

Ing. Jan ŠAFRÁNEK <sup>1),2)</sup>  
 doc. Ing. Tomáš MATUŠKA, Ph.D. <sup>1),3)</sup>

<sup>1)</sup> ČVUT v Praze, Fakulta strojní,  
 Ústav techniky prostředí

<sup>2)</sup> Feramat Energies, s.r.o.

<sup>3)</sup> ČVUT v Praze, Univerzitní  
 centrum energeticky efektivních  
 budov

# Systém pro autonomní výrobu obnovitelné elektřiny a tepla

## Část 2: Simulace a experiment

### System for Autonomous Production of Renewable Electricity and Heat Part 2: Simulation and Experiment

Recenzent  
 Ing. Jan Široký, Ph.D.

Druhá část příspěvku se zabývá simulacemi a reálnými experimenty s regulací pro provoz autonomního systému na výrobu elektřiny a tepla. Systém je tvořen kogenerační ORC jednotkou Wave, fotovoltaickými panely, bateriovým úložištěm a virtuálním zásobníkem tepla. Celý systém je umístěn v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. Cílem experimentu je dodržet dodávky tepla, elektřiny a minimalizovat provozní náklady s co nejvyšší účinností celého systému.

**Klíčová slova:** prediktivní regulace, matematické modelování, autonomní systémy, kogenerace, ORC, MPC

The second part of the contribution deals with simulations and real experiments concerning the operation control of an autonomous power and heat generation system. The system consists of a Wave ORC cogeneration unit, photovoltaic panels, battery storage and a virtual heat storage. The whole system is located at the University Centre for Energy Efficient Buildings of the Czech Technical University in Prague. The aim of the experiment is to maintain the heat and electricity supply and minimize the operating costs with the highest possible efficiency of the whole system.

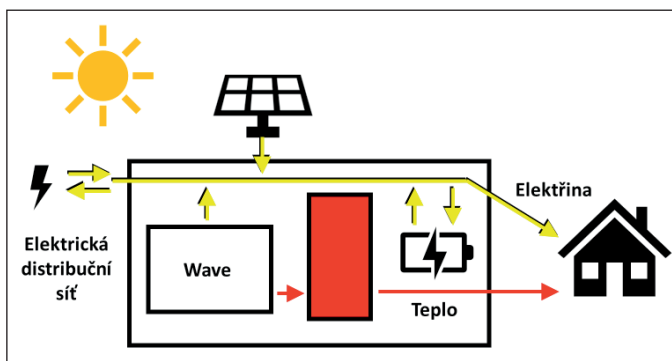
**Keywords:** predictive control, mathematical modelling, autonomous systems, cogeneration, ORC, MPC

## ÚVOD

Součástí každé prediktivní regulace je vhodná validace detailními simulacemi a vhodným experimentálním provozem. V experimentu řešená prediktivní regulace navazuje na systém z první části příspěvku, kde byl systém matematicky popsán. Je tvořen kogenerační ORC jednotkou Wave, která je hlavním zdrojem tepla a elektrické energie, a dále fotovoltaickými panely, bateriovým úložištěm a virtuálním akumulátorem tepla. Systém je připojen k distribuční síti, je umožněn nákup i prodej elektrické energie. Cílem experimentu je dodržet dodávky tepla a elektřiny s co nejvyšší účinností celého systému.

## SPECIFIKA SYSTÉMU

Největším úskalím regulace kogenerační ORC jednotky Wave je velké dopravní zpoždění při zapnutí a vypnutí jednotky, způsobené velkou setrvačností výměníků tepla, které se promítne do produkce elektřiny. Do-



Obr. 1 Schéma zkoumaného systému pro autonomní produkci obnovitelné elektřiny a tepla

Fig. 1 Schematic diagram of the investigated system for autonomous production of renewable electricity and heat

pravní zpoždění je velkou výzvou pro regulaci systému, proto je potřeba plánovat provoz jednotky Wave s dostatečným předstihem, aby nedošlo k narušení dodávek tepla a elektřiny. Při autonomním provozu je možné dostat se při nevhodném zásahu regulace do stavu, kdy bateriové úložiště nebude mít dostatek energie pro zapnutí jednotky Wave.

Problémem při tvorbě matematického modelu je zapnutí a vypnutí jednotky Wave. Konkrétně se jedná o průběhy výroby tepla a výroby elektrické energie. Při sestavování průběhu je třeba počítat s krokem daného modelu. Je nutné, aby docházelo ke změně trendu průběhu pouze v násobcích kroků jednotlivých modelů (model long = 15 min, model short = 1 min). Průběhy jsou matematicky popsány funkcemi a implementovány do matematických modelů.

