

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Ing. Václav Kaczmarczyk

**OPTIMÁLNÍ METODY ŘÍZENÍ
ENERGETICKÉ SPOTŘEBY BUDOV**

**OPTIMAL CONTROL STRATEGIES
FOR BUILDING ENERGY CONSUMPTION**

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Studijní obor: Kybernetika, automatizace a měření

Školitel: Prof. Ing. František Zezulka, CSc.

Brno, 2015

Obsah

Obsah	1
Úvod	2
1 Historie a současnost elektrických sítí	4
2 Optimalizační úloha a její řešení	6
3 Modelování spotřebičů	8
3.1 Spotřebiče s odložitelným cyklem (odložitelné spotřebiče)	8
3.2 Spotřebiče s přerušitelným během (přerušitelné spotřebiče)	9
3.3 Termostatem řízené spotřebiče	10
3.4 Distribuované zdroje elektrické energie	11
3.5 Akumulátory	12
4 Building energy manager	13
4.1 Optimalizační problém	14
4.1.1 Energetická rovnováha	14
4.1.2 Minimalizace ceny	15
4.1.3 Dodržení preferovaných časů spuštění odložitelných spotřebičů	15
4.1.4 Maximalizace tepelného komfortu	16
4.1.5 Minimalizace četnosti akčních zásahů	16
4.1.6 Omezení maximálního celkového výkonu	17
4.1.7 Vícekriteriální optimalizace	17
5 Ověření navrženého řešení	19
Závěr	23
Abstrakt	26
Životopis autora	28

Úvod

Cíle práce

Hlavním cílem výzkumu v této oblasti je, s využitím vhodných matematických postupů, vytvořit a ověřit univerzální metodu optimálního plánování spotřeby elektrické energie pro rezidenční oblasti a pro účely její verifikace a validace realizovat její softwarovou implementaci. Tato metoda umožní na základě požadavků koncového uživatele koordinovat činnost elektrických spotřebičů, lokálních generátorů a akumulátorů v inteligentní domácnosti. Bude rovněž brát v potaz změny vstupních parametrů jako je kolísající cena elektrické energie, změny venkovní teploty, rychlosti větru či úrovně slunečního osvětlení. Metoda bude stát na matematických základech, a přesto její složitost a výpočetní náročnost nebude překážkou k její budoucí implementaci i do cenově dostupných zařízení – takových, jaké budou koncoví uživatelé ochotni zaplatit a schopni konfigurovat a provozovat.

Význam zpracovávaného tématu dokládá množství publikací, které se této problematice v současné době věnují. Aktuální přehled problematiky je k dispozici ve studii [Deng et al. \[2015\]](#).

Metoda řešení

Před samotným procesem návrhu optimálního řízení je nutno rozdělit domácí spotřebiče do kategorií v závislosti na typickém způsobu jejich využívání a na možnostech, které tyto spotřebiče poskytují s ohledem na odložení pracovního cyklu nebo redukci spotřeby elektrické energie. V práci je definováno pět kategorií spotřebičů a pro každou z nich je vytvořen matematický model, kterým je jednoznačně popsána funkcionální náležitosti do příslušné kategorie. Jedná se o následující kategorie:

- spotřebiče s odložitelným pracovním cyklem (dále *odložitelné spotřebiče*),
- spotřebiče s přerušitelným pracovním cyklem (dále *přerušitelné spotřebiče*),
- termostatem řízené spotřebiče,

- distribuované generátory,
- zásobníky energie,
- neřiditelné spotřebiče.

Tyto matematické popisy spotřebičů umožňují vytvořit model celého systému. Nad tímto modelem lze definovat komplexní optimalizační problém (*smíšený lineární či kvadratický problém*¹), pro jehož řešení je možno využít některou z osvědčených optimalizačních metod implementovaných v podobě dostupných softwarových nástrojů. Řešením tohoto problému je optimální plán provozu jednotlivých spotřebičů. Na základě plánu jsou však spotřebiče řízeny pouze omezenou dobu. Po jejím uplynutí je s využitím aktualizovaných vstupních parametrů a vnějších vlivů vypočten nový plán, přičemž se celá situace opakuje. Tato metoda optimalizace vycházející z modelu systému je pojmenována *Model Predictive Control (MPC) with receding horizon*, čili prediktivní řízení s klouzavým horizontem založené na modelu (Richalet et al. [1978]).

Pro řízení množiny spotřebičů existuje řada kritérií optimality, mezi nimiž lze intuitivně vymezit dvě nejvýznamnější – cena zaplacená za spotřebovanou energii a zachování určité úrovně komfortu uživatele. V odborné literatuře je ovšem popsána řada dalších kritérií, například minimalizace spotřeby oxidu uhličitého v případě, kdy distributor poskytuje aktuální informace o zastoupení jednotlivých zdrojů elektrické energie při její výrobě. Dalším kritériem pak může být co nejpřesnější sledování odběrové křivky stanovené distributorem. Kombinací jednotlivých požadavků lze získat požadované chování celého systému, avšak vzhledem k tomu, že jednotlivé požadavky mohou být částečně či zcela protichůdné, není ladění jejich vzájemných priorit triviální záležitostí a platí zde princip *quid pro quo*². Několik takových kombinací je prezentováno a diskutováno v průběhu validace metody (kapitola 7 práce).

¹MILP či MIQP patří do skupiny vícekritériálních kombinatorických optimalizačních problémů

²Něco za něco (lat.)

Kapitola 1

Historie a současnost elektrických sítí

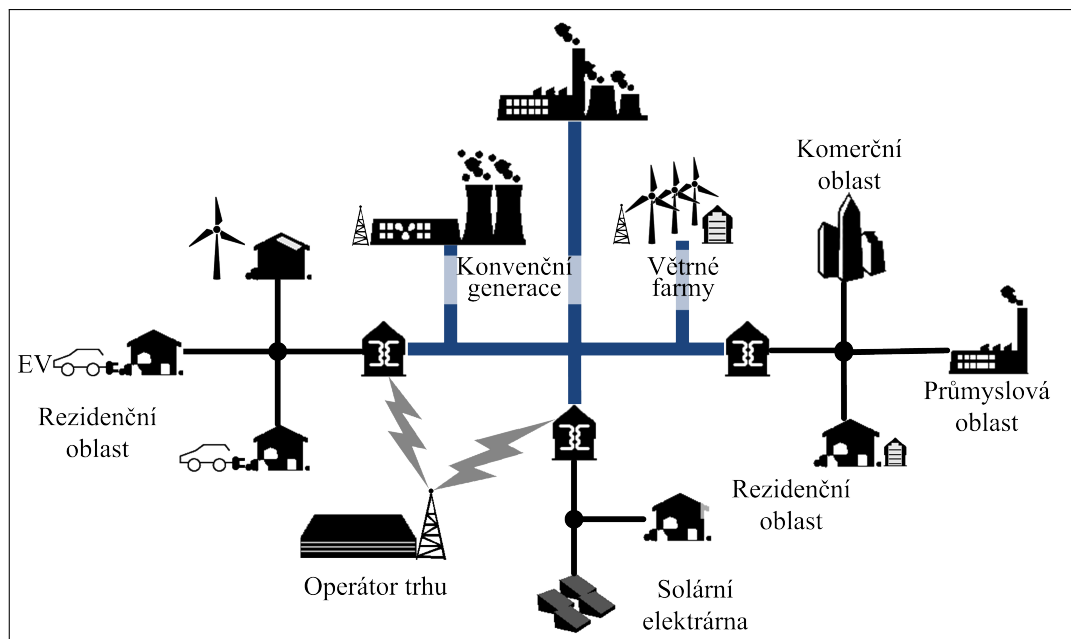
Tato kapitola práce popisuje proces významné přeměny energetického průmyslu odehrávající se v posledních dvaceti letech. Tato přeměna probíhá jak na poli obchodním a politickém, tak na poli technologickém. V energetickém průmyslu došlo k liberalizaci a decentralizaci, které měly za následek vznik trhů, na kterých je elektrická energie výrobci nabízena a velkými spotřebiteli či dodavateli pro koncové zákazníky poptávána. Neustále také sílí tlak na omezování výroby energie spalováním fosilních paliv a nahrazováním za výrobu z obnovitelných zdrojů energie. Na tyto změny však není stávající elektrizační soustava plně připravena, a je proto nutná její transformace na síť *smart grid*.

Smart grid

Dle Evropské technologické platformy ([Platform \[2015\]](#)) je *smart grid* elektrická distribuční síť, která dokáže inteligentně integrovat požadavky všech připojených uživatelů (výrobců, spotřebitelů i těch, kteří elektřinu jak vyrábějí tak spotřebovávají) tak, aby byl spolehlivě zabezpečen veškerý přenos elektrické energie. Definic sítě *smart grid* existuje velké množství, avšak napříč všemi panuje shoda ve výčtu vlastností, které musí moderní elektrizační soustava splňovat. Jedná se o

- optimální využívání velkých konvenčních zdrojů a zásobníků energie spolu s možností řízení malých distribuovaných zdrojů a aktivního ovlivnění objemu spotřeby pomocí inteligentních spotřebičů a motivace koncových uživatelů (*demand response*),
- snížení ekologického dopadu výroby a distribuce energie přesnějším plánováním výroby, možností využití obnovitelných zdrojů, decentralizací výroby, možností skladování energie,
- odolnost vůči přírodním katastrofám (zemětřesení, bouře) a záměrným útokům, fyzickým i kybernetickým,
- zabezpečení kvality dodávané energie,

- monitorování všech důležitých prvků distribuční sítě, snížení pravděpodobnosti výpadku dodávky,
- těsné provázání s trhem elektrické energie.



