkolísané a méně efektivní.

6.3 Poměrná změna zatížení dle typu pokynu

Další potřebnou informací, kterou je potřeba znát před využitím aktivace, je poměrná změna zatížení, kterou lze od daného pokynu očekávat. Tato statistika je postavena na základě rozšířeného datasetu 20 domácností z průběhu 7týdenního měření. Pokyny byly vykonávány dle scénářů z kapitoly 4 v týdenních cyklech, tudíž je ke každému typu pokynu 7 vzorků. S ohledem na počet vzorků je nutné uvažovat

statistiku jako mírně zkreslenou, o čemž svědčí i velikost směrodatné odchylky jednotlivých pokynů. Pro potřeby tohoto vyhodnocení je uvažována jako směrodatná metodika **baseline typ 1**.

Pro průměrnou změnu zatížení je vypočítána směrodatná odchylka dle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (6.8)$$

tedy

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{1i} - \bar{z}_1)^2}{n}}, \quad (6.9)$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_{3i} - \bar{z}_3)^2}{n}}, \quad (6.10)$$

kde z_{1i}/z_{3i} představuje poměrnou změnu zatížení dle dané metodiky pro vybraná čerpadla, viz příloha F.

6.3.1 Pokyny pondělí

pokyn 1A

Pokyn 1A je zaměřen na zvýšení výkonu v čase 01:00–02:00, za účelem vyrovnání ranního propadu zatížení.

Tab. 6.3: pokyn 1A(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
01:15	120,21	$\pm 14,91$
01:30	139,92	$\pm 26,12$
01:45	150,13	$\pm 22,07$
02:00	142,26	$\pm 25,45$

Tab. 6.4: pokyn 1A(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
01:15	114,61	$\pm 13,59$
01:30	125,82	$\pm 20,59$
01:45	138,99	$\pm 18,91$
02:00	124,42	$\pm 18,90$

Ze srovnání jednotlivých metodik, s uvažováním směrodatné odchylky σ_n , je patrné že míra funkčnosti 1hodinového pokynu na zvýšení je znatelná avšak nestálá vlivem výrazné odchylky. Velikost této konkrétní aktivace jde proti předpokladu snížené funkčnosti zvyšujících pokynů, je tak dáno především časem aktivace, kdy se objekty v nočních hodinách typicky pohybují v nižších teplotách, tudíž je zde zvýšený potenciál pro navyšování.

Pokyn 1B

Pokyn 1B je zaměřen na snížení výkonu v čase 06:00–07:00, za účelem vyrovnání ranní špičky.

Tab. 6.5: pokyn 1B(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
06:15	74,84	$\pm 19,12$
06:30	81,29	$\pm 23,25$
06:45	84,38	$\pm 17,61$
07:00	79,08	$\pm 11,26$

Tab. 6.6: pokyn 1B(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
06:15	70,18	$\pm 18,26$
06:30	78,11	$\pm 22,15$
06:45	82,13	$\pm 16,53$
07:00	75,51	$\pm 10,82$

Shodně s pokynem 1A nelze vlivem výrazné odchylky předpokládanou změnu zatížení s určitostí odhadnout.

Pokyn 1C

Pokyn 1C je svým charakterem shodný s pokynem 1A. K jeho uplatnění dochází v rozmezí 11:00–12:00.

Tab. 6.7: pokyn 1C(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
11:15	113,74	$\pm 18,60$
11:30	108,50	$\pm 28,75$
11:45	104,51	$\pm 29,13$
12:00	101,42	$\pm 21,82$

Tab. 6.8: pokyn 1C(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
11:15	118,41	$\pm 19,47$
11:30	111,10	$\pm 28,95$
11:45	104,12	$\pm 28,42$
12:00	101,79	$\pm 20,78$

Pokyn 1D

Pokyn 1D je svým charakterem shodný s pokynem 1B. K jeho uplatnění dochází v rozmezí 17:00–18:00.

Tab. 6.9: pokyn 1D(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
17:15	83,17	$\pm 15,63$
17:30	71,37	$\pm 17,55$
17:45	63,19	$\pm 22,94$
18:00	77,93	$\pm 21,33$

Tab. 6.10: pokyn 1D(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
17:15	80,64	$\pm 15,14$
17:30	67,82	$\pm 16,18$
17:45	60,95	$\pm 22,03$
18:00	77,25	$\pm 21,09$

Průměrná změna zatížení při využití pokynu ke **zvýšení** příkonu v trvání 1 hodina je rovna dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 122.58 \pm 23, 35\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 117.41 \pm 21, 20\%$. Přičemž lze pozorovat že odpolední aktivace proběhla s o poznání nižší účinností.

Průměrná změna zatížení při využití pokynu ke **snížení** příkonu v trvání 1 hodina je rovna dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 77, 28 \pm 18, 58\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 74, 02 \pm 17, 77\%$. Obě období aktivace proběhly s obdobnou účinností.

6.3.2 Pokyny úterý

Pokyny prováděné každé úterý svým charakterem kopírují pokyny pondělní. Rozdílným prvkem je trvání, kdy úterní pokyny využívají maximální povolenou dobu aktivace jednoho typu 2 hodiny.