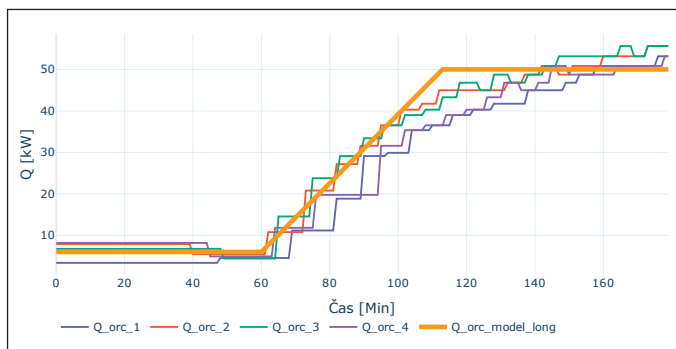
Jedním z cílů regulace je provozovat kogenerační jednotku Wave s co nejvyšší účinností. Z tohoto důvodu je vhodné minimalizovat počet zapnutí i vypnutí, tj. minimalizovat prodlevy při zapnutí a vypnutí a udržovat jednotku v co nejdelším kontinuálním běhu.

### Zapnutí jednotky Wave

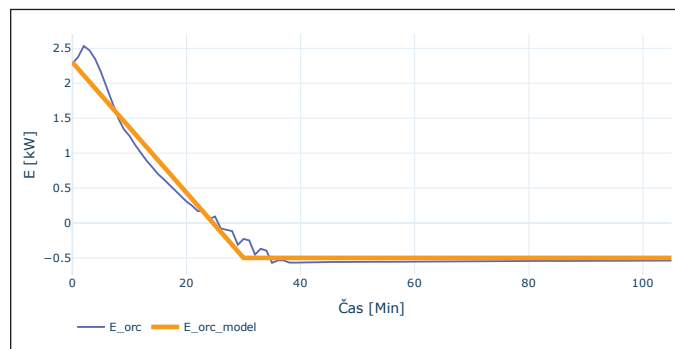
Prvním úskalím matematického modelu je zapnutí jednotky Wave neboli náběhový průběh vyrobeného tepla a elektřiny (spotřebované elektřiny). Pro zapnutí jednotky Wave je typické, že tepelná energie je produkována až přibližně hodinu po zapnutí jednotky.

Průběh užitečného tepelného výkonu jednotky Wave je zobrazen na obr. 2. Modelový průběh (oranžově) zapnutí jednotky byl vytvořen na základě čtyř měření reálných zapnutí. Modelový průběh je po částech lineární funkce, kterou lze průběh jednotky Wave aproximovat. Takto zjednodušený modelový průběh může být použit v matematickém modelu, aniž by způsobil výpočetní nestabilitu.

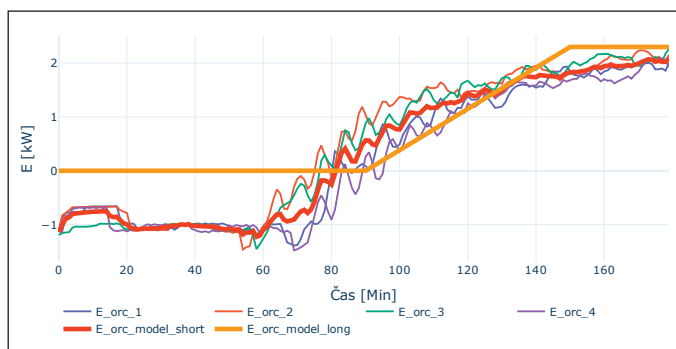
S bilancí tepelného výkonu pracuje pouze model long, tudíž průběh vypnutí související s tepelnou částí modelu není třeba pro model short vytvářet.



Obr. 2 Průběh zapnutí tepelného výkonu jednotky Wave  
Fig. 2 Heat generation switch-on course of the Wave unit



Obr. 5 Průběh vypnutí elektrického výkonu jednotky Wave  
Fig. 5 Electrical power generation switch-off course of the Wave unit



Obr. 3 Průběh zapnutí elektrického výkonu jednotky Wave  
Fig. 3 Electrical power generation switch-on course of the Wave unit

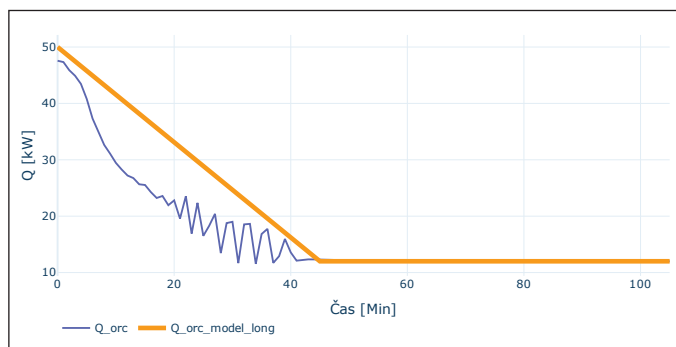
Přibližně podobné dopravní zpoždění vykazuje výroba elektřiny, viz obr. 3. Záporné hodnoty elektrického výkonu reflektují vlastní spotřebu jednotky Wave.

Pro model long byl vytvořen zjednodušený průměrný průběh (oranžově), který zanedbává vlastní spotřebu při zapnutí jednotky. Toto zjednodušení vede k efektivnějšímu výpočtu optimalizace.

### Vypnutí jednotky Wave

Z důvodu pomalého vypínání jednotky je třeba uvažovat s průběhem vypnutí, jednotka totiž po deaktivaci ještě desítky minut produkuje elektřinu a dodává teplo. Množství tepla a elektřiny je nezanedbatelné a je potřeba s ním při celkové bilanci v modelech počítat.