OBRÁZEK 1.1: Síť *smart grid*

Demand response

Se vzrůstajícím podílem elektřiny vyrobené s využitím malých a středně velkých generátorů z obnovitelných zdrojů energie (OZE) klesá přesnost predikce výroby a spotřeby elektrické energie a provoz distribuční sítě se stává celkově méně předvídatelným. V důsledku opatření přijatých Evropským parlamentem ([Commission \[2008\]](#)) bude tento trend dále narůstat. Nejlepším řešením nastíněných problémů je zabezpečení spotřeby energie co nejlépe místu výroby a v čase její výroby, případně její uskladnění (např. v akumulátorech elektromobilů). Pro to je však nutno překonat mnoho technických omezení, dále pak využívat přesných předpovědí proudění větru a úrovně slunečního svitu jako vstupů do sofistikovaných optimalizačních algoritmů. Na základě jejich výstupů může být rozhodnuto o konzumaci či ukládání energie konkrétními technickými prostředky.

Velkoobchodní ceny elektřiny na trhu většinou kolísají v průběhu dne – ve špičce jsou vyšší, mimo špičku pak nízké ([Mohsenian-Rad and Leon-Garcia \[2010\]](#)). Tyto změny se však týkají pouze malého procenta odběratelů – většina koncových zákazníků má se svým dodavatelem sjednány pevné podmínky a cenu.

S nástupem *smart grid* mohou tito zákazníci využívat služby *demand response* (DR) – změnit způsob využívání elektrické energie tak, že budou reagovat na měnící se cenu během určitého časového období za účelem minimalizace svých výdajů a zachování požadovaného komfortu.

Základním předpokladem *demand response* je, že koncový uživatel dokáže snížit část své spotřeby elektřiny v časovém intervalu s vyšší cenou a spotřebovat o to více, jakmile cena poklesne (Braithwait [2005], Martinez and Russell [2004], Holland [2008]). Za to je pak odměněn především snížením platby za energii. Nevýhodou pro koncového zákazníka je, že využívání *demand response* spolu s dynamickými cenovými tarify činí plánování spotřeby pro minimalizaci výdajů komplexní záležitostí (Soares et al. [2012]). Vzhledem k tomu, že *demand response* tarify většinou představují úsporu cca 10 %, což bývá výrazně méně, než si uživatelé původně představují, je nezbytná aplikace přístupu *nastav a zapomeň*. Dá se říci, že uživatelé nechtějí vědomě měnit své vzorce chování při používání elektrických zařízení, ale očekávají, že DR-kompatibilní spotřebiče “dělají správné věci ve správnou dobu” bez zvýšení rizika neúměrného nárůstu plateb za energii.

Kapitola 2

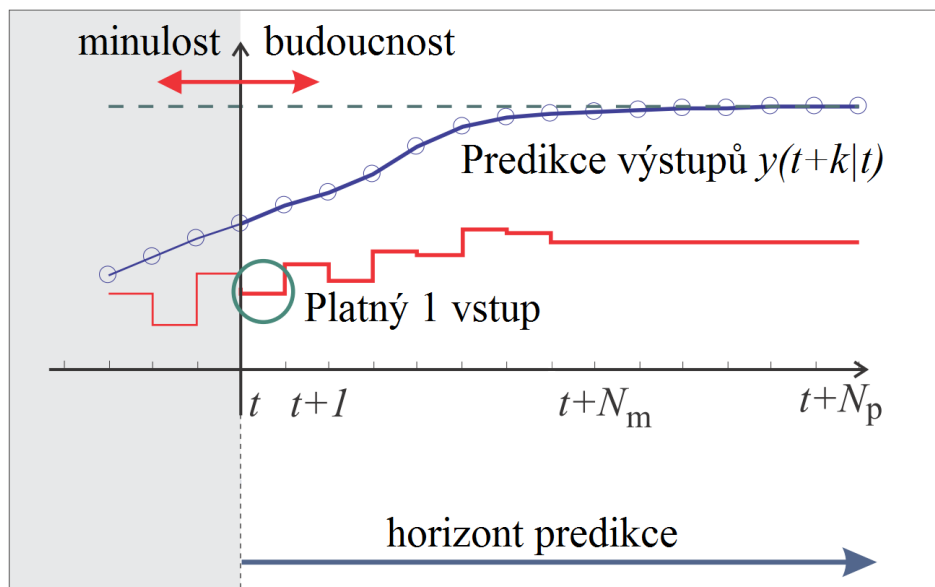
Optimalizační úloha a její řešení

Kapitola nastiňuje princip metody, která je v rámci práce využita pro řešení optimalizačních úloh – *Model Predictive Control* (MPC).

Jádrem MPC je řešení optimalizačního problému podle daného kritéria optimality. To je voleno podle typu řešené úlohy. Algoritmus na základě modelu systému stanoví nejen optimální akční zásah, ale vypočte jeho hodnoty pro celý horizont predikce. Pro řízení se však uplatní pouze hodnota vypočtená pro nejbližší časový interval. Po uplynutí doby odpovídající délce jednoho časového okna se výpočet úlohy opakuje s využitím nově získaných hodnot vstupních veličin a po případné aktualizaci dalších parametrů modelu. Ze získané sekvence akčních zásahů se opět využije pouze první a po uplynutí časového okna se postup opakuje. Takové řízení se nazývá *řízení s klouzavým horizontem* (viz obrázek 2.1).

MPC se definuje téměř vždy pro systémy popsané stavovým popisem (Havlena and Štecha [1999]). Mějme diskrétní systém popsaný stavovými rovnicemi

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \tag{2.1}$$



OBRÁZEK 2.1: Metoda MPC (Převzato z [Bemporad and Morari \[1999\]](#))

kde $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ popisují stavy, vstup a výstup systému. Predikce stavu x , kterou získáme jako k -tou iteraci modelu 2.1 počínaje stavem $x(t)$ se značí $x(t+k|t)$.

Pak pro vyřešení MPC problému je nutno provést minimalizaci kritériální funkce při dodržení zadaných omezení. V případě diskrétního systému, kdy úkolem MPC je sledování požadované trajektorie výstupu, kritériální funkce MPC penalizuje odchylku od požadované trajektorie během horizontu predikce ($\mathbf{y}_k - \mathbf{y}_k^d$), velikost akčního zásahu na celém horizontu predikce ($\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_k^d$) a odchylku od požadovaného výstupu na konci horizontu predikce ($\mathbf{y}_N - \mathbf{y}_N^d$). Váhové matice \mathbf{Q} , \mathbf{R} a \mathbf{P} určují relativní důležitost jednotlivých členů kritériální funkce. MPC problém lze pak vyjádřit jako

$$\begin{aligned} \min_{U=\{\mathbf{u}(t+k|t)\}_{k=t}^{t+N_m-1}} J(\mathbf{U}, \mathbf{x}(t), N_p, N_m) = & \mathbf{x}^\top(N_p)\mathbf{P}\mathbf{x}(N_p) + \\ & \sum_{k=0}^{N_p-1} \mathbf{x}^\top(t+k|t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t+k|t) + \sum_{k=0}^{N_m-1} \mathbf{u}^\top(t+k|t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t+k|t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

s ohledem na omezení ve tvaru

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1\mathbf{u}(t+k|t) & \leq \mathbf{G}_1 \\ \mathbf{E}_2\mathbf{x}(t+k|t) + \mathbf{F}_2\mathbf{u}(t+k|t) & \leq \mathbf{G}_2. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Kapitola 3

Modelování spotřebičů

Věrný fyzikální model budovy včetně spotřebičů, který umožňuje plně a přesně sledovat její dynamiku v jednotlivých časových okamžicích a různých časových měřítcích, by byl ideálním nástrojem pro studium chování celého systému. Vytvoření takového modelu a jeho studium však není možné. Proto jsou v průběhu této kapitoly vytvořeny zjednodušené modely spotřebičů na základě jejich dynamického chování v průběhu zkoumaného časového období s ohledem na velikost časového slotu při plovoucím horizontu¹. Cílem kategorizace je modelovat pro každý z konkrétních spotřebičů jen takové chování, které je pro něj charakteristické a z hlediska spotřeby/výroby/uchovávání elektrické energie převládající.

3.1 Spotřebiče s odložitelným cyklem (odložitelné spotřebiče)

Tyto spotřebiče lze charakterizovat pracovním cyklem o délce v rozmezí několika minut až několika hodin a tím, že uživatel většinou vyžaduje jejich spouštění relativně zřídka (nejvýše jednou či dvakrát denně), avšak jakmile jsou spuštěny, není zpravidla možné či vhodné jejich cyklus přerušovat² (přerušování cyklu z algoritmického hlediska je diskutováno v kapitole 5.1.5 práce). Typickým příkladem odložitelného spotřebiče je myčka nádobí.

Bud' \mathbb{A} množinou všech odložitelných spotřebičů, pak pro každý spotřebič a z této množiny definujeme vektor \mathbf{r} délky odpovídající délce plánovacího horizontu T . Pro každý nadcházející časový slot t je $r_{a,t} = 1$ v případě, že cyklus spotřebiče a má být v odpovídajícím časovém slotu spuštěn. Ve všech ostatních případech jsou prvky tohoto vektoru nulové. Tuto podmínku zajišťuje rovnice 3.1. Ve většině případů uživatel požaduje vykonání cyklu spotřebiče v užším časovém intervalu, než je celý plánovací horizont. Hodnota α_a označuje nejdřívejší start a hodnota

¹Ta byla zvolena jako 15 minut (rozhodnutí je podrobně popsáno v kapitole 5.3.5 práce).

²Než krátké přerušování cyklu uživatelem je spíše myšlena delší přestávka trvající jeden i více časových slotů. Taková přestávka většinou v pracovním cyklu není možná z technologických důvodů.

