

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY TEKUTIN A TERMODYNAMIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Aplikace hysterezního modelu materiálu pro akumulaci
tepla na latentní akumulátor s PCM ve válcových
pouzdrech**

Application of hysteresis model of phase change material to thermal energy
storage system with cylindrical encapsulated PCM

Vypracoval: **Jan Langer**
Studijní program: **Aplikované vědy ve strojním inženýrství**
Specializace: **Aplikovaná mechanika**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.**

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Langer** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **465374**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**
Studijní program: **Aplikované vědy ve strojním inženýrství**
Specializace: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aplikace hysteretzního modelu materiálu pro akumulaci tepla na latentní akumulátor s PCM ve válcových pouzdrech

Název diplomové práce anglicky:

Application of hysteresis model of phase change material to thermal energy storage system with cylindrical encapsulated PCM

Pokyny pro vypracování:

Popište funkci tepelného akumulátoru s PCM, kde uvažujte laboratorní akumulátor ústavu 12112. Popište poskytnutý numerický model akumulátoru s PCM zapouzdřeným ve válcových pouzdrech, který je vytvořen v programu MATLAB. Popište a diskutujte vybrané modely hysteretzního chování dostupné v literatuře. Do výpočtového programu implementujte model hysteretzního chování. Pro rozšíření možností simulací upravte výpočtový program s cílem simulovat případy s nestacionárním prouděním vody v akumulátoru. Řešte vybíjení akumulátoru konstantním výkonem a studujte vliv jednotlivých parametrů akumulátoru na jeho vybíjení konstantním výkonem. Porovnejte výsledky simulací s výsledky experimentů, které jsou dostupné. Diskutujte získané výsledky. Rozsah průvodní zprávy: cca 50 stran

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D., ústav mechaniky tekutin a termodynamiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Michal Schmirler, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, s využitím literárních zdrojů uvedených v seznamu literatury, pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu doc. Ing. Tomáši Hyhlíkovi, Ph.D. za veškeré konzultace, rady a zpětné vazby při vypracování této práce. Velice si vážím jeho obrovské ochoty a laskavosti, s jakými k vedení práce po celou dobu přistupoval. Také bych zde rád vyjádřil vděčnost Ing. Petru Jančíkovi, Ing. Janu Koubovi a Ing. Jakubu Deverovi za poskytnutí experimentálních dat, podrobností ohledně jejich naměření a cenných doporučení. Mé poděkování patří rovněž mým rodičům a celé rodině za podporu při studiu.

Anotační list

| | |
|--------------------------|---|
| Jméno autora: | Jan Langer |
| Název diplomové práce: | Aplikace hysterezního modelu materiálu pro akumulaci tepla na latentní akumulátor s PCM ve válcových pouzdrech |
| Anglický název: | Application of hysteresis model of phase change material to thermal energy storage system with cylindrical encapsulated PCM |
| Akademický rok: | 2021/2022 |
| Studijní program: | Aplikované vědy ve strojním inženýrství |
| Specializace: | Aplikovaná mechanika |
| Ústav: | Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky (12112) |
| Vedoucí diplomové práce: | doc. Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D. |
| Bibliografické údaje: | Počet stran: 91 Počet obrázků: 58 Počet tabulek: 15 Počet příloh: 5 |

Klíčová slova: hysterezní model, PCM, latentní tepelný akumulátor, částečná fázová změna, vybíjení konstantním výkonem, vliv geometrických parametrů, porovnání s experimentem

Keywords: hysteresis model, PCM, LHTES, incomplete phase change, constant power discharge, influence of geometrical parameters, comparison with experiment

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá numerickým modelováním chování PCM a latentního tepelného akumulátoru s akumulací látkou uloženou ve válcových pouzdrech. Cílem bylo rozšíření simulačních možností modelu akumulátoru o pracovní cykly, při kterých nedojde k úplné fázové změně v PCM, a o případy s nestacionárním průtokem vody jakožto teplotně nosné tekutiny. Teoretická část práce je kromě stručného úvodu do problematiky zaměřena především na výpočetní modely úplné i neúplné fázové změny v PCM. Vybraný měřítkový model byl posléze implementován do modelu celého zařízení a upraven i pro možnost výpočtu střední teploty PCM v pouzdře. Provedená úprava modelu z konstantního na časově závislý průtok vody umožnila simulace vybíjení akumulátoru konstantní hodnotou výkonu a studium vlivu jednotlivých geometrických parametrů na chování při tomto ději. Výsledky ukazují, že daný objem PCM lze po nalezení největšího přijatelného průměru pouzder rozdělit do libovolného počtu trubek. V závěru práce jsou uvedena tři porovnání s experimentálními daty. Pro první dvě byly průběhy naměřeny na akumulátoru v laboratořích ústavu 12112, třetí ověřuje přesnost měřítkového modelu na složitém teplotním profilu aplikovaném na polyethylenglykol.

Abstract

This diploma thesis deals with numerical modelling of the behavior of PCMs and a latent heat thermal energy storage unit with PCM stored in cylindrical containers. The goal was to extend simulation capabilities of the accumulator model and include cycles with incomplete phase change in PCM. Another objective was to include cases with non-stationary flow of water as heat transfer fluid. The theoretical part of the thesis, apart from a brief introduction, is mainly focused on computational models of both complete and incomplete phase changes in PCM. Selected “curve scale” model was then implemented in the model of the whole device and modified to enable calculation of the mean PCM temperature. The modification of the model from a constant to a time-dependent water flow allowed constant power output discharge simulations and the study of the influence of individual geometrical parameters on the behaviour during this process. Results show that a fixed volume of PCM can be divided into any number of tubes, after finding the largest acceptable container diameter. The paper concludes with three comparisons with experimental data. The first two were measured on the storage unit built in the laboratories of the department 12112, the third one verifies the accuracy of the “curve scale” model on a complex temperature waveform applied to a polyethylene glycol.