Na obr. 4 a 5 jsou zobrazeny skutečné (modře) a modelové (oranžově) průběhy vypnutí jednotky Wave. Podobně jako průběh zapnutí je modelový průběh vypnutí lineární funkcí. Po 120 minutách je uvažován nulový tepelný i elektrický výkon jednotky.



Obr. 4 Průběh vypnutí tepelného výkonu jednotky Wave  
Fig. 4 Heat generation switch-off course of the Wave unit

Záporná výroba elektřiny na obr. 5 neboli vlastní spotřeba je způsobena dochlazením jednotky po jejím vypnutí. Kmitání výkonů je způsobeno cyklickým spínáním čerpadel a ventilátorů.

### Popis implementace software

Optimalizace byla realizována na průmyslovém počítači (IPC) Beckhoff C6015 a implementována v jazyce Python na frameworku SCIP [2]. Komunikace se zařízeními probíhala s využitím protokolu ModbusTCP a provozní data se ukládala lokálně do databáze InfluxDB [3].

Tab. 1 Popis proměnných

Tab. 1 Description of the variables

| Označení    | Popis  | Jednotka |
|-------------|--|----------|
| $Q_{load}$  | Predikovaná hodnota tepelného výkonu             | kW       |
| $E_{load}$  | Predikovaná hodnota elektrického odběru          | kW       |
| $Q_{ORC}$   | Tepelný výkon jednotky Wave                      | kW       |
| $H_{state}$ | Stav nabití akumulátoru tepla                    | kWh      |
| $E_{ORC}$   | Elektrický výkon jednotky Wave                   | kW       |
| $E_{PV}$    | Predikovaná hodnota elektrického výkonu PV       | kW       |
| $E_{sell}$  | Elektrický výkon prodáváný do sítě               | kW       |
| $E_{purch}$ | Elektrický výkon nakupovaný ze sítě              | kW       |
| $B_{state}$ | Stav nabití baterie                              | kWh      |
| $B_{chrg}$  | Elektrický výkon dodávaný do baterie (AC strana) | kW       |
| $B_{dchrg}$ | Elektrický výkon odebíraný z baterie (AC strana) | kW       |

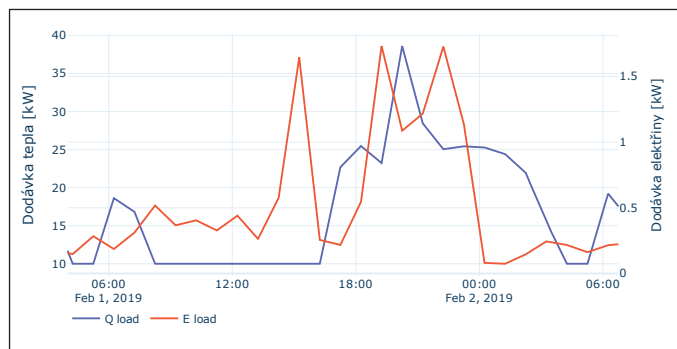
### PROVOZ S PŘIPOJENÍM K DISTRIBUČNÍ SÍTI

Provoz s připojením k distribuční síti (DS) umožňuje nákup a prodej elektřiny.

#### Simulace

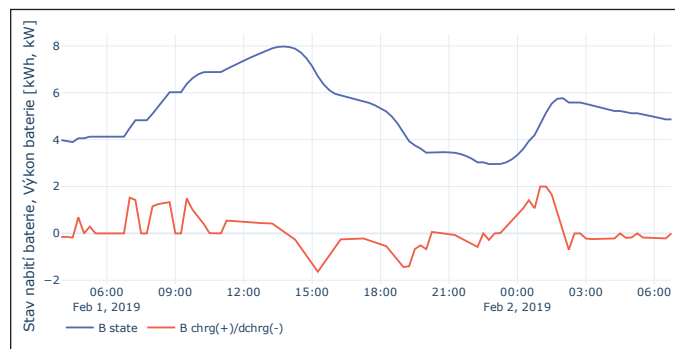
Model byl validován simulacemi, na kterých byl testován vhodný provoz jednotky Wave. Cílem optimalizace je minimalizovat náklady a provozovat jednotku s co nejvyšší účinností. U jednotky je kladen důraz na co nejdelší kontinuální provoz, z důvodu velké energetické náročnosti zapnutí a následného vypnutí.

Na obr. 7 je zobrazena bilance tepelné části modelu. Jednotka byla spuštěna od počátku simulace (modře), protože akumulátor tepla (zeleně) byl téměř vybitý a bylo nutné pokrýt spotřebu tepla (červeně). Jednotka



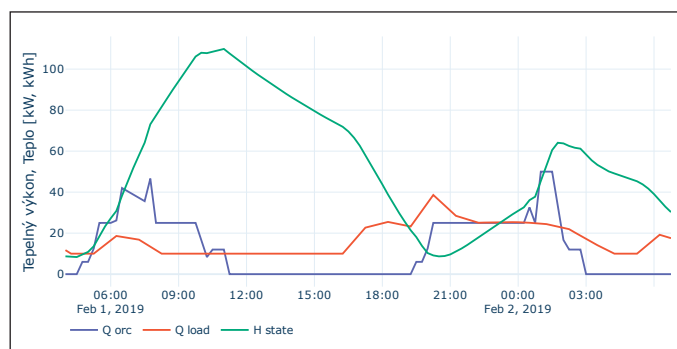
Obr. 6 Profil dodávky tepla a elektřiny virtuální budovy během simulace s připojením k distribuční síti