Pokyn 2A

Tab. 6.11: pokyn 2A(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
01:15	135,80	$\pm 33,21$
01:30	159,42	$\pm 37,97$
01:45	155,75	$\pm 33,42$
02:00	159,81	$\pm 44,87$
02:15	152,22	$\pm 31,97$
02:30	143,70	$\pm 29,20$
02:45	136,77	$\pm 25,15$
03:00	126,72	$\pm 31,78$

Tab. 6.12: pokyn 2A(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
01:15	125,73	$\pm 28,87$
01:30	131,69	$\pm 26,76$
01:45	132,16	$\pm 25,99$
02:00	132,60	$\pm 35,10$
02:15	136,90	$\pm 27,81$
02:30	137,12	$\pm 27,13$
02:45	128,37	$\pm 22,46$
03:00	121,18	$\pm 29,65$

Pokyn 2B

Tab. 6.13: pokyn 2B(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
06:15	71,95	$\pm 08,49$
06:30	84,67	$\pm 15,80$
06:45	88,11	$\pm 15,52$
07:00	82,89	$\pm 13,52$
07:15	81,36	$\pm 21,76$
07:30	82,47	$\pm 26,66$
07:45	77,60	$\pm 22,67$
08:00	84,08	$\pm 23,52$

Tab. 6.14: pokyn 2B(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
06:15	67,61	$\pm 07,91$
06:30	81,72	$\pm 16,06$
06:45	82,43	$\pm 15,11$
07:00	78,11	$\pm 12,82$
07:15	75,64	$\pm 20,24$
07:30	73,93	$\pm 23,76$
07:45	71,26	$\pm 20,87$
08:00	77,66	$\pm 21,38$

Pokyn 2C

Tab. 6.15: pokyn 2C(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
11:15	108,30	$\pm 11,79$
11:30	131,89	$\pm 37,38$
11:45	136,06	$\pm 43,68$
12:00	118,53	$\pm 26,05$
12:15	114,80	$\pm 28,54$
12:30	118,85	$\pm 34,92$
12:45	127,90	$\pm 31,47$
13:00	123,17	$\pm 25,30$

Tab. 6.16: pokyn 2C(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
11:15	98,90	$\pm 10,76$
11:30	111,02	$\pm 30,05$
11:45	111,71	$\pm 33,73$
12:00	101,89	$\pm 21,48$
12:15	106,84	$\pm 25,88$
12:30	115,74	$\pm 32,35$
12:45	126,09	$\pm 29,16$
13:00	118,59	$\pm 23,10$

Pokyn 2D

Tab. 6.17: pokyn 2D(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
17:15	73,14	$\pm 15,83$
17:30	65,29	$\pm 05,54$
17:45	66,26	$\pm 13,59$
18:00	68,23	$\pm 23,63$
18:15	72,90	$\pm 22,33$
18:30	80,61	$\pm 18,68$
18:45	89,25	$\pm 14,89$
19:00	86,61	$\pm 14,54$

Tab. 6.18: pokyn 2D(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
17:15	73,00	$\pm 15,91$
17:30	62,63	$\pm 06,18$
17:45	65,06	$\pm 12,00$
18:00	68,56	$\pm 22,12$
18:15	79,66	$\pm 21,98$
18:30	90,58	$\pm 19,56$
18:45	105,39	$\pm 16,55$
19:00	101,62	$\pm 16,19$

Průměrná změna zatížení pokynu ke **zvýšení** příkonu, v trvání 2 hodiny, je rovna dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 134,36 \pm 31,67\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 121,03 \pm 31,67\%$. Přičemž lze opět pozorovat že odpolední aktivace proběhla s o poznání nižší účinností.

Průměrná změna zatížení pokynu ke **snížení** příkonu, v trvání 2 hodiny, je rovna dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 78,34 \pm 17,31\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 78,43 \pm 16,79\%$. Obě období aktivace proběhly s obdobnou účinností, avšak při bližším pohledu na pokyn 2D (odpolední snižující aktivace) lze v druhé polovině aktivace pozorovat reakci komfortního limitu a výrazný pokles účinnosti pokynu.

Rovněž lze pozorovat nižší odchylku u aktivací typu snížení, to je pravděpodobně dáno vyšší úspěšností reakce na pokyn viz 6.2.

6.3.3 Pokyny středa

Pokyny uplatňované každou středu mají za cíl zvýšit účinnost a délku trvání daného pokynu pomocí předcházející aktivace opačného charakteru (pokyn 3A - omezení tepelného čerpadla před zvyšující aktivací; pokyn 3B rychlý předtop předcházející aktivaci ke snížení).

Pokyn 3A

Tab. 6.19: pokyn 3A(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
10:15	79,31	$\pm 05,15$
10:30	69,69	$\pm 06,41$
10:45	68,47	$\pm 14,28$
11:00	67,16	$\pm 09,86$
11:15	97,13	$\pm 22,52$
11:30	130,35	$\pm 34,63$
11:45	124,34	$\pm 23,00$
12:00	113,25	$\pm 18,21$
12:15	110,82	$\pm 19,89$
12:30	108,29	$\pm 13,07$
12:45	110,99	$\pm 17,86$
13:00	105,94	$\pm 14,46$

Tab. 6.20: pokyn 3A(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
10:15	82,28	$\pm 06,03$
10:30	73,36	$\pm 05,90$
10:45	79,01	$\pm 15,21$
11:00	80,22	$\pm 10,44$
11:15	100,27	$\pm 22,35$
11:30	121,90	$\pm 28,90$
11:45	113,84	$\pm 16,91$
12:00	108,95	$\pm 12,79$
12:15	119,56	$\pm 19,07$
12:30	122,75	$\pm 16,21$
12:45	122,94	$\pm 17,66$
13:00	112,29	$\pm 09,69$

Průměrná změna zatížení pro pokyn 3A je pro **snížující** složku dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 71,16 \pm 8,92\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 78,72 \pm 9,39\%$. Pro **zvyšující** složku pak dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 112,64 \pm 20,45\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 115,31 \pm 17,95\%$.