β_a nejpozdější konec cyklu spotřebiče a ($\alpha_a < \beta_a$).

$$\sum_{t=1}^T r_{a,t} = 1 \quad \forall a \in \mathbb{A} \quad (3.1)$$

$$r_{a,t} = 0 \quad \forall t \notin \{\alpha_a, \beta_a - l_a^{DE}\}, \forall a \in \mathbb{A} \quad (3.2)$$

Délka vykonávaného cyklu je pak dána hodnotou l_a^{DE} . Rovnice 3.2 zaručuje, že start cyklu spotřebiče nastane pouze v takovém časovém slotu, kdy platí, že celý jeho cyklus bude hotov uvnitř intervalu specifikovaného uživatelem. Během svého cyklu spotřebič a nekonzumuje elektrickou energii rovnoměrně. V modelu je proto možné definovat pro každý časový slot t jinou spotřebu energie $e_{a,t}^{DE}$ a spolu s ní i maximální příkon spotřebiče $p_{a,t}^{DE}$. Nerovnice 3.3, resp. 3.4 zabezpečují, že v žádném časovém slotu není překročena maximální hodnota příkonu P^{TOT} , která je dána technickým či smluvním omezením (např. velikostí hlavního jističe).

$$\sum_{a=1}^{\mathbb{A}} \left(\sum_{j=1}^{l_a^{DE}} r_{a,t-j+1} \cdot e_{a,t}^{DE} \right) \leq E^{TOT} \quad \forall t \in T : t - j + 1 > 0 \quad (3.3)$$

$$\sum_{a=1}^{\mathbb{A}} \left(\sum_{j=1}^{l_a^{DE}} r_{a,t-j+1} \cdot p_{a,t}^{DE} \right) \leq P^{TOT} \quad \forall t \in T : t - j + 1 > 0 \quad (3.4)$$

V rámci práce jsou při modelování spotřebičů s odložitelným cyklem navržena i další pravidla, která rozšiřují možnosti použití modelu (viz kapitola 5.1 práce).

3.2 Spotřebiče s přerušitelným během (přerušitelné spotřebiče)

Přerušitelné spotřebiče jsou takové, u kterých je požadováno, aby běžely v průběhu dne po určitou dobu. Příkladem takového spotřebiče mohou být např. čerpadla zajišťující oběh bazénové vody přes čisticí filtry i několikrát v průběhu dne. Je zřejmé, že v tomto případě se požadovaná doba běhu spotřebiče určí výpočtem ze známé hodnoty žádaného přečerpaného množství a výkonu čerpadla.

Bud' \mathbb{I} množinou všech přerušitelných spotřebičů, pak pro každý spotřebič i z této množiny definujme vektor m délky odpovídající délce plánovacího horizontu T . Pro každý časový slot t je $m_{i,t} = 1$ v případě, že spotřebič i má v tomto časovém slotu běžet. V opačném případě obsahuje prvek vektoru hodnotu 0. Toto chování je popsáno v rovnici 3.5. Uživatel může definovat časový interval, ve kterém může

konkrétní přerušitelný spotřebič běžet. Mimo tento interval spotřebič běžet nesmí. Pro každý spotřebič i z množiny \mathbb{I} je počátek intervalu značen α_i^{IN} a konec pak β_i^{IN} . Požadavek je formálně definován jako 3.6.

$$\sum_{t=1}^T m_{i,t} = l_i^{IN} \quad \forall i \in \mathbb{I} \quad (3.5)$$

$$m_{i,t} = 0 \quad \forall i \in \mathbb{I}, t \in \langle \alpha_i^{IN}, \beta_i^{IN} \rangle \quad (3.6)$$

V rámci práce jsou při modelování spotřebičů s přerušitelným během navržena i další pravidla, která rozšiřují možnosti použití modelu (viz kapitola 5.2 práce).

3.3 Termostatem řízené spotřebiče

Činnost termostatem řízených spotřebičů (TCA) nelze modelovat samostatně, ale vždy pouze společně s prostorem, ve kterém se nacházejí. Pro vytvoření termodynamického modelu budovy byly studovány dvě varianty – identifikace parametrického modelu ze změřených dat a konstrukce termodynamického modelu ze znalosti fyzikálních principů výměny tepla. Vybrána byla varianta druhá, vytvořený model může být zapsán jako nelineární systém diferenciálních rovnic

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + f(\mathbf{x}, u) + \mathbf{d}(t) \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

kde $f(\mathbf{x}, u)$ je nelinearita ve tvaru (*vstup.stav*) a $\mathbf{d}(t)$ je vektor časově proměnných poruch působících na systém (ve verzi modelu popsané v této práci se jedná o vliv venkovní teploty). Tento systém lze linearizovat v okolí pracovního bodu pomocí rozvoje do Taylorova polynomu a následně diskretizovat (s využitím tvarovače nultého řádu).

Bud' \mathbb{H} množina všech TCA zařízení. Fyzikální model je po diskretizaci reprezentován trojicí matic: maticí vnitřních vazeb systému \mathbf{A} , maticí vazeb vstupů na stavy \mathbf{B} a maticí vazeb stavů na výstupy \mathbf{C} . Rozměry těchto matic odpovídají vlastnostem modelu: $|\mathbf{A}| = (\gamma \times \gamma)$, $|\mathbf{B}| = (\gamma, |\mathbb{H}| + 1)$, $|\mathbf{C}| = (|\mathbb{H}|, \gamma)$, kde γ je řád modelu, \mathbb{H} počet zařízení. Řád modelu je dán počtem tepelných kapacit v modelu (nejen kapacit vytápěných místností, ale rovněž stěn a dalších uvažovaných částí budovy).

Stav modelu během výpočtu je v každém časovém slotu plně popsán vektorem stavových proměnných $\mathbf{x}_t = (x_{1,t}, \dots, x_{\gamma,t})^\top$. V případě modelu popsáném

v této práci odpovídají jednotlivé stavové proměnné přímo teplotám příslušných hmot objektu. Vektor vstupů systému $\mathbf{u}_t = (u_{1,t}, \dots, u_{|\mathbb{H}|,t}, t_t^{amb})^\top$ pak představuje výkony jednotlivých TCA zařízení s tím, že jeho poslední prvek je venkovní teplota. 3.8 je pak stavová rovnice modelu definující jeho dynamické chování v čase. \mathbf{C} pak značí obdélníkovou matici takovou, že $c_{i,i} = 1, \forall i \in |\mathbb{H}|$ a $c_{i,j} = 0, \forall i \neq j$. Rovnice 3.9 formálně určuje průběh výstupní teploty $t_{h,t}$ v čase t pro jednotlivá zařízení $h \in \mathbb{H}$.

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t + \mathbf{B}\mathbf{u}_t \quad \forall t \quad (3.8)$$

$$\mathbf{T}_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t \quad \forall t \quad (3.9)$$

Pro každou místnost a zařízení h má uživatel možnost nastavit úroveň komfortu – rozmezí hodnot, uvnitř kterých se teplota v místnosti musí pohybovat. Vektory ζ_h^{min} , resp. ζ_h^{max} udávají minimální, resp. maximální uživatelem akceptovanou teplotu v místnosti h pro všechny časové sloty t (3.10). Uvedená podmínka by bez změkčení mohla způsobit neřešitelnost optimalizačního problému. Zavedením proměnných $u_{h,t}^{min}$ a $u_{h,t}^{max}$ spolu s jejich minimalizací v kriteriální funkci je tento problém vyřešen. Změkčující proměnné \mathbf{u}^{min} a \mathbf{u}^{max} musí vždy splňovat podmínku 3.11. Při praktické realizaci má TCA spotřebič konečný maximální výkon. Ten popisuje konstanta $P_{max,h}^{TC}$ a jeho dodržení zabezpečuje pravidlo 3.12.

$$\zeta_{h,t}^{min} - u_{h,t}^{min} \leq T_{h,t} \leq \zeta_{h,t}^{max} + u_{h,t}^{max} \quad \forall h, t \quad (3.10)$$

$$u_{h,t}^{min} \geq 0, u_{h,t}^{max} \geq 0 \quad \forall h, t \quad (3.11)$$

$$0 \leq p_{h,t} \leq P_{max,h}^{TC} \quad \forall h, t \quad (3.12)$$

3.4 Distribuované zdroje elektrické energie

Mezi nejčastější distribuované generátory z obnovitelných zdrojů energie se řadí fotovoltaické články, větrné a vodní turbíny. V měřítku této práce lze vodní turbíny vyloučit. Ze zbývajících dvou možností byla zvolena generace energie z proudícího větru. Jakkoli se principiálně tento způsob generace energie liší od použití fotovoltaických článků, lze pro oba způsoby ve vysoké míře využít zde popsanou metodu modelování.

Pro optimální nakládání s energií vyrobenou větrnou turbínou je důležité znát co nejpřesnější odhad objemu výroby na horizontu predikce, a tedy i odhad rychlosti proudění větru. Způsob získání takového odhadu je popsán v kapitole 5.4.1 práce. Na základě dat tohoto odhadu lze následně odhadnout objem energie vyrobené větrnou turbínou pro jednotlivé časové sloty horizontu predikce a ten popsat

vektorem \mathbf{P}_W^{RE} . Tento vektor figuruje dále v rovnici energetické rovnováhy systému popsané v kapitole 5.3.1 práce.