Fig. 6 Heat and electricity supply profile of the virtual building during the simulation with connection to the distribution network



Obr. 9 Stav nabití bateriového úložiště během simulace s připojením k distribuční síti

Fig. 9 Battery storage state of charge during the simulation with connection to the distribution network



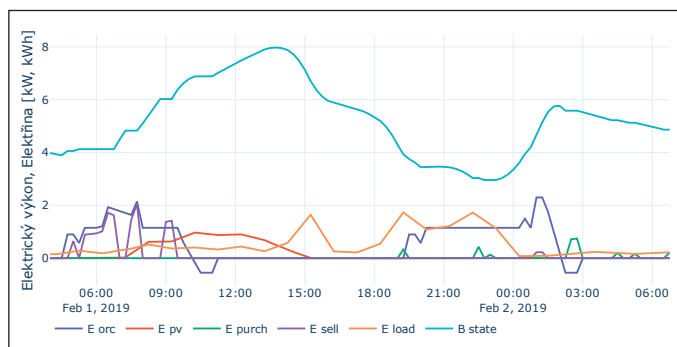
Obr. 7 Simulace bilance tepla s připojením k distribuční síti

Fig. 7 Heat balance simulation with connection to the distribution network

běžela i v době, kdy spotřeba tepla byla malá, ale bylo nezbytné nabít akumulátor tepla pro jeho využití při večerní odběrové špičce. Okolo 11. hodiny došlo k nabití akumulátoru tepla. Kolem 16. hodiny dochází k nárůstu spotřeby tepla a tato potřeba je pokryta zcela z akumulátoru tepla, aniž by bylo nutné jednotku spustit. Jednotka byla spuštěna až po 19. hodině, kdy už byl akumulátor tepla téměř vybitý.

Průběh výroby elektřiny jednotky Wave na obr. 8 (tmavě modře) koresponduje s výrobou tepla. K nabití bateriového úložiště (světle modře) dochází později (kolem 15. hodiny) než nabití akumulátoru tepla, roli zde hraje produkce elektrické energie z fotovoltaických panelů (červeně) a také nezanedbatelná spotřeba elektřiny v odpoledních hodinách. Nákup a prodej elektřiny byl minimalizován.

Z výsledku simulací je patrné, že provoz jednotky Wave probíhal správně a neobjevovalo se cyklické zapínání a vypínání jednotky. Díky tomu byl



Obr. 8 Simulace bilance elektřiny s připojením k distribuční síti

Fig. 8 Electricity balance simulation with connection to the distribution network

nákup a prodej elektřiny minimální, bateriové úložiště a akumulátor tepla byly provozovány efektivně a nedocházelo k úplnému vybití.

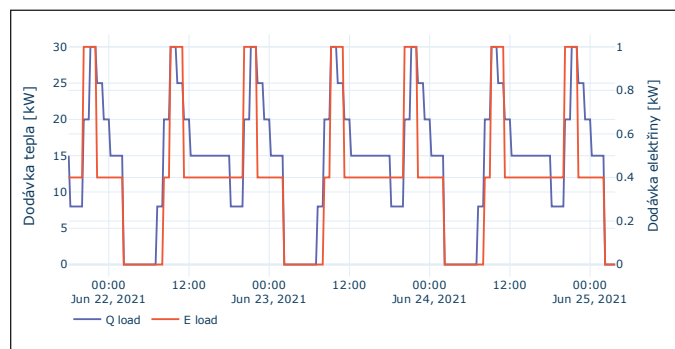
### Experiment

Během léta 2021 bylo provedeno několik experimentů na reálném zařízení, které bylo umístěno na pozemku Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (UCEEB) v Buštěhradu. Experimenty byly zaměřeny na provoz systému s napojením na elektrickou síť. Cílem experimentů bylo ověření výsledků ze simulací.

Profily odběru tepla a elektrické energie zobrazené na obr. 10 reprezentovaly odběr virtuální budovy se dvěma odběrovými špičkami. Profily byly velmi zjednodušené a byly vytvořeny s ohledem na technické možnosti jednotky Wave. V této fázi experimentu nebyl kladen důraz na realitu odběrových diagramů, ale na jejich použitelnost v matematickém modelu. Poměr mezi potřebou tepla a elektrickou energií je nerealistický, jelikož byly profily vytvořeny s potenciálním využitím v další fázi při experimentu s ostrovním režimem.

Výsledek experimentu je zobrazen na obr. 11 až 13. Na obr. 11 je zobrazena bilance tepelné části systému. Jednotka (modře) byla spuštěna na začátku večerní špičky spotřeby tepla (červeně) a zároveň v době nízké kapacity akumulátoru tepla (zeleně). Jednotka kontinuálně běžela okolo 30 až 40 hodin. Vypnutí jednotky bylo naplánováno v době nabití akumulátoru tepla a nejnižší spotřeby tepla v intervalu. Regulace systému z pohledu tepelné bilance odpovídá simulačním výsledkům.