Pokyn 3B

Tab. 6.21: pokyn 3B(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
16:45	115,87	$\pm 11,58$
17:00	129,52	$\pm 19,35$
17:15	94,38	$\pm 14,91$
17:30	87,99	$\pm 15,00$
17:45	72,34	$\pm 15,50$
18:00	70,67	$\pm 20,15$
18:15	70,40	$\pm 18,97$
18:30	71,64	$\pm 24,83$
18:45	75,10	$\pm 19,19$
19:00	92,44	$\pm 22,87$

Tab. 6.22: pokyn 3B(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
16:45	122,82	$\pm 13,28$
17:00	133,02	$\pm 20,94$
17:15	99,67	$\pm 15,46$
17:30	93,14	$\pm 16,25$
17:45	77,66	$\pm 16,27$
18:00	80,66	$\pm 22,48$
18:15	80,06	$\pm 20,67$
18:30	81,37	$\pm 26,88$
18:45	84,43	$\pm 20,92$
19:00	100,73	$\pm 24,12$

Průměrná změna zatížení pro pokyn 3B je pro **zvyšující** složku dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 122,70 \pm 15,47\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 127,92 \pm 117,11\%$. Pro **snižující** složku pak dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 79,37 \pm 18,93\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 87,22 \pm 20,38\%$.

Z Tab.6.19–6.20 a 6.21–6.22 je patrné že předcházející aktivace opačného charakteru má ve srovnání s 6.3.2 velice malý, spíše žádný dopad na změnu zatížení způsobenou aktivací hlavní. Rovněž lze u obou způsobů aktivací, především pak v poslední 15 minutách, pozorovat zásah komfortního limitu, avšak na rozdíl od aktivace 6.3.2, přichází tato reakce o 30–45 minut později. Tudíž lze považovat tento způsob využití jako přínosný a relevantní.

6.3.4 Pokyny čtvrtek

Čtvrteční aktivace využívají krátkých půlhodinových pokynů ve snaze o maximalizaci změny zatížení s co možná nejmenším dopadem v podobě rebound effectu a vyhnutí se reakci komfortního limitu.

Pokyn 4A

Tab. 6.23: pokyn 4A(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
06:15	77,44	$\pm 21,27$
06:30	80,64	$\pm 20,23$

Tab. 6.24: pokyn 4A(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
06:15	87,71	$\pm 23,65$
06:30	90,58	$\pm 24,07$

Pokyn 4B

Tab. 6.25: pokyn 4B(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
17:15	82,85	$\pm 13,86$
17:30	78,70	$\pm 27,16$
17:45	92,74	$\pm 21,60$
18:00	85,26	$\pm 19,54$
18:15	66,52	$\pm 17,37$
18:30	91,39	$\pm 15,32$
18:45	86,93	$\pm 18,03$
19:00	84,71	$\pm 23,70$

Tab. 6.26: pokyn 4B(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
17:15	88,04	$\pm 15,52$
17:30	81,87	$\pm 28,45$
17:45	102,25	$\pm 22,94$
18:00	93,96	$\pm 21,27$
18:15	69,71	$\pm 17,39$
18:30	90,80	$\pm 13,35$
18:45	89,24	$\pm 17,14$
19:00	88,07	$\pm 25,16$

Jak lze pozorovat na datech, především pak v Tab.6.25–6.26, pomocí přerušovaných pokynů lze dosáhnout omezení právě reakce komfortního limitu a velikost změny zatížení se v průběhu posledního pokynu ze série výrazně neliší od prvního. Ve srovnání s pokynem 6.3.2 tak dosahuje vyšší dlouhodobé stability, při potřebě konzistentního, dlouho trvajícího snížení spotřeby. Avšak z pohledu průměrné změny zatížení za celou aktivaci představuje dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 83,64 \pm 19,57\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 87,99 \pm 20,15\%$ celkově nižší efektivitu. To je dáno především o půl hodiny kratší celkovou dobou aktivace.

6.3.5 Pokyny sobota

Sobotní aktivace je opět uzpůsobena k vykrytí typických denních propadů a maxim, tentokrát však pro víkendový typ zatížení.

Pokyn 6A

Tab. 6.27: pokyn 6A(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
01:15	128,31	$\pm 22,14$
01:30	165,87	$\pm 29,45$
01:45	149,15	$\pm 19,77$
02:00	135,17	$\pm 13,79$

Tab. 6.28: pokyn 6A(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
01:15	128,34	$\pm 22,11$
01:30	159,61	$\pm 25,28$
01:45	142,02	$\pm 17,53$
02:00	123,41	$\pm 12,72$

Lze pozorovat, že pro kratší trvání **zvyšující** aktivace (1 hodina) dosahuje pokyn 6A vyšší účinnosti oproti 2hodinové. Dle metodiky měření před/po dosahuje změna zatížení $\bar{z}_1 \approx 144,63 \pm 21,29\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 138,34 \pm 19,41\%$.

Pokyn 6B

Tab. 6.29: pokyn 6B(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
09:15	77,36	$\pm 08,93$
09:30	82,39	$\pm 13,01$
09:45	73,08	$\pm 18,04$
10:00	72,73	$\pm 24,28$
10:15	71,11	$\pm 12,21$
10:30	72,67	$\pm 15,34$
10:45	69,76	$\pm 07,63$
11:00	66,02	$\pm 08,83$

Tab. 6.30: pokyn 6B(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
09:15	77,53	$\pm 08,63$
09:30	96,15	$\pm 16,23$
09:45	85,83	$\pm 19,57$
10:00	83,84	$\pm 26,98$
10:15	91,21	$\pm 13,28$
10:30	96,88	$\pm 20,65$
10:45	95,51	$\pm 10,83$
11:00	96,33	$\pm 16,84$

Snižující pokyn 6B má průměrnou změnu zatížení dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 73,14 \pm 13,53\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 90,41 \pm 16,63\%$.

Pokyn 6C

Tab. 6.31: pokyn 6C(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
14:15	118,98	$\pm 16,03$
14:30	141,61	$\pm 25,75$
14:45	140,84	$\pm 15,12$
15:00	122,76	$\pm 16,00$
15:15	132,58	$\pm 14,30$

Tab. 6.32: pokyn 6C(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
14:15	119,02	$\pm 15,82$
14:30	132,75	$\pm 21,60$
14:45	131,37	$\pm 12,77$
15:00	108,70	$\pm 12,18$
15:15	124,89	$\pm 11,80$

Zvyšující pokyn 6C poskytuje průměrnou změnu zatížení dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 131,35 \pm 17,44$ % a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 123,35 \pm 14,83$ %.