3.5 Akumulátory

V rámci optimalizačního problému je stav baterie plně popsán její zbývající kapacitou v každém časovém slotu t označenou jako q_t . Tato hodnota musí z důvodu technických omezení pro konkrétní baterii ležet uvnitř intervalu $\langle e_{min}^{ST}, e_{max}^{ST} \rangle$ (viz rovnice 3.13). Energie, která v baterii zbývá v okamžiku připojení elektromobilu k *building energy management systému* (BEMS) v časovém slotu α^{ST} , je značena e_α^{ST} (3.14). Analogicky požadovaná energie v baterii při odpojení od BEMS v časovém slotu β^{ST} je značena e_β^{ST} (3.15). Mimo časový interval reprezentovaný konstantami $\langle \alpha^{ST}, \beta^{ST} \rangle$ je baterie odpojena (3.18). Objem energie nabitý do baterie v každém časovém slotu t je reprezentován hodnotou proměnné c_t . Analogicky objem vybité energie hodnotou proměnné d_t . Rovnice 3.16 a 3.17 zabezpečují, aby maximální objem energie nabitý během jednoho časového slotu nepřesáhl c_{max}^{ST} a maximální vybitý objem pak d_{max}^{ST} .

$$0 \leq e_{min}^{ST} \leq q_t \leq e_{max}^{ST} \quad \forall t \quad (3.13)$$

$$q_\alpha^{ST} = e_\alpha^{ST} \quad (3.14)$$

$$q_\beta^{ST} = e_\beta^{ST} \quad (3.15)$$

$$0 \leq c_t \leq c_{max}^{ST} \quad \forall t \quad (3.16)$$

$$0 \leq d_t \leq d_{max}^{ST} \quad \forall t \quad (3.17)$$

$$c_t = 0, \quad d_t = 0 \quad \forall t : \quad t < \alpha^{ST} \vee t > \beta^{ST} \quad (3.18)$$

Proces nabíjení i vybíjení energie do/z baterie popsáný v rovnici 3.19 je zatížen ztrátami. Jeho účinnost je popsána konstantami η_c pro nabíjení, respektive η_d pro vybíjení ($\eta_c \in (0, 1), \eta_d \in (0, 1)$). Při uchovávání energie v baterii dochází k jejímu samovybíjení. Poměrná část energie, která v baterii ubude za dobu trvání jednoho časového slotu Δ , je popsána konstantou κ ($\kappa \rightarrow 0$). Amortizace, kterou je nutno uvažovat pro každou 1 kWh energie odebrané z baterie, je značena θ_{unit}^{ST} a figuruje v kriteriální funkci, která je popsána v následující kapitole.

$$q_t = q_{t-1}(1 - \kappa) + \Delta \left(c_t \eta_c - \frac{d_t}{\eta_d} \right) \quad \forall t : \quad \alpha^{ST} \leq t \leq \beta^{ST} \quad (3.19)$$

Kapitola 4

Building energy manager

Centrem systému chytrého domu je *building energy manager* (BEM), k němuž jsou prostřednictvím komunikační sítě připojeny jednotlivé spotřebiče. K tomu, aby BEM mohl rozhodovat o optimálním plánování spotřebičů, potřebuje získat informace o aktuální ceně elektrické energie, o jejím výhledu na nadcházející časové období, informace o jednotlivých spotřebičích, jejich technických omezeních a informace o požadavcích uživatele. Na základě všech získaných dat vytváří a udržuje BEM model celého systému. V práci je navržen a popsán zjednodušený model systému, který za cenu akceptovatelného snížení přesnosti povede k vyhovující komplexitě výpočtu. *Building energy manager* musí zabezpečit

- *Spolehlivý chod spotřebičů* - elektrické spotřebiče, které patří do skupiny odložitelných spotřebičů, musí vykonat svůj pracovní cyklus v intervalu určeném uživatelem. Spotřebiče ze skupiny přerušitelných pak musí být spouštěny dle zadaných podmínek v průběhu dne. Čím větší je rozpětí nastavené uživatelem, tím lepší možnost má BEM k dosažení optimálního plánu.
- *Dodržení tepelné pohody* - termostatem řízené spotřebiče musí být nastaveny tak, aby byla dodržena tepelná pohoda ve všech místnostech podle požadavků uživatele - uživatel v rámci časového plánu vytápění či chlazení nastavuje pro jednotlivé časy (dny v týdnu) požadovaná rozpětí teplot v jednotlivých místnostech. Čím větší je rozpětí teplot, které uživatel akceptuje, tím lepší možnost má BEM k dosažení optimálního plánu.
- *Nabíjení akumulátorů* - uživatel požaduje, aby baterie elektromobilu byla v určitou hodinu nabita na požadovanou kapacitu. Před touto hodinou může systém (při dodržení konstrukčních omezení) v časech, kdy je energie ze sítě dostatečně drahá, využít energii z baterie k provozu spotřebičů. Čím více energie lze takto z baterie odčerpat, tím lepší možnost má opět BEM k dosažení optimálního plánu.
- *Dosažení finanční úspory* - je zcela zásadní požadavek uživatele a zároveň jde o významnou motivaci k provozování celého systému.

BEM rovněž zabezpečuje dodržení všech definovaných technických omezení spjatých jak se spotřebiči samotnými, tak i celkových omezení – např. musí zohlednit

dodržení maximálního výkonu odebíraného z distribuční sítě. Jednotlivé uvedené požadavky jsou vzájemně protichůdné – nejlépe je to možné demonstrovat na faktu, že požadavek na zlepšování *tepelného komfortu* (kdy skutečné hodnoty teplot lépe kopírují žádané hodnoty, respektive hranice pásma tolerance) vede ke zvyšování *ceny*. Naopak požadavek na snížení ceny (mj. i za provoz termostatem řízených spotřebičů) vede ke snížení úrovně tepelného komfortu. BEM tedy rozhoduje podle určité strategie. Volba konkrétní strategie je v pak kompetenci uživatele systému.

4.1 Optimalizační problém

Pro *building energy manager* je v této práci definován smíšený celočíselný kvadratický problém (MIQP) sestávající z (i) lineárních pravidel a omezení pro jednotlivé domácí spotřebiče, definovaných v rámci předchozí kapitoly, (ii) globálních technických a jiných omezení (např. energetické rovnováhy popsané v rámci kapitoly 6.4.1 práce) a (iii) kriteriální funkce, jejíž tvar odpovídá zvolené strategii. Z požadavků uživatele na BEM definovaných v rámci práce byly navrženy čtyři strategie popsané v následujících kapitolách.

4.1.1 Energetická rovnováha

Doposud byla definována pravidla pro modelování jednotlivých tříd domácích spotřebičů zvlášť. Všechny tyto spotřebiče však pracují v rámci jednoho systému společně a konzumují společnou elektrickou energii. V rámci matematického modelu BEM je tato vlastnost dána rovnicí energetické rovnováhy (4.1). Levá strana této rovnice popisuje celkový odebraný příkon domácnosti, tedy součet příkonů spotřebičů spadajících do příslušných kategorií (DE, IN, TH) a dále příkonu nabitého do akumulátoru c_t pro daný časový slot t . Pravá strana pak udává dodaný výkon. Zde se jedná o součet výkonu odebraného z akumulátoru d_t , výkonu generátoru z obnovitelných zdrojů p_t^{RE} a výkonu odebraného z distribuční sítě p_t^{MAINS} ve stejném časovém slotu. Uvolňující proměnná u_t^{MAINS} slouží pro zvýšení robustnosti výpočtu optimalizačního problému.

$$\sum_{a=1}^{\text{A}} p_{a,t}^{DE} + \sum_{i=1}^{\text{I}} p_i^{IN} + \sum_{h=1}^{\text{H}} e_{h,t}^{TH} + c_t = p_t^{RE} + d_t + p_t^{MAINS} \quad \forall t \quad (4.1)$$

$$0 \leq p_t^{MAINS} \leq P_{MAX}^{MAINS} + u_t^{MAINS} \quad \forall t \quad (4.2)$$

$$u_t^{MAINS} \geq 0 \quad \forall t \quad (4.3)$$

4.1.2 Minimalizace ceny

Základním požadavkem koncového uživatele na systém *demand response* je dosažení cenové úspory. Výraz Ψ_{Θ} ve funkci 4.8 udává celkovou cenu energie spotřebovanou všemi kategoriemi spotřebičů pro celý horizont predikce. Tato cena je získána jako součin jednotkové ceny v časovém slotu Θ_t a energie odebrané z distribuční sítě v jednotlivých časových slotech (96 intervalů délky 15 minut)¹. Pro každý časový slot je odebraná energie vypočtena jako součet energie spotřebované odložitelnými (DE, 4.4), přerušitelnými (IN, 4.5), termostatem řízenými (TH, 4.6) spotřebiči, energie nabitě do akumulátoru, dále pak záporně vzaté hodnoty energie vybité z akumulátoru (4.7) a hodnoty energie generované distribuovaným generátorem (větrnou turbínou).

$$\psi_t^{DE} = \sum_{a=1}^{|\mathbb{A}|} \sum_{j=1}^{l_a^{DE}} r_{a,t-j+1} \cdot e_{a,t}^{DE} \quad (4.4)$$

$$\psi_t^{IN} = \sum_{i=1}^{|\mathbb{I}|} \Delta \cdot p_i^{IN} \cdot m_{i,t} \quad (4.5)$$

$$\psi_t^{TH} = \sum_{h=1}^{|\mathbb{H}|} \Delta \cdot p_{h,t}^{TH} \quad (4.6)$$

$$\psi_t^{ST} = c_t - d_t \quad (4.7)$$

$$\Psi_{\Theta} = \sum_{t=1}^T \Theta_t \cdot (\psi_t^{DE} + \psi_t^{IN} + \psi_t^{TH} + \psi_t^{ST} - \Delta \cdot p_t^{RE}) \quad (4.8)$$

4.1.3 Dodržení preferovaných časů spuštění odložitelných spotřebičů

Minimalizace rovnice 4.9 vede k takovému chování systému, ve kterém je pracovní cyklus *DE* spotřebičů vykonán co nejdříve v intervalu zvoleném uživatelem. Při *Real-time pricing* (RTP) cenových tarifech (viz kapitola 1.6.3 práce), kdy je nutné do značné míry spoléhat se na predikci budoucí ceny energie, vede kombinace požadavku dodržení preferovaných časů a minimalizace ceny ke snížení rizika jejího špatného odhadu. Spolehlivost predikce je obecně nejvyšší na začátku predikovaného intervalu a dále do budoucnosti klesá. Zjednodušeně řečeno se tedy v

¹Jedná se o odebranou energii (kWh), nikoli příkon spotřebiče (kW), příkony jednotlivých spotřebičů p_{\circ} jsou násobeny délkou časového slotu Δ .

takovém případě nevyplatí posouvat cyklus spotřebiče daleko do budoucna, neboť odpovídající cena je predikovaná pouze s nízkou pravděpodobností. Spolu s minimalizací ceny energie je proto vhodné zahrnout do optimalizační úlohy i tuto podmínku.

$$\Psi_{DE} = \frac{1}{|\mathbb{A}|} \sum_{a \in \mathbb{A}} (s_a - \alpha_a) \quad (4.9)$$