Na obr. 12 je zobrazena bilance elektrické části systému. Produkce elektřiny jednotkou Wave (modře) zobrazuje součet elektrického výko-

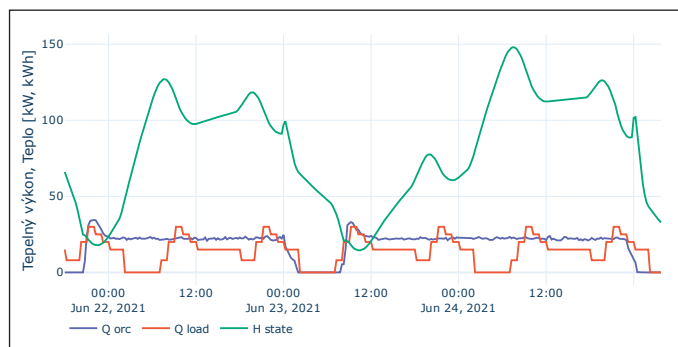


Obr. 10 Profil dodávky tepla a elektřiny virtuální budovy v reálném provozu s připojením k distribuční síti

Fig. 10 Heat and electricity supply profile of the virtual building during the real operation with connection to the distribution network

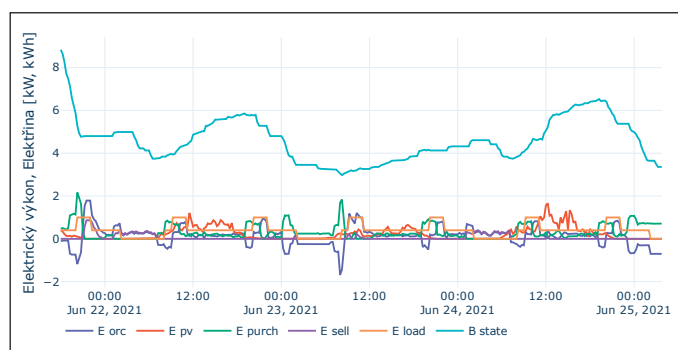
nu na generátoru a vlastní spotřeby jednotky, z tohoto důvodu nabývá vysokou zápornou hodnotu v době zapnutí jednotky. Záporné hodnoty při kontinuálním běhu jsou způsobeny nestabilním chodem jednotky. Regulace vyrovnává tyto nepřesnosti modelu a zařízení vhodným provozem bateriového úložiště a nákupem elektřiny ze sítě.

Během tří denního experimentu došlo dvakrát k zapnutí jednotky a její kontinuální provoz byl okolo 30 až 40 hodin, současně nedocházelo k cyklickému zapínání a vypínání jednotky. Experimentem se potvrdily simulační výsledky, kdy byl provoz bateriového úložiště optimální, elektřina z baterií byla maximálně využita v době největšího odběru elektřiny a baterie nebyly nikdy vybity pod bezpečnou hranici danou výrobcem. Balance elektřiny nebyla optimální a docházelo k většímu



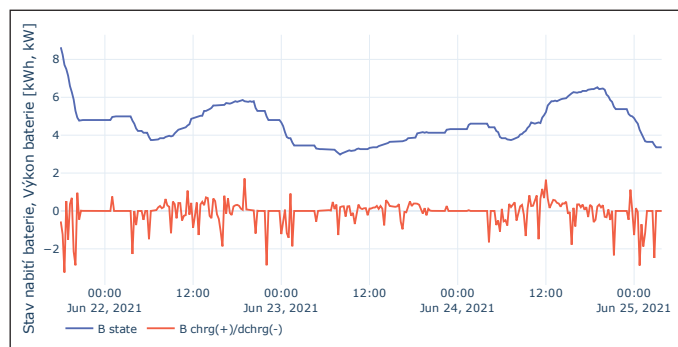
Obr. 11 Balance tepla během reálného experimentu s připojením k distribuční síti

Fig. 11 Heat balance during the real experiment with connection to the distribution network



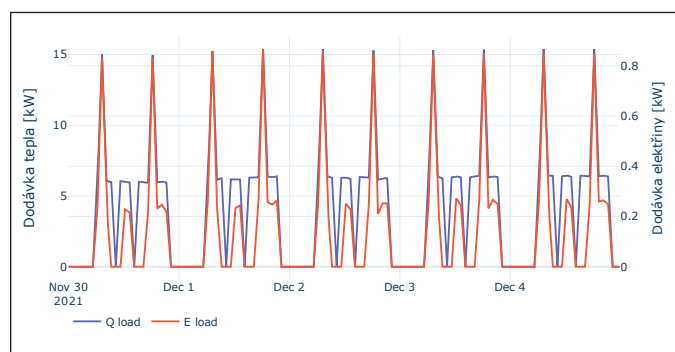
Obr. 12 Balance elektřiny během reálného experimentu s připojením k distribuční síti

Fig. 12 Electricity balance during the real experiment with connection to the distribution network



Obr. 13 Stav nabití bateriového úložiště během reálného experimentu s připojením k distribuční síti