Pokyn 6D

Tab. 6.33: pokyn 6D(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
18:15	76,03	$\pm 11,16$
18:30	70,03	$\pm 06,86$
18:45	67,44	$\pm 09,63$
19:00	65,90	$\pm 14,92$

Tab. 6.34: pokyn 6D(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
18:15	74,31	$\pm 11,44$
18:30	67,94	$\pm 06,84$
18:45	69,40	$\pm 09,52$
19:00	68,42	$\pm 14,63$

Snižující pokyn 6D poskytuje průměrnou změnu zatížení dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 69,85 \pm 10,64$ % a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 70,02 \pm 10,61$ %.

Shodně se zvyšujícími pokyny 6A a 6B lze pozorovat vyšší účinnost v případě pokynu s kratší dobou trvání. To přisuzují nižší četnosti reakce komfortního limitu.

Průměrná změna zatížení v průběhu víkendové aktivace pro **zvyšující** pokyn je dle metodiky měření před/po rovna $\bar{z}_1 \approx 136,43 \pm 19,83$ % a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 129,61 \pm 17,66$ %

Průměrná změna zatížení v průběhu víkendové aktivace pro **snížující** pokyn je dle metodiky měření před/po rovna $\bar{z}_1 \approx 71,49 \pm 12,09$ % a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 80,21 \pm 13,62$ %

Z toho plyne, že pro víkendové aktivace se úspěšnost a účinnost pokynů výrazně neliší v porovnání s typově podobnými aktivacemi z pracovních dnů.

6.3.6 Pokyny neděle

Režim pokynů uplatněný každou nedělí, podobně jako čtvrteční, testuje rozdílný dopad jedné dlouhotrvající aktivaci (2 hodiny) v porovnání se sérií 3, po sobě jdoucích, půlhodinových aktivací s intervalem 15 minut.

Pokyn 7A

Tab. 6.35: pokyn 7A(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
09:15	76,28	$\pm 14,56$
09:30	79,44	$\pm 18,82$
09:45	97,12	$\pm 14,79$
10:00	84,91	$\pm 9,83$
10:15	82,09	$\pm 18,07$
10:30	88,40	$\pm 8,72$
10:45	72,31	$\pm 19,96$
11:00	72,32	$\pm 16,74$

Tab. 6.36: pokyn 7A(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
09:15	73,72	$\pm 14,21$
09:30	84,21	$\pm 18,99$
09:45	110,81	$\pm 15,63$
10:00	99,84	$\pm 11,56$
10:15	98,54	$\pm 21,61$
10:30	106,11	$\pm 17,20$
10:45	88,64	$\pm 31,13$
11:00	94,48	$\pm 25,05$

Sekvenční pokyn 7A má průměrnou změnu zatížení dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 81,61 \pm 15,19\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 94,54 \pm 19,42\%$.

Pokyn 7B

Tab. 6.37: pokyn 7B(měření před/po)

čas	\bar{z}_{1n} (%)	σ_{1n} (%)
17:15	74,75	$\pm 14,29$
17:30	58,62	$\pm 21,04$
17:45	65,07	$\pm 21,04$
18:00	61,45	$\pm 17,98$
18:15	64,09	$\pm 13,61$
18:30	67,62	$\pm 12,11$
18:45	80,45	$\pm 16,10$
19:00	86,32	$\pm 17,08$

Tab. 6.38: pokyn 7B(baseline typ 1)

čas	\bar{z}_{3n} (%)	σ_{3n} (%)
17:15	77,00	$\pm 14,63$
17:30	56,38	$\pm 20,46$
17:45	60,17	$\pm 20,02$
18:00	61,17	$\pm 17,94$
18:15	65,76	$\pm 13,66$
18:30	64,69	$\pm 11,55$
18:45	81,96	$\pm 15,76$
19:00	89,51	$\pm 16,76$

Kontinuální pokyn 7B má průměrnou účinnost dle metodiky měření před/po $\bar{z}_1 \approx 69,80 \pm 16,65\%$ a dle metodiky baseline typu 1 $\bar{z}_3 \approx 69,58 \pm 16,35\%$.

Ze srovnání těchto pokynů vyplývá, že kontinuální snižující pokyn dosahuje výrazně vyšší účinnosti, avšak je zřejmá reakce komfortního limitu v období přibližně 1,5 hodiny od počátku aktivace.

6.4 Trvání rebound effectu dle typu pokynu

Na základě vyhodnocení dat udávající průměrnou dobu trvání rebound effectu, viz Příloha E a Příloha G, nelze provést předpoklad pro budoucí aktivace. Vyhodnocená data jsou zatížena výraznými odchylkami a nelogickými stavy.

Tyto chyby přikládám především malému vzorku měřených domácností a rovněž krátkému měřenému období. Avšak je nutné vzít v potaz také množství proměnných, jež do odhadu zasahují a nelze je předpokládat ani ovlivnit. Tyto proměnné mají výrazný vliv na výsledné trvání. Jedná se především o denní dobu, počáteční stav před aktivací, úspěšnost aktivace, tepelných ztrátách budovy, výkon tepelného čerpadla, počet osob využívající objekt apod..

Z těchto důvodů doporučují provést dlouhodobé měření na násobně rozsáhlejším portfoliu tepelných čerpadel, se zaměřením právě na délku trvání rebound effectu. Zvýšení počtu zkoumaných objektů výrazně omezí vliv náhodných událostí a výše zmiňovaných proměnných, což povede k přesnějšímu odhadu pro budoucí aktivace.