4.1.4 Maximalizace tepelného komfortu

Minimalizace rovnice 4.10 zabezpečuje dodržení optimálních průběhů teploty v jednotlivých místnostech (maximalizuje tepelný komfort), neboť penalizuje vyšší hodnoty tzv. uvolňujících proměnných, které představují rozdíl mezi skutečnou teplotou a minimální/maximální teplotou požadovanou uživatelem při současném dodržení omezujících podmínek pro konkrétní zařízení. Optimální řešení této rovnice vede k udržení teploty na střední hodnotě mezi minimální a maximální mezí v rámci celého plánovacího horizontu.

$$\Psi_{TH} = \frac{1}{|\mathbb{H}|} \sum_{t=1}^T \sum_{h \in \mathbb{H}} \left(u_{h,t}^{min2} + u_{h,t}^{max2} \right) \quad (4.10)$$

4.1.5 Minimalizace četnosti akčních zásahů

V případě, kdy je změna akčního zásahu termostatem řízených spotřebičů prováděna prostřednictvím elektromechanického prvku (např. servopohonu), je vhodné, aby regulátor minimalizoval četnost požadovaných akčních zásahů. Pro naplnění takové podmínky je možno využít buď přidání pravidel, která zabezpečí rovnost akčních zásahů vždy v několika sousedních časových slotech, nebo úpravu kriteriální funkce. V rámci této práce je pro jednoduchost zvolena metoda modifikace této funkce přidáním výrazu 4.11. Tento zaručí minimalizaci rozdílu akčních zásahů vždy ve dvou sousedních časových slotech.

$$\Psi_{TH,P} = \sum_{h=1}^{\mathbb{H}} \sum_{t=2}^T (p_{h,t} - p_{h,t-1})^2 \quad (4.11)$$

4.1.6 Omezení maximálního celkového výkonu

V rovnici 4.2 se vyskytuje člen u_t^{MAINS} , pomocí kterého je zvýšena robustnost optimalizačního problému – tento člen zabezpečí, že problém má řešení i v případě, kdy jsou nevhodně zvoleny vstupní parametry (je žádáno spuštění velkého počtu spotřebičů během jediného dostatečně krátkého časového intervalu). Za běžného provozu je však nežádoucí, aby tento člen byl nenulový. Proto je vždy do kritériální funkce nutno přidat výraz pro jeho minimalizaci. Je možné minimalizovat buď pouze jeho hodnotu či velikost kvadrátu tohoto členu stejně, jako je uvedeno v rovnici 4.12. V případě, kdy je minimalizována pouze hodnota, je nutno přidat pravidlo $u_t^{MAINS} \geq 0$

$$\Psi_{PP} = m \cdot \sum_{t=1}^T (u_t^{MAINS})^2 \quad (4.12)$$

Konstanta m musí být zvolena tak, aby hodnota výrazu byla dostatečně velká i při velmi malém překročení maximálního přípustného výkonu odebraného z distribuční sítě (pro výpočet byla využita hodnota 1000).

4.1.7 Vícekriteriální optimalizace

Při vícekriteriální optimalizaci představuje nastavení preferencí (vah jednotlivých členů) klíčový problém. Každá z proměnných Ψ_{Θ} , Ψ_{DE} , Ψ_{TH} , $\Psi_{TH,P}$ a Ψ_{PP} ² totiž může nabývat rozdílných hodnot, přičemž ty se mohou lišit až o několik řádů. Zároveň se však v jednotlivých cyklech řízení s klouzavým horizontem jejich velikosti podstatně mění³. Má-li mít nastavení vah jednotlivých členů v optimalizaci smysl, je nutno zaručit, že jednotlivé proměnné budou nabývat pouze hodnot v určitých mezích. Pro každou z nich je tedy nutno stanovit její předpokládanou nejmenší a největší hodnotu a provést normalizaci, která hodnoty jednotlivých proměnných nejen přibližně sjednotí (v řádu), ale zejména vykompenzuje jejich velké změny v při běhu systému.

Meze Ψ^{min} a Ψ^{max} jednotlivých proměnných je tedy nutno určit před každým procesem optimalizace vždy na základě aktuálních vstupních parametrů. V rámci této práce byl navržen heuristický algoritmus pro výpočet těchto mezí, který je nutno spustit vždy s aktuálními parametry před optimalizací modelu v rámci

²Člen Ψ_{PP} normalizován nebude, neboť právě jeho zcela rozdílná absolutní velikost je pro jeho funkci klíčová.

³Například proměnná popisující cenu – Ψ_{Θ} – u odložitelných spotřebičů závisí na tom, kolik spotřebičů má při každém výpočtu naplánován svůj cyklus na horizontu predikce.

nového časového okna. Algoritmus určuje meze ceny spotřebované energie (Ψ_{Θ} pro jednotlivé třídy spotřebičů: $\Psi_{\Theta,DE}$, $\Psi_{\Theta,IN}$, $\Psi_{\Theta,TH}$ a $\Psi_{\Theta,ST}$), rozsah proměnných Ψ_{DE} a Ψ_{TH} pro určení komfortu DE a TH spotřebičů a rozsah proměnné $\Psi_{TH,P}$ pro omezení velikosti akčního zásahu TH spotřebičů.

- Pro odložitelné spotřebiče postup určení dolní meze $\Psi_{\Theta,DE}^{min}$ zahrnuje jednoduché hledání takového umístění spotřebiče v rámci uživatelem preferovaného intervalu, kdy cena spotřebované energie bude nejnižší. Horní mez $\Psi_{\Theta,DE}^{max}$ je pak určena jako průměr z několika náhodných umístění spotřebiče do zmíněného intervalu.
- Pro přerušitelné spotřebiče je postup triviální, pouze pokud nejsou na jejich běh definována žádná přídatná pravidla (viz kapitola 5.2 práce). V takovém případě pro výpočet dolní meze $\Psi_{\Theta,IN}^{min}$ probíhá umístění cyklů spotřebiče do časových slotů s nejnižší cenou, horní mez $\Psi_{\Theta,IN}^{max}$ je pak stanovena jako průměrná cena za několik náhodných rozmístění cyklů. Příklad, kdy jsou na provoz přerušitelných spotřebičů definována další pravidla, je podrobně popsán v příloze této práce.
- Horní mez pro termostatem řízené spotřebiče $\Psi_{\Theta,TH}^{max}$ je určena algoritmem, který provádí simulaci jednoduchého dvoustavového regulátoru na horizontu predikce. Dolní mez $\Psi_{\Theta,TH}^{min}$ je pak stanovena výpočtem jako poměrná část meze horní nebo na základě výsledků předchozích optimalizací.

Meze pro index porušení komfortu odložitelných spotřebičů Ψ_{DE}^{min} , respektive Ψ_{DE}^{max} je možno jednoduše určit ze znalosti uživatelem preferovaného časového okna pro spuštění spotřebiče a jeho vzdálenosti od obou konců preferovaného intervalu. Není-li k dispozici explicitní definice preferovaného časového okna, lze použít jeho začátek, případně polovinu intervalu. Meze dalších proměnných, jako jsou úroveň porušení komfortu Ψ_{TH} a $\Psi_{TH,P}$ jsou stanoveny na základě empiricky určených vstupních parametrů. Kompletní popis algoritmu je uveden v jedné z příloh této práce.

Po stanovení uvedených parametrů lze již jednotlivé proměnné v kriteriální funkci normalizovat dle vztahů 4.13 – 4.16.

$$\bar{\Psi}_{\Theta} = \frac{\Psi_{\Theta} - \Psi_{\Theta}^{min}}{\Psi_{\Theta}^{max} - \Psi_{\Theta}^{min}} \quad (4.13)$$

$$\bar{\Psi}_{DE} = \frac{\Psi_{DE} - \Psi_{DE}^{min}}{\Psi_{DE}^{max} - \Psi_{DE}^{min}} \quad (4.14)$$

$$\bar{\Psi}_{TH} = \frac{\Psi_{TH} - \Psi_{TH}^{min}}{\Psi_{TH}^{max} - \Psi_{TH}^{min}} \quad (4.15)$$

$$\bar{\Psi}_{TH,P} = \frac{\Psi_{TH,P} - \Psi_{TH,P}^{min}}{\Psi_{TH,P}^{max} - \Psi_{TH,P}^{min}} \quad (4.16)$$

$$\bar{\Psi}_{PP} = \Psi_{PP} \quad (4.17)$$

Na základě rozhodnutí uživatele je každému z uvedených kritérií $\Psi_{\Theta}(\cdot)$, $\Psi_{DE}(\cdot)$, $\Psi_{TH}(\cdot)$, $\Psi_{TH,P}(\cdot)$ přiřazena váha w , která rozhoduje o jeho relativní důležitosti. Spořivý uživatel bude volit větší důraz na minimalizaci ceny, a tedy tomuto cíli bude přiřazena vyšší váha. Uživatel preferující dodržení tepelného komfortu se bude chovat odlišně. Při optimalizaci je tedy možno jak nastavit do požadované rovnováhy všechna kritéria, tak lze některá z nich zcela vyloučit z výpočtu přiřazením nulové hodnoty odpovídajícím vahám. Výsledná kritériální funkce pro *energy manager* 4.18 pak odpovídá sumě jednotlivých váhovaných proměnných.

$$E = \omega_{\Theta} \cdot \bar{\Psi}_{\Theta} + \omega_{DE} \cdot \bar{\Psi}_{DE} + \omega_{TH} \cdot \bar{\Psi}_{TH} + \omega_{TH,P} \cdot \bar{\Psi}_{TH,P} + \bar{\Psi}_{PP}. \quad (4.18)$$

Celou optimalizační úlohu lze tedy definovat formálně jako

minimalizuj funkci 4.18

na základě kritérií 4.1, 4.2, 4.3, 3.1 – 3.19 a dalších popsanych v práci

Tuto úlohu lze vypočítat některým ze známých algoritmů specializovaných na hledání řešení kombinatorických optimalizačních problémů. V této práci je využita implementace algoritmu *branch and bound* popsaného v kapitole 3.1.1 v komerčním solveru CPLEX (IBM [2014]).