Fig. 13 Battery storage state of charge during the real experiment with connection to the distribution network



Obr. 14 Profil dodávky tepla a elektřiny virtuální budovy během simulace v ostrovním režimu

Fig. 14 Heat and electricity supply profile of the virtual building during the simulation in island mode operation

nákupu elektřiny ze sítě, než plánovala regulace. Chyba byla způsobena nestabilním chodem jednotky Wave, z důvodu nedodržení požadovaného výkonu. Tato chyba by mohla způsobit komplikace při ostrovním režimu systému a je potřeba pracovat s větší rezervou bateriového úložiště, aby nedošlo k úplnému vybití baterie – to znamená zmenšit pracovní rozsah bateriového úložiště v optimalizaci, aby při případném vybití pod minimální kapacitu zbyla rezerva. Akumulátor tepla byl využíván efektivně, jeho provoz byl optimální a zároveň nedošlo k úplnému vybití akumulátoru.

## OSTROVNÍ REŽIM

Ostrovní režim (off-grid) je provoz, během kterého je systém odpojen od distribuční sítě a tím pádem není možný nákup ani prodej elektřiny. To může simulovat provoz v odlehle oblasti bez napojení na DS nebo výpadek DS.

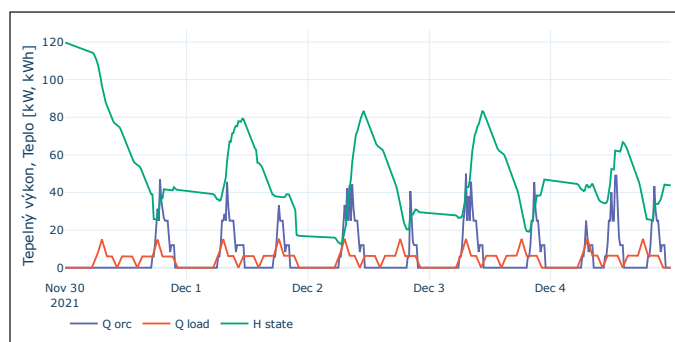
### Simulace

Model byl validován simulacemi ostrovního režimu. Cílem optimalizace bylo dodržet dodávku elektřiny a provozovat jednotku Wave s co nejvyšší účinností.

Na obr. 15 je zobrazena bilance tepelné části modelu. Ke spuštění jednotky (modře) dochází jednak pravidelně podle odběrových špiček spotřeby tepla (červeně) a dále, pokud je akumulátor tepla (zeleně) vybitý.

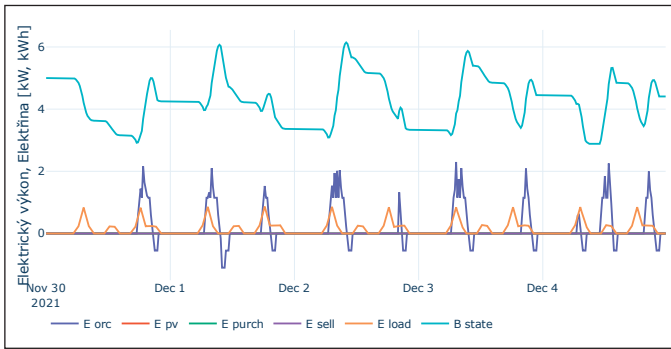
Průběh výroby elektřiny jednotky Wave na obr. 16 (tmavě modře) koresponduje s výrobou tepla. Stav bateriového úložiště (světle modře) se po celou dobu simulace pohybuje v přijatelném provozním pásmu.

Z výsledku simulace je patrné, že systém s regulací by mohl být schopný ostrého provozu v ostrovním režimu.

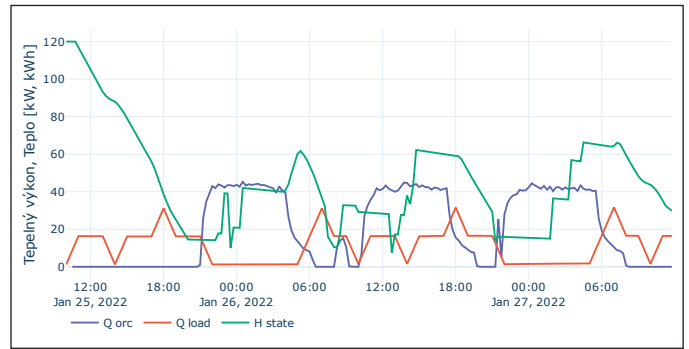


Obr. 15 Simulace bilance tepla v ostrovním režimu

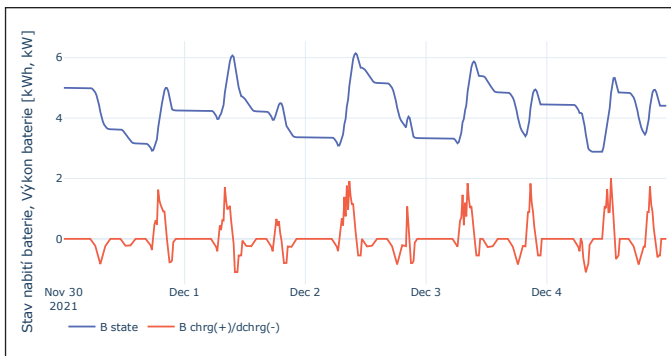
Fig. 15 Heat balance simulation in island mode operation