7 diskuze

Předmětem pro diskuzi je srovnání využití rozdílné velikosti výpočtového okna pro vyhodnocení měřených dat. Srovnání vychází z využívaného výpočtového okna $VO = 15$ min a z $VO = 10$ min, které je doporučeno na základě poznatků v části 5.3.

Jak již bylo zmíněno v části 5.3, na vyhodnocení objemu samotné aktivace nemá výpočtové okno vliv, jelikož vychází ze shodných minutových dat. Tuto skutečnost lze i přes výrazné odchylky způsobené nedostatečným vzorkem pozorovat v Tab.7.1–7.2 a na průbězích 7.1–7.2. Zkoumaný výřez dat pochází z pokynu 1B.

Na zmiňovaných průbězích lze pozorovat výrazné odchylky v rámci jednotlivých vzorků aktivací z vyhodnocovaných 7 týdnů. I přes tento fakt lze stanovit pokyn za úspěšný a efektivní, kdy v průběhu celé aktivace došlo ke snížení o $24 \pm 17\%$ dle metodiky baseline typ 1.

Tab. 7.1: pokyn 2B($VO = 10$ min)

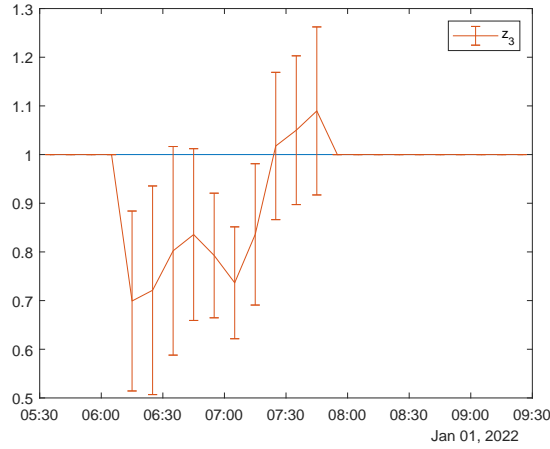
čas	$\bar{z}_{3n}(1)$	$\sigma_{3n}(1)$
6:15	0,70	$\pm 0,18$
6:25	0,72	$\pm 0,21$
6:35	0,80	$\pm 0,21$
6:45	0,84	$\pm 0,18$
6:55	0,79	$\pm 0,13$
7:05	0,74	$\pm 0,11$
průměr	0,76	$\pm 0,17$

Tab. 7.2: pokyn 2B($VO = 15$ min)

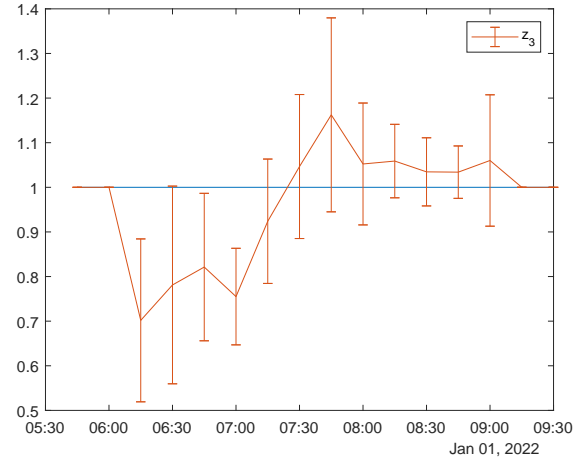
čas	$\bar{z}_{3n}(1)$	$\sigma_{3n}(1)$
06:15	0,70	$\pm 0,18$
06:30	0,78	$\pm 0,22$
06:45	0,82	$\pm 0,17$
07:00	0,76	$\pm 0,11$
průměr	0,76	$\pm 0,17$

Velikost výpočtového okna však značně ovlivňuje trvání rebound effectu jehož trvání je vyhodnoceno na základě překonání výchozího diagramu zatížení měřeným zatížením ve směru ve kterém působila aktivace. V průběhu celého měření bylo možné pozorovat stavy, kdy vlivem vnějších vlivů této hranice nebylo dosaženo. Tyto formálně neukončené průběhy rebound effectu byly následně zastřešeny na hodnotě 120 minut. Jak lze pozorovat na průbězích 7.1–7.4 vliv výpočtového okna je znatelný. Průběh změny zatížení pro výpočtové okno $VO = 15$ min značí délku trvání rebound effectu v průměru až o 45 minut delší, než jaké lze dosáhnout s využitím výpočtového okna $VO = 10$ min. Průměrné trvání rebound effectu pro jednotlivá výpočtová okna lze pozorovat v Tab.7.3–7.4. Z těchto dat, z pokynu 1B, je znatelná výrazná změna v trvání rebound effectu spojená rovněž s výrazným rozdílem ve velikosti odchylky.

Obr. 7.1: Průběh pokynu 1B ($VO = 10$ min)



Obr. 7.2: Průběh pokynu 1B ($VO = 15$ min)



Tab. 7.3: Trvání RE pro pokyn 1A ($VO = 10$ min)

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
baseline typ 1	32,86	$\pm 07,00$

Tab. 7.4: Trvání RE pro pokyn 1A ($VO = 15$ min)

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
baseline typ 1	72,86	$\pm 28,27$

To je zapříčiněno především vlivem většího výpočtového okna, kdy dochází ke ztrátě detailní informace. Může tedy nastat situace, kdy měřené zatížení dorovnává baseline, avšak neočekávaná změna zatížení zapříčiněná vnějšími vlivy v případě využití většího výpočtového okna v konečném důsledku toto formální ukončení přeruší.

Z tohoto důvodu lze, pro problematické vyhodnocení trvání rebound effectu, doporučit využití menšího výpočtového okna, a to alespoň $VO = 10$ min.