Kapitola 5

Ověření navrženého řešení

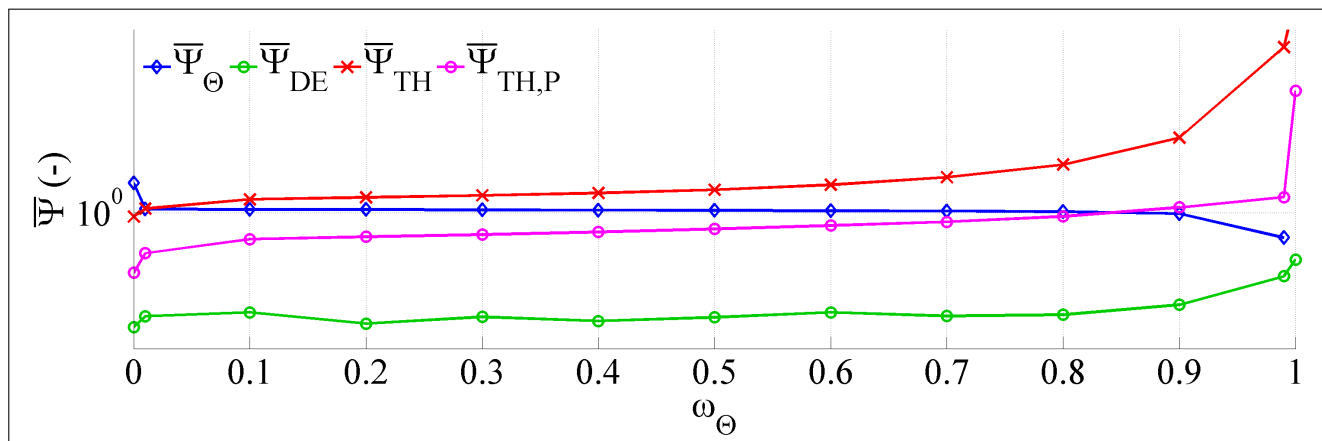
V rámci práce je provedeno několik studií s využitím vícekritériálního optimalizačního problému, při nichž je nastavení vah jednotlivých členů kritériální funkce problematické (jejich velikost je nutno určit experimentálně). Metoda, která je v rámci práce navrhována, by však měla být maximálně univerzální. S tím souvisí také možnost snadného nastavení strategie popisující chování systému jeho uživatelem. Jednotlivé členy optimalizační funkce je proto nutno normalizovat tak, aby při běhu systému nabývaly vždy pouze hodnot z definovaného rozsahu. Takto normalizované členy lze následně jednoduše váhovat vynásobením každého z nich příslušnou konstantou. Algoritmus pro výpočet normalizačních koeficientů je popsán v příloze D práce.

Funkce heuristického algoritmu

Tato kapitola popisuje čtyři případy optimalizace, kterým odpovídají čtyři členy v optimalizační funkci a čtyři různé váhové proměnné. Testování probíhalo tak, že pro každou z vah ω_\diamond byly postupně nastavovány hodnoty $0 - 0.01 - 0.1 - 0.2 - \dots - 0.8 - 0.9 - 0.99 - 1$, ostatním váhám ω_\blacklozenge pak vždy hodnoty dle vzorce $\omega_\blacklozenge = \frac{1}{3} \cdot (1 - \omega_\diamond)$.

Preference ceny

Na obrázku 5.1 jsou vyobrazeny průběhy jednotlivých členů optimalizační funkce. Člen $\bar{\Psi}_\Theta$ zobrazuje postupně klesající cenu s tím, jak je zvyšována její preference ω_Θ . Je zřejmé, že jakmile je $\omega_\Theta = 0$, cena není do optimalizační funkce zahrnuta vůbec, její hodnota je tedy vysoká (vertikální osa grafu má logaritmické měřítko). S postupným růstem preference ceny dochází k jejímu poklesu na úkor ostatních tří vlastností systému. Ve chvíli, kdy je nastavena váha $\omega_\Theta = 1$, dochází čistě k optimalizaci ceny bez ohledu na hodnoty ostatních členů. V logaritmickém grafu chybí právě cena pro tuto variantu, neboť ve výpočtu zde vychází malá záporná hodnota¹. Hodnoty ostatních tří členů v tomto případě skokově vzrostou.



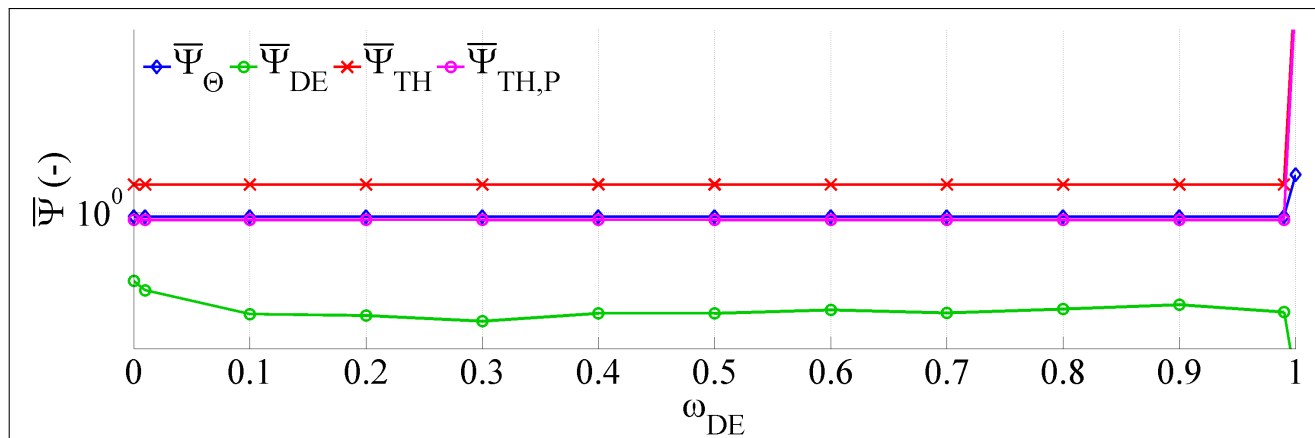
OBRÁZEK 5.1: Členy kriteriální funkce při změně preferencí ceny

Preference komfortu odložitelných spotřebičů

Tento případ popisuje obrázek 5.2. Na první pohled je zřejmé, že změna váhy ω_{DE} nemá na chování systému v tomto případě žádný podstatný vliv. To je

¹Záporná hodnota členu je v pořádku, svědčí pouze o tom, že heuristický normalizační algoritmus nevypočítal správně minimální hodnotu. V tomto případě se při $\omega_\Theta = 1$ systém dostane do stavu, kdy např. TCA spotřebiče nejsou spuštěny vůbec, na což algoritmus není navržen.

dáno příznivou kombinací časového průběhu ceny za energii a uživatelských preferencí odložitelných spotřebičů a dále tím, že tento člen není tak úzce spjat s ostatními uvažovanými členy. Při optimalizaci tedy není problém nakombinovat pro člen $\bar{\Psi}_{DE}$ optimální řešení. V extrémním případě $\omega_{DE} = 1$ dochází k váhování ostatních členů kritériální funkce hodnotou 0 (zejména členu pro cenu $\bar{\Psi}_{\Theta}$), mnoho pravidel modelu není uplatňováno a optimalizační proces generuje nekorektní výsledky.



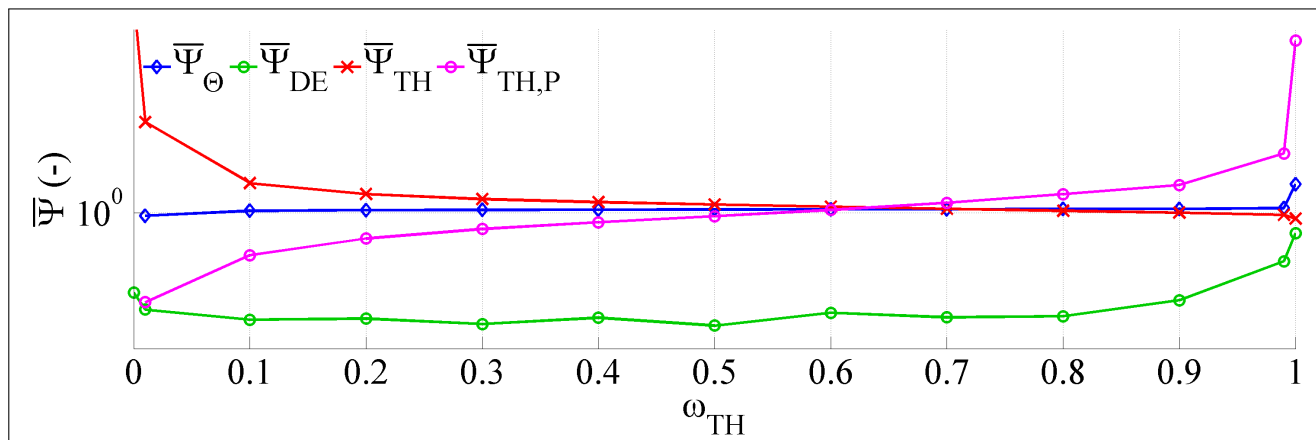
OBRÁZEK 5.2: Členy kritériální funkce při změně preferencí komfortu DE spotřebičů

Preference tepelného komfortu

Změna chování systému na základě změny váhy členu pro tepelný komfort ω_{TH} je uvedena na obrázku 5.3. Chování modelu dosahuje extrémů opět v případech $\omega_{TH} = 0$, a $\omega_{TH} = 1$. Pro první zmíněný nedochází opět k žádnému spouštění termostatem řízených spotřebičů – normalizovaný člen pro minimalizaci ceny $\bar{\Psi}_{\Theta}$ je roven 0, stejně tak jako člen pro minimalizaci akčního zásahu termostatem řízených spotřebičů $\bar{\Psi}_{TH,P}$ (to je logické vzhledem k tomu, že v kritériální funkci je definován jako suma rozdílů výkonů HVAC spotřebičů v sousedních časových slotech). S rostoucí váhou ω_{TH} lze pozorovat postupné zmenšování členu $\bar{\Psi}_{TH}$, tedy zlepšování kvality tepelného komfortu v budově. Pokud jsou však ostatní váhy potlačeny příliš ($\omega_{TH} > 0.9$), projevuje se to na velikosti ostatních členů – optimalizační algoritmus není nucen jejich velikost minimalizovat a systém se opět nechová korektně.