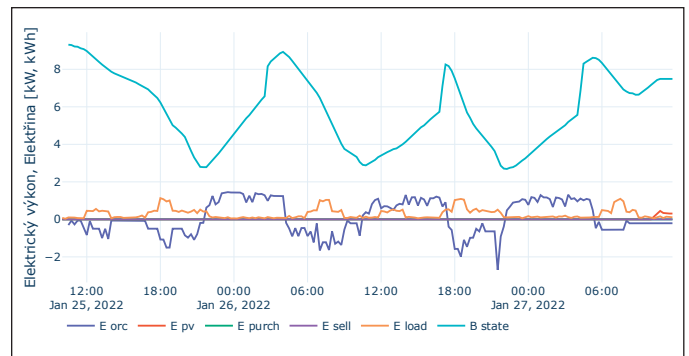
Obr. 16 Simulace bilance elektřiny v ostrovním režimu  
Fig. 16 Electricity balance simulation in island mode operation



Obr. 19 Bilance tepla během reálného experimentu v ostrovním režimu  
Fig. 19 Heat balance during the real experiment in island mode operation



Obr. 17 Stav nabití bateriového úložiště během simulace v ostrovním režimu  
Fig. 17 Battery storage state of charge during the simulation in island mode operation



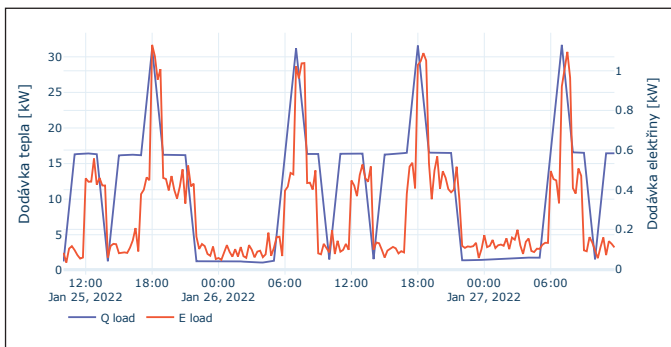
Obr. 20 Bilance elektřiny během reálného experimentu v ostrovním režimu  
Fig. 20 Electricity balance during the real experiment in island mode operation

**Experiment v reálném provozu**

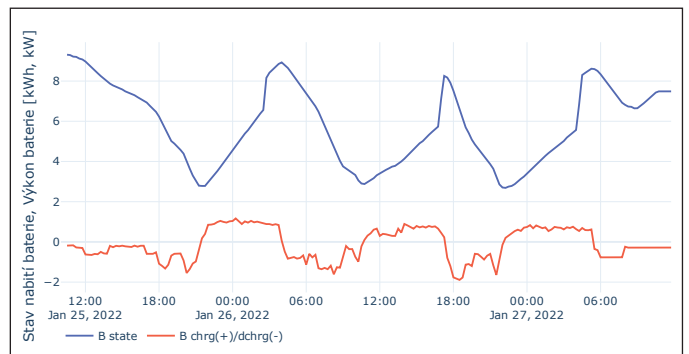
Během podzimu a konce roku 2021 bylo provedeno několik experimentů na reálném zařízení, které bylo umístěno na pozemku Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (UCEEB) v Buštěhradu. Experimenty byly zaměřeny na provoz systému v ostrovním režimu (systém odpojen od distribuční sítě). Cílem bylo ověřit výše uvedené simulace.

Profily odběru tepla a elektrické energie na obr. 18 reprezentovaly odběr virtuální budovy se dvěma odběrovými špičkami. Profil odběru elektrické energie byl oproti prvním experimentům vytvořen tak, aby více odpovídal skutečnému provozu.

Výsledek experimentu je zobrazen na obr. 19 až 21. Na obr. 19 je vyobrazena bilance tepelné části systému.



Obr. 18 Profil dodávky tepla a elektřiny virtuální budovy během reálného experimentu v ostrovním režimu  
Fig. 18 Heat and electricity supply profile of the virtual building during the real experiment in island mode operation



Obr. 21 Stav nabití bateriového úložiště během reálného experimentu v ostrovním režimu  
Fig. 21 Battery storage state of charge during the real experiment in island mode operation

Jednotka Wave (modře) byla spuštěna, když se kapacita bateriového úložiště (červeně) blížila minimální dovolené hodnotě (30 %, viz obr. 21) a zároveň v době nízké kapacity akumulátoru tepla (zeleně). Jednotka Wave kontinuálně běžela okolo 7 až 9 hodin. Vypnutí jednotky Wave bylo naplánováno v době nabití bateriového úložiště (80 %). Regulace systému z pohledu tepelné bilance odpovídá simulacním výsledkům.

Na obr. 20 je zobrazena bilance elektrické části systému. Produkce elektřiny jednotkou Wave (modře) zobrazuje součet elektrického výkonu na generátoru a vlastní spotřeby jednotky. Z tohoto důvodu nabyvá vysoké záporné hodnoty v době spuštění jednotky Wave. Je vidět, že výroba fotovoltaického systému byla během experimentu minimální a elektřinu mohla dodávat jen jednotka Wave.