Závěr

Rostoucí podíl volatilních zdrojů na trhu s elektrickou energií sebou přináší rizika spojená s nestabilitou sítě. Jedním z možných řešení je využití flexibility na straně spotřeby. Pro oblast rezidenčních objektů představuje pro tyto účely nejvyšší potenciál využití řízení elektrických tepelných zdrojů. Na základě měření je, z hlediska stability získané potenciální flexibility a věrohodnosti vyhodnocení dané aktivace, vhodné doporučit pro toto řízení pouze domácnosti disponující akumulací. Akumulační nádrž v rámci flexibility, především pro aktivace ve smyslu snížení okamžité zátěže, představují stabilizaci poklesu i následného dopadu na spotřebu domácnosti, rovněž přináší prostor pro vykonání pokynu a především omezují zásah do uživatelského komfortu na minimum.

V rámci pilotního projektu bylo testováno řízení portfolia čítajícího 60 objektů disponující tepelným čerpadlem bez možnosti akumulace, z nichž přijatelné výsledky pro vyhodnocení přineslo pouze 20 účastníků. Tato počáteční překážka vedla ke snížené spolehlivosti dosažených výstupů, proto je na tuto skutečnost v rámci celé práce nutné brát zřetel.

V rámci návrhu vhodných metodik pro stanovení výchozího diagramu zatížení přinesly uspokojivé výsledky dvě ze tří testovaných metodik. Jednalo se pak o metodiku měření před/po a metodiku upravené baseline typ 1. Mezi těmito metodikami nastal výrazný průnik, kdy se vypočtená data v rámci celého projektu lišila s průměrnou odchylkou 1,14 %. Nízká míra odchylky těchto metodik svědčí o funkčnosti a spolehlivosti obou z nich, kdy i relativně jednoduchá metodika jako je metodika měření před/po přinesla uspokojivé výsledky. Pro metodiku referenční skupiny je závěr neuspokojivý, jelikož v porovnání s primární metodikou baseline typ 1 dosahovala průměrné odchylky 14,78 %. Míra odchylky společně s pozorovanými průběhy z celého měření vedla k závěru o nespolehlivosti dané metodiky. Je tak dáno především rozdílností jednotlivých objektů. V rámci malého objemu portfolia nelze s dostatečnou přesností určit výchozí baseline na základě odlišné skupiny objektů. Je tak dáno především množstvím proměnných, rozdílností mezi objekty a nahodilostí v chování uživatelů.

V rámci samotných pokynů byl výrazný rozdíl mezi pokyny pro zvýšení a pro snížení. Z naměřených dat byla zjištěna úspěšnost jednotlivých typů v rámci četnosti reakce na pokyn, kdy pokyny pro snížení dosahovaly úspěšnosti 88,91 % a pokyny na snížení 40,23 %. Lze pozorovat výrazný nepoměr mezi těmito hodnotami, je tak dáno především charakterem systému vytápění, který má tendenci udržovat teplotu v objektu na horní hranici komfortního limitu, tudíž neposkytuje potřebný prostor pro zápornou flexibilitu. Toto zjištění odpovídá předpokladům a je rovněž podpořeno daty z vyhodnocení objemu získané flexibility, kdy objem záporné flexibility byl

obecně nižší a rozkolísanější v porovnání s objemem flexibility kladné.

Vyhodnocená data vypovídající o objemu získané flexibility byla zatížena výraznou odchylkou, bylo tak dáno především malým počtem vzorků, kdy relativně spolehlivá data byla získána pouze na 7 týdnech z celého měření, tudíž počet vzorků pro každý modelový pokyn byl pro dané portfolio 7. Tyto odchylky lze pozorovat na všech testovaných scénářích, míra odchylky byla obecně vyšší pro pokyny na zvýšení což podporuje tezi o nižším potenciálu záporné flexibility.

Testovací scénáře měly dílčí úlohy ve vyhodnocení potenciálu flexibility a přinesly následující zjištění.

Na základě získaných dat lze stanovit maximální doporučenou dobu aktivace na 2 hodiny. V případě testovaných objektů, jež nedisponovaly žádnou formou akumulace, byla při využití pokynů v trvání 2 hodiny pozorována reakce komfortního limitu, kdy u scénářů využívající dlouhodobých pokynů typicky v čase 1,5 hodiny od počátku aktivace docházelo k postupnému omezení efektivity jednotlivých pokynů. Z tohoto důvodu by aktivace o delším trvání postrádala kýžený efekt a výrazněji by zasahovala do uživatelského komfortu.

V rámci testování přerušovaných pokynů bylo pozorováno vykompenzování této reakce avšak za cenu snížení celkového objemu získané kladné flexibility. Z tohoto měření plyne že přerušované pokyny mají svůj smysl při vyžadování stabilnější dlouhodobé kladné flexibility.

Scénáře testující přípravu domácnosti na budoucí aktivaci ve formě odstavení tepelného čerpadla či předtopu objektu však výrazné změny nedosáhly. Pro aktivace záporné flexibility byl vliv přípravy zanedbatelný, v případě aktivace kladné flexibility činil rozdíl v zásahu komfortního limitu v průměru 15 minut.

Rozdíl v objemu flexibility v rámci pracovních dnů a těch víkendových byl zanedbatelný, úspěšnost a účinnost těchto pokynů v typově obdobných aktivacích se téměř shodovala.

Zajímavým výstupem je zjištění o vlivu časového umístění daného pokynu, kdy zvyšující pokyny dosahovaly typicky vyšší účinnosti v nočních hodinách a snižující pokyny naopak v hodinách odpoledních. Je tak dáno především typickým teplotním profilem rezidenčních objektů v rámci dne. Toto chování je příznivé vzhledem k orientaci spotřebních špiček v průběhu dne.

V rámci pozorování délky trvání rebound effectu práce nenaplnila očekávání, především z důvodu unikátnosti jednotlivých výsledků, jež vedla k výrazným odchylkám a nepřesnému vyhodnocení získaných dat. V rámci práce pak bylo dosaženo zjištění o výrazném vlivu výpočtového okna na tento parametr. Na základě vyhodnocených dat lze tedy přistoupit k doporučení k využití výrazně nižších výpočtových oken jako jsou například 5 či 10 minut. Tento časový úsek zajistí vyšší přesnost a citlivost právě pro vyhodnocení dopadu na odloženou spotřebu.