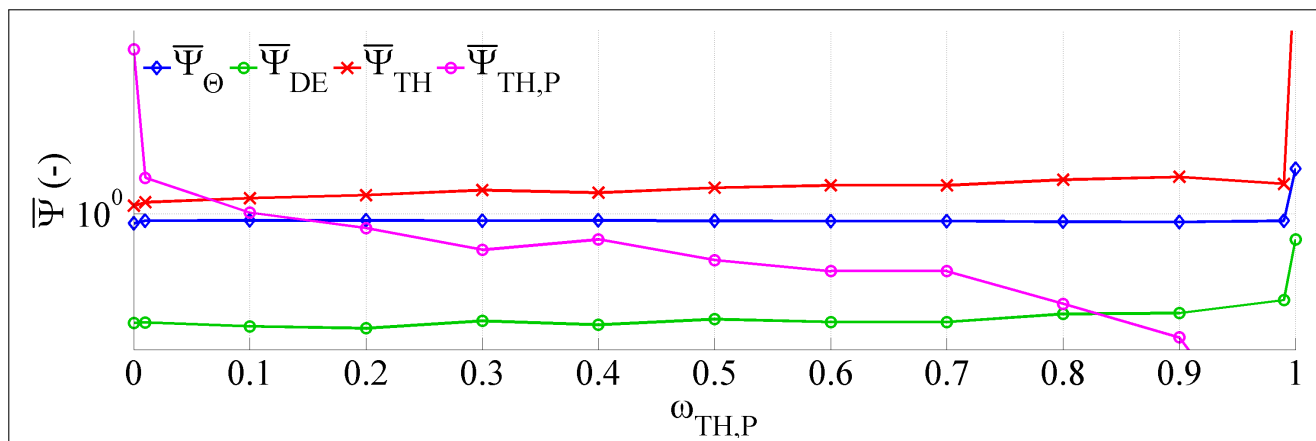
Preference redukce akčního zásahu TH spotřebičů

Průběh hodnot jednotlivých členů optimalizační funkce při různých hodnotách váhy $\omega_{TH,P}$ je uveden na obrázku 5.4. S rostoucí velikostí má hodnota této váhy



OBRÁZEK 5.3: Členy kriteriální funkce při změně preferencí TH spotřebičů

vliv na “zakulacování” časového průběhu akčního zásahu termostatem řízených spotřebičů. To se projevuje zejména poklesem tepelného komfortu, kdy systém v tomto konkrétním případě není schopen reagovat na ostře ohraničené změny *setpointů*, a v tomto případě rovněž mírným nárůstem ceny. V případě $\omega_{TH,P} = 0$ se člen $\bar{\Psi}_{TH,P}$ vůbec neuplatní a k žádnému tvarování akčního zásahu nedochází. V opačném případě – $\omega_{TH,P} = 1$ dojde opět k potlačení vah ostatních členů kriteriální funkce – projevuje se prudkým nárůstem jejich hodnot – systém opět přestává plnit svou funkci.



OBRÁZEK 5.4: Členy kriteriální funkce při změně preferencí omezení četnosti akčního zásahu TH spotřebičů

Uvedené případy ukázaly, jakým způsobem se mění chování systému při změně konstant váhujících jednotlivé členy kriteriální funkce. Ze studie uvedených průběhů vyplývá, že:

- Díky tomu, že jednotlivé členy optimalizační funkce jsou normalizovány za

pomocí hodnot získaných aplikací heuristického algoritmu, je možno kompletně ovlivnit chování systému tím, že se normalizované členy násobí váhovacími konstantami v rozmezí hodnot 0–1. Součet všech váhovacích konstant může být roven 1, není to však podmínkou. V případě, kdy by ale váhovací konstanty nastavoval přímo uživatel pomocí uživatelského rozhraní systému, uchovával by součet vah jednotlivých požadavků rovný 1 (či 100 %) v uživateli povědomí principu *quid pro quo*².

- Nastavení některé z vah na hodnotu 0 či 1 by v takovém případě znamenalo její úplné zanedbání či jednostrannou preferenci. Způsob definice optimalizačního problému však na tuto možnost není připraven a výsledky v takových případech nejsou použitelné. Takovému nastavení je tedy nutno předejít.

Závěr

Cílem této práce byl návrh univerzální metody optimálního plánování spotřeby elektrické energie v rozsahu chytrého domu. Validace a verifikace této metody byla realizována formou softwarové implementace. V práci byly uvažovány nejen domácí spotřebiče, ale i lokální zdroje elektrické energie. Tyto byly nejprve v závislosti na typickém způsobu jejich využívání a dalších vlastnostech rozděleny do pěti kategorií – zařízení s odložitelným a nepřerušitelným cyklem, zařízení s přerušitelným cyklem, termostatem řízené spotřebiče, akumulátory a lokální generátory z obnovitelných zdrojů. Pro každou kategorii byl následně navržen matematický model. V práci je částečně zohledněna i existence neřiditelných spotřebičů. Navržená metoda umožňuje koncovému zákazníkovi na základě principu *demand response* optimalizovat cenu zaplacenou za spotřebovanou elektrickou energii.

Práce proto předpokládá existenci *energy managera*, tedy zařízení zabezpečujícího koordinaci spouštění jednotlivých spotřebičů v rámci inteligentního domu na základě řady vstupních informací včetně informací získaných z infrastruktury distributora. *Energy manager* je komplexní zařízení, které udržuje matematický model vzniklý syntézou modelů jednotlivých domácích spotřebičů a implementuje metodu zabezpečující nalezení řešení komplexního optimalizačního problému. Základním účelem tohoto zařízení je zajištění cenové úspory pro koncového uživatele při současném zachování komfortu používání spotřebičů, na který je uživatel zvyklý. Významným rysem je rovněž schopnost respektovat technická omezení

²Něco za něco (lat.)

jednotlivých zařízení. V rámci této práce je řešena část výše definované úlohy, která se týká optimalizace běhu spotřebičů v rozsahu jednoho domu.

Řešení optimalizační úlohy spočívá v minimalizaci kvadratické kritériální funkce tvořené váženým součtem dílčích funkcí reprezentujících jednotlivé požadavky s ohledem na lineární omezení, definované pro jednotlivé spotřebiče a pro preference uživatele (jedná se tedy o problém smíšeného celočíselného kvadratického programování). Vzhledem k tomu, že požadavky jsou často navzájem protichůdné, patří řešení optimalizační úlohy do skupiny vícekritériálních kombinatorických problémů. Změnou hodnot váhovacích konstant jednotlivých částí kritériální funkce lze dosáhnout zvýraznění či naopak potlačení určitého aspektu chování.

Podstatným rysem této práce je pak rozšíření základní metody, které umožní, aby takové nastavení mohl snadno realizovat i koncový uživatel prostřednictvím jednoduchého výběru jedné z nabízených strategií. Toto rozšíření vyžadovalo provést modifikaci kritériální funkce pomocí normalizace jednotlivých členů, přičemž normalizační koeficienty byly získány heuristickým algoritmem. Modifikovaná kritériální funkce doplněná o omezující podmínky již plně reprezentuje hledanou optimalizační úlohu. Jejím řešením je plán využití jednotlivých zařízení, který je následně použit pro řízení systému v průběhu jednoho časového slotu. Po jeho uplynutí se výpočet optimalizační úlohy opakuje s novými vstupními podmínkami. Jedná se tedy o prediktivní řízení na základě modelu na klouzavém horizontu. Heuristická část navržená v této práci umožňuje dodržení uživatelem nastavené strategie jednak při běhu systému, jednak při libovolné změně vstupních parametrů a činí tak celou prezentovanou metodu univerzální.

Verifikace navržené metody rozšířené o heuristický algoritmus byla realizována s využitím dvojice univerzálních softwarových nástrojů - program *Matlab* byl využit pro generování vstupních parametrů a prezentaci výsledků a nástroj *CPLEX Optimization Studio* zabezpečoval řešení samotné optimalizační úlohy. V rámci práce byl rovněž vytvořen softwarový simulační nástroj, pomocí kterého je možno modelovat chování skupiny spotřebičů s odložitelným cyklem na klouzavém horizontu. Tento nástroj byl realizován jako příspěvek do projektu FP7 - ARTEMIS (333020). S popsányými softwarovými prostředky bylo následně provedeno několik případových studií sloužících k ověření žádaných vlastností systému.

V rámci těchto studií byly podrobně analyzovány vlastnosti modelů jednotlivých kategorií spotřebičů. Vzhledem k tomu, že největší podíl na spotřebě domácností mají systémy vytápění a klimatizace, jejichž chování je značně komplexní, jsou těmto systémům plně věnovány první čtyři případové studie. V průběhu těchto studií jsou popsány jednotlivé aspekty řízení modelového systému vytápění budovy, počínaje maximalizací tepelného komfortu, přes možnosti cenové úspory,

formulaci technických omezení, až po aplikaci hierarchického řízení. Následující případová studie pak popisuje změnu chování systému v případě, kdy dojde k připojení akumulátoru elektromobilu.

Svým dopadem je však nejdůležitější další – šestá – případová studie. V té je realizováno jednak ověření funkce kompletního modelu systému, jednak ověření heuristického algoritmu navrženého v této práci. Z výsledků studie je jasně patrné, že normalizace členů kriteriální funkce pomocí tohoto algoritmu poskytuje možnost jednoduchou změnou váhy příslušného členu podstatně ovlivnit skutečné chování systému.