Během dvoudenního experimentu došlo třikrát k zapnutí jednotky Wave a její kontinuální provoz byl okolo 7 až 9 hodin. Nedocházelo k jejímu cyklickému zapínání a vypínání – tedy k nežádoucímu chování. Experimentem se potvrdily simulační výsledky. Největší komplikací bylo neúměrné nabíjení bateriového úložiště – okolo nabití na 70 % kapacity docházelo ke skokovým změnám stavu nabití úložiště, což značně komplikovalo plán regulace. Dalším problémem bylo snížení provozního pásma bateriového úložiště na 30 až 80 %. Dolní hranice byla zvolena z důvodu rezervy pro zapnutí jednotky Wave a horní hranice z důvodu nutnosti dobíjení baterií malým proudem nad úrovní 80 %. To není možné při dobíjení úložiště jednotkou Wave dodržet. Během experimentu byl provoz bateriového úložiště optimální a baterie nebyly nikdy vybity pod bezpečnou hranici danou výrobcem. Chod jednotky Wave byl v těchto experimentech mnohem stabilnější než v předchozích experimentech. Akumulátor tepla byl využíván efektivně, jeho provoz byl optimální a zároveň nedošlo k úplnému vybití akumulátoru.

## ZÁVĚR

Příspěvek se zabývá použitím modelu popsaného v předchozí části článku [4] pro podrobné simulace a jeho ověřením reálnými experimenty s prediktivní regulací (MPC) pro provoz autonomního systému na výrobu elektřiny a tepla, který se skládá z kogenerační ORC jednotky Wave, fotovoltaických panelů, bateriového úložiště a virtuálního akumulátoru tepla.

V létě 2021 bylo provedeno několik experimentů provozu reálného zařízení s připojením k distribuční síti. Došlo k ověření simulačních výsledků experimentem. Provoz jednotky Wave byl kontinuální a byl minimalizován počet zapnutí a vypnutí. Provoz bateriového úložiště a akumulátoru tepla byl optimální a nikdy nedošlo k vybití pod jeho bezpečnou hranici. Bilance elektřiny nebyla optimální a docházelo k většímu nákupu elektřiny ze sítě, než plánovala regulace. Chyba byla způsobena nestabilním chodem jednotky Wave, z důvodu nedodržení požadovaného výkonu.

Na podzim 2021 byly provedeny experimenty v ostrovním režimu (off-grid), které měly simulovat provoz v odlehle oblasti bez napojení na distribuční síť nebo při jejím výpadku. Provoz jednotky byl i v těchto experimentech v souladu s provozními požadavky. Největší komplikací bylo neúměrné nabíjení bateriového úložiště – okolo nabití na 70 % kapacity docházelo ke skokovým změnám stavu nabití úložiště, což značně komplikovalo plán regulace. Během experimentu byl provoz bateriového úložiště optimální a baterie nebyly nikdy vybity pod bezpečnou hranici danou výrobcem. Chod jednotky Wave byl v těchto experimentech mnohem stabilnější než v předchozích experimentech. Akumulátor tepla byl využíván efektivně, jeho provoz byl optimální a zároveň nedošlo k úplnému vybití akumulátoru.

Velkou výhodou regulátoru MPC je skutečnost, že se jedná o zpětnovazební regulátor, který dokáže kompenzovat odchylky predikce modelu a skutečnosti. Výsledky ukázaly, že regulace pracuje podle požadavků jak v případě napojení na distribuční síť, tak v ostrovním režimu.

Kontakt na autora: Jan.Safranek@fs.cvut.cz

Poděkování: Tato práce vznikla za podpory projektu STALONE (TAČR TK02020184) Systém pro plně autonomní výrobu obnovitelné elektřiny.

## Použité zdroje:

- [1] ŠAFRÁNEK, J., ZMRHAL, V. *Tvorba matematického modelu pro prediktivní regulaci vytápění budovy se systémem TABS*. Vytápění, větrání, instalace. 2020, 29(5), 255–259. ISSN 1210-1389.

- [2] Solving Constraint Integer Programs: <https://scipopt.org/index.php#cite>

- [3] InfluxDB: <https://www.influxdata.com/>

- [4] ŠAFRÁNEK, J., MATUŠKA, T. *Systém pro autonomní výrobu obnovitelné elektřiny a tepla. Část 1: Popis systému*. Vytápění, větrání, instalace. 2022, 31(4), 158–162. ISSN 1210-1389.

## Poznámka recenzenta:

V druhém díle článku o autonomní výrobě tepla a elektřiny jsou diskutovány simulační a experimentální výsledky. Numerické simulace potvrdily, že navržený řídicí systém umožňuje dosahovat optimálního provozu při dodržení všech omezení. To se potvrdilo i při experimentálním ověření. Zajímavá byla zejména situace, kdy se jednotka Wave, vlivem drobné poruchy, nechovala tak, jak bylo predikováno. Regulátor byl schopen na tuto skutečnost reagovat a adekvátně změnit strategii řízení. To je velmi důležitá vlastnost z pohledu praktického nasazení diskutovaného způsobu řízení.