Mezi hlavní přínosy práce lze zahrnout zasvěcení do problematiky, návrh možných metodik pro stanovení výchozího diagramu zatížení a náhled do chování malého portfolia využívaného v rámci flexibility včetně názorných ukázek jednotlivých typů pokynů.

V případě dalšího zkoumání této problematiky doporučují uskutečnit měření na výrazně početnějším portfoliu, s úmyslem zvýšení stability a počtu vzorků pro jednotlivé provedení pokynů, což povede k věrohodnějším výstupům. Zajímavé srovnání rovněž nabízí možnost využití flexibility tepelných čerpadel s akumulací nádobou, která by měla značný přínos v objemu a stabilitě získané flexibility. Dalším z aspektů vhodný ke zvážení v rámci rezidenčních objektů, je efektivita a využití záporné flexibility ve srovnání s flexibilitou kladnou. Zároveň je zapotřebí zaměřit se více na problematiku vlivu odložené spotřeby, která stále skýtá výrazný prostor pro výzkum.

Literatura

- [1] MPO, *Model zapojení DECE, akumulace a spotřeby včetně elektromobility do procesu řízení ES ČR: průběžná zpráva za rok 2018* [online]. Praha, 20.11.2018, , 46s [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <<https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2020/2/Flexibilita.pdf>>
- [2] DELOITTE, *Role agregátora v české energetice* [online]. Praha, 2018, , 150s [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <<https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2020/1/Role-agregatora-v-ceske-energetice.pdf>>
- [3] BHATTARAI, Bishnu Prasad, Birgitte BAK-JENSEN, Jaykrishnan Radhakrishna PILLAI a Martin MAIER. *Demand flexibility from residential heat pump* [online]. IEEE, 2014, 1-5 [cit. 2022-01-05]. ISBN 978-1-4799-6415-4. < Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6939348>>
- [4] NEXT KRAFTWERKE, *What does Peak shaving mean?* [online]. Cologne, 13.2.2019 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <<https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/what-is-peak-shaving>>
- [5] NEXT KRAFTWERKE, *What is load management?* [online]. Cologne, 14.2.2019 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <<https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/load-management>>
- [6] ČSÚ. *Spotřeba paliv a energií v domácnostech* [online]. Brno, 2015, 1- 121 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <<https://www.czso.cz/csu/czso/spotreba-paliv-a-energii-v-domacnostech>>
- [7] EUROSTAT. *Energy consumption in households* [online]. Luxembourg city, 2021, , 1-9 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <<https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/58200.pdf>>
- [8] NIELSEN, Kirsten Molgaard, Tom Sondergaard PEDERSEN a Palle ANDERSEN. *Heat pumps in private residences used for grid balancing by demand desponse methods* [online]. IEEE, 2012, 2012, , 1-6 [cit. 2022-01-05]. ISBN 978-1-4673-1935-5. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6281490>>

- [9] JIA, Runmin, M. Hashem NEHRIR a Donald A. PIERRE. Voltage Control of Aggregate Electric Water Heater Load for Distribution System Peak Load Shaving Using Field Data. *2007 39th North American Power Symposium* [online]. IEEE, 2007, , 492-497 [cit. 2022-01-05]. ISBN 978-1-4244-1725-4. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4402355>>
- [10] BJERREGAARD, Peter Thais, Ireneusz Grzegorz SZCZESNY, Iker Diaz DE CERIO MENDAZA a Jayakrishnan R. PILLAI. Intelligent control of flexible loads for improving low voltage grids utilization. *IEEE PES ISGT Europe 2013* [online]. IEEE, 2013, , 1-5 [cit. 2022-01-05]. ISBN 978-1-4799-2984-9. Dostupné z: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6695287>>
- [11] ENERNOC. *The Demand Response Baseline* [online]. USA, 2009, , 1-16 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.naesb.org/pdf4/dsmee_group3_100809w3.pdf>
- [12] MPO, *Závěrečná zpráva I. etapy projektu ZL6 NAP SG: Za rok 2020/2021. NAP SG ZL6* [online]. 30.4.2021, , 1-79 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <<https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2021/5/Zaverecna-zprava-1-etapy-ZL6-MPO.pdf>>
- [13] ENERNOC. *The Demand Response Baseline* [online]. USA, 2009, , 1-16 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://library.cee1.org/sites/default/files/library/10774/CEE_EvalDRBaseline_2011.pdf>
- [14] KEMA, *PJM Empirical Analysis of Demand Response Baseline Methods* [online]. Clark Lake, Michigan, 20.4.2011, , 1-113 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <<https://www.pjm.com/-/media/markets-ops/demand-response/pjm-analysis-of-dr-baseline-methods-full-report.ashx>>
- [15] KAŠÁK, Martin. *Typové diagramy dodávek: vznik a současný stav řešení* [online]. 01.06.2004, 1-18 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <<https://slideplayer.cz/slide/2616130/>>

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Veličina	Značka jednotky
B_{tn}	baseline v čase n	(kW)
$k_{rc,a}$	korekční rozdílový příkon	(kW)
$k_{rc,s}$	korekční rozdílový činitel	(1)
k_t	korekční teplotní činitel	(kW · °C ⁻¹)
k_{tc}	korekční teplotní příkon	(kW)
P_0	příkon moment před aktivací	(kW)
p_{tavg}	průměrná změna zatížení	(kW)
P_{tn}	příkon v čase n	(kW)
p_{tn}	změna zatížení v čase n	(kW)
z	poměrná změna zatížení	(1)
Δ_x	absolutní chyba poměrné změny zatížení	(kW)
δ_x	relativní chyba poměrné změny zatížení	(%)
ϑ_n	teplota v čase n	(°C)
ϑ_0	teplota moment před aktivací	(°C)