Další případové studie se pak zabývají změnou chování systému v případě, že termodynamický model budovy nebude přesně odpovídat reálnému systému, respektive problémem praktického nalezení řešení optimalizační úlohy v požadovaném čase.

V průběhu celé práce je kladen důraz právě na možnost budoucí implementace navržené metody do reálného zařízení. Z kapitoly 8.3 této práce vyplývá, že pro implementaci by bylo nutné vyřešit celou řadu problémů, avšak zde popisovaná metoda koordinace spotřebičů na základě jejich modelů spolu s rozšířením o heuristický algoritmus mohou být použity bez zásadních modifikací. Mnoho existujících studií, které se zaměřují na podobnou problematiku (viz kapitola 6.2 práce), otázku možností praktické implementace nezvažuje.

V této práci byla tedy navržena, implementována a na případových studiích validována metoda optimálního plánování spotřeby elektrické energie pro využití v rezidenční oblasti. Tato metoda kombinuje optimalizaci smíšeného kvadratického problému a heuristický algoritmus. Implementací uvedené metody do zařízení koordinujícího běh spotřebičů v rámci systému chytrého domu lze dosáhnout naplnění principů *demand response*. Systém tedy bude připraven plynule reagovat na měnící se vstupní podmínky změnou aktuální spotřeby elektrické energie. Z výsledků případových studií vyplývá, že navržené řešení splňuje podmínky, které na ně byly v rámci práce kladeny.

Abstrakt

S klesajícími zásobami fosilních paliv a zvyšujícím se tlakem na využívání energie vyrobené z obnovitelných zdrojů roste potřeba integrace těchto těžko predikovatelných zdrojů do elektrizační soustavy. Současně dochází ke zvyšování ceny energie, což zvyšuje ochotu spotřebitelů měnit své chování s cílem omezit výdaje, či alespoň zachovat je v akceptovatelné výši. Jednou z mála možností optimalizace nákladů na energie na straně spotřebitele je využití principu *demand response*. Tento princip spotřebiteli umožňuje na základě nezbytných informací optimalizovat spotřebu elektrické energie tak, aby ji minimalizoval v době, kdy je cena energie vysoká. Vzhledem k neustále se měnícím podmínkám v elektrizační soustavě a tím i měnícím se požadavkům je nutné, aby optimalizace byla realizována automaticky, bez nutnosti zásahů uživatele. Dizertační práce se věnuje problematice koordinace chodu spotřebičů a dalších elektrických zařízení v rámci chytrého domu za účelem dosažení úspory ceny zaplacené za elektrickou energii při zachování požadované úrovně komfortu využití elektrických spotřebičů.

V této práci je proto navržena metoda, která po implementaci do řídicího členu – *energy managera* – zabezpečí dosažení optimálního využívání spotřebičů a dalších zařízení v rámci chytrého domu. Vzhledem k tomu, že chování optimální z pohledu *demand response* nebývá v souladu s požadavky uživatele na komfortní využití spotřebičů, navržená metoda umožňuje dosáhnout kompromisu volbou příslušné strategie. Pro účely optimalizace je v práci navrženo pět univerzálních modelů, které umožňují popsat zařízení běžně se vyskytující v domácnostech a obytných domech, a to jak spotřebiče, tak i lokální zdroje elektrické energie.

Těžištěm navržené metody je formulace a následná optimalizace smíšeného kvadratického problému (MIQP). Výsledkem optimalizační úlohy je plán využití jednotlivých zařízení, který zohledňuje cenu elektrické energie, pracovní cyklus zařízení, požadavky uživatele, systémová omezení a další vstupní informace.

V práci je dále realizováno rozšíření výše uvedené metody, které zajišťuje dodržení nastavené strategie i při výrazné změně vstupních podmínek. Díky tomuto chování se metoda stává použitelnou pro využití v reálném řídicím členu.

Literatura

- Bemporad, A. and Morari, M. (1999). Robust model predictive control: A survey. In Garulli, A. and Tesi, A., editors, *Robustness in identification and control*, volume 245 of *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pages 207–226. Springer London.
- Braithwait, S. D. (2005). Real-time pricing and demand response can work within limits. *Natural Gas & Electricity*, 21(11):1–31.
- Commission, E. (2008). Memo on the renewable energy and climate change package. dostupné online (http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-08-33_en.htm). citováno 12. 11. 2014.
- Deng, R., Yang, Z., Chow, M., and Chen, J. (2015). A survey on demand response in smart grids: Mathematical models and approaches. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 11(3):570–582.
- Havlena, V. and Štecha, J. (1999). *Moderní teorie řízení*. Ediční středisko ČVUT.
- Holland, S. (2008). Is real-time pricing green? the environmental impacts of electricity demand variance. *Rev. Econ. Stat.*, vol. 90, no. 3:550–561.
- IBM (2014). Ibm ilog cplex optimization studio. dostupné online (<http://www-03.ibm.com/software/products/en/ibmilogcpleoptistud>). citováno 12. 12. 2014.
- Martinez, M. and Russell, F. (2004). Smart thermostats getting results at sce. *Utility Automation & Engineering*.
- Mohsenian-Rad, A. H. and Leon-Garcia, A. (2010). Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1(2):120–133.
- Platform, E. T. (2015). Smart grids. dostupné online (<http://www.smartgrids.eu/>). citováno 17. 5. 2015.
- Richalet, J., Rault, A., Testud, J. L., and Papon, J. (1978). Paper: Model predictive heuristic control. *Automatica*, 14(5):413–428.
- Soares, J., Canizes, B., Lobo, C., Vale, Z., and Morais, H. (2012). Electric vehicle scenario simulator tool for smart grid operators. *Energies*, 5(6):1881–1899.

Životopis autora

Jméno: Ing. Václav Kaczmarczyk
Datum narození: 27. 6. 1984
Adresa: Konradova 2212/11, 62800 Brno, Česká republika

Dosažené vzdělání

- od 2008 **Doktorský studijní program Elektrotechnika a komunikační technologie (prezenční/kombinovaný)** (Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické, Brno, Česká republika)
- 2008 **Magisterský studijní obor Kybernetika, automatizace a měření** (Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické, Brno, Česká republika)
- 2006 **Bakalářský studijní obor Automatizace a měření** (Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické, Brno, Česká republika)

Zahraniční zkušenosti

- 2009 Department of Computer Science, Aalborg University, Denmark (stáž, 5 měsíců)

Vybrané publikace

KACZMARCZYK, V.; BRADÁČ, Z.; FIEDLER, P. Optimal Scheduling of Domestic Appliances via MILP. ENERGIES, 2015, vol. 8, no. 1, p. 217-232. ISSN: 1996- 1073. IF: 1,602 (2013); 1,865 (2011); 1,130 (2010). URL: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/1/217>.

KACZMARCZYK, V.; FIEDLER, P.; BRADAC, Z.; FRANEK, L.; PASEK, J.: Simulator for optimal scheduling of domestic appliances. Programmable devices and Embedded systems, 2015, vol. 13, p. 1-6. ISSN: 1474- 6670.

KACZMARCZYK, V.: BEMSimulator; Building Energy Manager Simulator. SE-2.134, Vysoké učení technické v Brně, Technická 12, Brno. URL: <http://www.ceitec.cz/accus/bemsimulator/>. (software)

KACZMARCZYK, V.; FIEDLER, P.; BRADÁČ, Z.; ŠÍR, M. Communication Model of Home Area Network Devices. In Recent Researchers in Environmental & Geological Sciences. Kos, Greece: WSEAS press, 2012. p. 115-120. ISBN: 978-1-61804-110- 4.

HAVLIK, J. et al (2015). Project accus deliverable 2.10: System functionalities and operational logic. dostupné online (<http://projectaccus.eu/>).

BILBAO, S. et al (2015). Project accus deliverable 4.19: Integration platform: Fundamental algorithms and evaluation. dostupné online (<http://projectaccus.eu/>).

BRADÁČ, Z.; FIEDLER, P.; KACZMARCZYK, V.; ŠÍR, M. Object Model of Home Area Network Devices. In Recent Researchers in Environmental & Geological Sciences. Kos, Greece: WSEAS Press, 2012. p. 121-126. ISBN: 978-1-61804-110- 4.

KACZMARCZYK, V.; FIEDLER, P.; ŠTOHL, R.; BRADÁČ, Z. Electric vehicles charger as a part of home area network. In Proceedings of 11th IFAC/ IEEE International Conference on Programmable Devices and Embedded Systems. Brno: 2012. p. 149-154. ISBN: 978-3-902823-21- 2.

KACZMARCZYK, V.; ŠTOHL, R.; FIEDLER, P.; BRADÁČ, Z. Home Coordinator for Smart Grids, Basic theory and approaches. In Proceedings of the 2012 13th International Carpathian Control Conference (ICCC). 1. Košice, Slovakia: ICC, 2012. p. 254-258. ISBN: 978-1-4577-1866- 3.

Účast v projektech

- od 2015 TA04021653, Automatický dozorce, řešitel: doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.
- od 2013 ARTEMIS 333020, Adaptive Cooperative Control in Urban (sub) Systems (ACCUS), řešitel: prof. Ing. Pavel Václavek, Ph.D.
- od 2012 TA02010864, Výzkum a vývoj filtroventilační jednotky pro ochranu osob před chemickými látkami, prachem a biologickou nákazou u prostředků osobní ochrany, řešitel: doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.
- 2011-2014 ARTEMIS 269374, Internet of Energy for Electric Mobility, řešitel: doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
- 2010-2013 FR-TI1/528, Komplexní a inteligentní správa bytových domů (KAIS), řešitel: doc. Ing. Zdeněk Bradáč, Ph.D.
- 2012 FRVŠ 2493/G1, Laboratorní modely pro výuku programování PLC, řešitel: Ing. Michal Šír.
- 2011 FRVŠ 1739/G1, Řídicí systém pro laboratorní model destilační kolony, řešitel: Ing. Václav Kaczmarczyk.
- 2009 FRVŠ 1604/G1, Zkvalitnění laboratorní výuky předmětu BPGA, řešitel: Ing. Marek Kváš.