Zkratka	Vysvětlivky
Baseline	výchozí diagram zatížení
DSR	demand side response
FTE	fotovoltaické elektrárny
JE	jaderny elektrárny
PDS	provozovatel distribuční soustavy
PPS	provozovatel přenosové soustavy
R1	metodika měření před/po
R2	metodika referenční skupiny
R3	metodika baseline typ 1
RE	rebound effect
VO	výpočtové okno
VTE	větrné elektrárny

Seznam příloh

A Dataset 01. 01. 2022–28. 02. 2022	81
B Dataset 11. 12. 2021–26. 03. 2022	81
C Dataset 10. 03. 2021–30. 06. 2021	81
D Vyhodnocení výpočtového okna	81
E Výpočet relativní odchylky metodik	81
F Výpočet směrodatné odchylky	81
G Trvání rebound effectu	82

A Dataset 01. 01. 2022–28. 02. 2022

Příloha A obsahuje původní dataset z měření zatížení na 10 objektech v Plzeňském kraji (Domažlicko) z období 01. 01. 2022–28. 02. 2022, v podobě jak byla poskytnuta k vyhotovení práce. Příloha A je dostupná v rámci digitálních příloh k práci.

B Dataset 11. 12. 2021–26. 03. 2022

Příloha B obsahuje rozšířený dataset z měření zatížení na 35 objektech v Plzeňském kraji (Domažlicko) z období 11. 12. 2021–26. 03. 2022, v podobě jak byla poskytnuta k vyhotovení práce. Příloha B je dostupná v rámci digitálních příloh k práci.

C Dataset 10. 03. 2021–30. 06. 2021

Příloha C obsahuje dataset z měření zatížení na 12 objektech z období 10. 03. 2021–30. 06. 2021, v podobě jak byla poskytnuta k vyhotovení práce. Příloha C je dostupná v rámci digitálních příloh k práci.

D Vyhodnocení výpočtového okna

Příloha D obsahuje excelovský soubor s agregovanými daty vyhodnocenými na základě vybraných metodik pro různé velikosti výpočtového okna. Příloha D je dostupná v rámci digitálních příloh k práci.

E Výpočet relativní odchylky metodik

Příloha E obsahuje excelovský soubor s agregovanou změnou zatížení dle vybraných metodik a vypočtené hodnoty relativních odchylek metodik měření před/po a referenční skupiny vůči upravené metodice baseline typ 1. Příloha E je dostupná v rámci digitálních příloh k práci.

F Výpočet směrodatné odchylky

Příloha F obsahuje excelovský soubor s agregovanou změnou zatížení v čase dle vybraných metodik měření před/po a upravená baseline typu 1, s dělením na základě

typu pokynu. Data jsou zprůměrována dle typu pokynu a následně vypočtena směrodatná odchylka na základě těchto dat. Příloha F je dostupná v rámci digitálních příloh k práci.

G Trvání rebound effectu

Příloha G obsahuje srovnání trvání rebound effectu v závislosti na typu pokynu pro vybrané metodiky se zahrnutím směrodatné odchylky těchto údajů.

Pokyny pondělí

Pokyn 1A

Tab. G.1: Trvání RE pro pokyn 1A

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	55,71	$\pm 29,69$
baseline typ 1	57,86	$\pm 27,11$

Pokyn 1B

Tab. G.2: Trvání RE pro pokyn 1B

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	77,14	$\pm 24,62$
baseline typ 1	72,86	$\pm 28,27$

Pokyn 1C

Tab. G.3: Trvání RE pro pokyn 1C

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	66,43	$\pm 39,97$
baseline typ 1	62,14	$\pm 41,99$

Pokyn 1D

Tab. G.4: Trvání RE pro pokyn 1D

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	66,43	$\pm 26,42$
baseline typ 1	66,43	$\pm 19,40$

Pokyny úterý

Pokyn 2A

Tab. G.5: Trvání RE pro pokyn 2A

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	49,29	$\pm 22,27$
baseline typ 1	53,57	$\pm 26,42$

Pokyn 2B

Tab. G.6: Trvání RE pro pokyn 2B

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	68,57	$\pm 27,61$
baseline typ 1	64,29	$\pm 27,44$

Pokyn 2C

Tab. G.7: Trvání RE pro pokyn 2C

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	81,43	$\pm 19,40$
baseline typ 1	92,14	$\pm 18,68$

Pokyn 2D

Tab. G.8: Trvání RE pro pokyn 2D

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	75,00	$\pm 31,05$
baseline typ 1	72,86	$\pm 33,47$

Pokyny středa

Pokyn 3A

Tab. G.9: Trvání RE pro pokyn 3A

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	68,57	$\pm 30,90$
baseline typ 1	64,29	$\pm 35,60$

Pokyn 3B

Tab. G.10: Trvání RE pro pokyn 3B

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	77,14	$\pm 21,85$
baseline typ 1	70,71	$\pm 28,59$

Pokyny čtvrtek

Pokyn 4A

Tab. G.11: Trvání RE pro pokyn 4A

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	66,43	$\pm 22,47$
baseline typ 1	64,29	$\pm 19,17$

Pokyn 4B

Tab. G.12: Trvání RE pro pokyn 4B

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	49,29	$\pm 15,45$
baseline typ 1	49,29	$\pm 15,45$

Pokyny sobota

Pokyn 6A

Tab. G.13: Trvání RE pro pokyn 6A

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	75,00	$\pm 28,91$
baseline typ 1	72,86	$\pm 28,27$

Pokyn 6B

Tab. G.14: Trvání RE pro pokyn 6B

	$t_{RE} (min)$	$\sigma (min)$
měření před/po	55,71	$\pm 17,41$
baseline typ 1	60,00	$\pm 16,04$