Obsah

| | |
|--|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů..... | 9 |
| 1. Úvod..... | 12 |
| 1.1. Cíle práce | 12 |
| 1.2. Motivace | 12 |
| 1.3. Základní přehled PCM..... | 12 |
| 1.4. Latentní tepelné akumulátory | 14 |
| 2. Modelování fázové změny PCM..... | 17 |
| 2.1. Modelování úplné fázové změny..... | 19 |
| 2.1.1. Lineární model..... | 19 |
| 2.1.2. Vollerův model..... | 20 |
| 2.1.3. Polynomický model..... | 20 |
| 2.1.4. Gaussovské modely | 22 |
| 2.2. Modely částečné fázové změny | 24 |
| 2.2.1. Úsečkový model | 25 |
| 2.2.2. Měřítkový model | 26 |
| 2.2.3. Další statické modely | 28 |
| 2.2.4. Dynamický model | 29 |
| 3. Modelování hysterezního chování latentního akumulátoru | 31 |
| 3.1. Stručný popis akumulátoru | 31 |
| 3.2. Poskytnutý výpočtový model akumulátoru | 33 |
| 3.2.1. Vzorová úloha | 38 |
| 3.3. Úpravy modelu pro možnost simulování částečné fázové změny | 39 |
| 3.3.1. Implementace do modelu akumulátoru | 39 |
| 3.3.2. Úprava měřítkového modelu pro výpočet střední teploty | 46 |
| 3.4. Optimalizace kódu | 48 |
| 4. Vybíjení konstantním výkonem a vliv jednotlivých parametrů..... | 51 |
| 4.1. Úpravy modelu pro nestacionární průtok vody | 51 |
| 4.2. Regulace průtoku vody akumulátorem..... | 52 |
| 4.3. Studium vlivu parametrů akumulátoru na vybíjení konstantním výkonem... 53 | |
| 4.3.1. Hypotézy..... | 57 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.3.2. | Konstantní výška nádrží | 57 |
| 4.3.3. | Konstantní objem akumulátoru | 61 |
| 4.3.4. | Dovybívání a vliv maximálního průtoku vody..... | 68 |
| 5. | Porovnání simulací s výsledky experimentů..... | 71 |
| 5.1. | Popis laboratorního akumulátoru..... | 71 |
| 5.2. | Vybíjení konstantním průtokem | 73 |
| 5.3. | Vybíjení konstantním výkonem..... | 75 |
| 5.4. | Cyklický ohřev a ochlazování PCM uvnitř teplotního rozmezí fázové změny | 78 |
| 6. | Závěr | 83 |
| | Seznam obrázků | 85 |
| | Seznam tabulek | 87 |
| | Seznam použité literatury | 88 |
| | Seznam příloh | 91 |

Seznam použitých zkratek a symbolů

| Veličiny | | |
|---------------|---|---|
| a | [m] | Vzdálenost os pouzder v akumulátoru |
| c_p | [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | Měrná tepelná kapacita PCM |
| \tilde{c}_p | [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | Efektivní měrná tepelná kapacita PCM |
| c | [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹] | Měrná tepelná kapacita ostatních látek (dle indexu) |
| d | [m] | Vnější průměr pouzdra |
| D_h | [m] | Hydraulický průměr |
| D_{ak} | [m] | Průměr akumulátoru |
| E_{ST} | [1] | Poměr efektivně využitelného tepla z latentní akumulátoru a tepla z vodního akumulátoru stejného objemu |
| H | [J] | Entalpie |
| Δh_t | [J · kg ⁻¹] | Měrné latentní teplo |
| h | [J · kg ⁻¹] | Měrná entalpie |
| k, f | [1], [1] | Funkce dynamického modelu |
| l | [m] | Délka |
| m | [kg] | Hmotnost |
| \dot{m} | [kg · s ⁻¹] | Hmotnostní tok |
| N | [1] | Počet trubek v akumulátoru |
| Nu | [1] | Nusseltovo číslo |
| Q | [J] | Teplo |
| \dot{Q} | [W] | Tepelný tok, výkon |
| Re | [1] | Reynoldsovo číslo |
| R_T | [K · m ² · W ⁻¹] | Tepelný odpor |
| s | [%] | Odchylka dvou sad dat |
| S_t | [m ²] | Teplosměnná plocha |
| t | [s] | Čas |
| T | [K] | Teplota |
| T_0 | [K] | 273,15 K |
| v | [m · s ⁻¹] | Rychlost |
| V | [m ³] | Objem |
| \dot{V} | [m ³ · s ⁻¹] | Objemový tok |
| w | [1] | Váhový parametr |
| α | [W · m ⁻² · K ⁻¹] | Součinitel přestupu tepla |
| α_V | [1] | Exponent Vollerova modelu úplné fázové změny |
| η | [Pa · s] | Dynamická viskozita |

| | | |
|----------------------|---------------------------------|---|
| λ | $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ | Tepelná vodivost |
| μ, β, κ | $[K], [K], [1]$ | Koeficienty gaussovského modelu |
| ξ | $[1]$ | Hmotnostní zlomek podílu kapalné fáze |
| ξ_o | $[1]$ | Objemový zlomek podílu kapalné fáze |
| ρ | $[kg \cdot m^{-3}]$ | Hustota |
| σ | $[\%]$ | Tolerance požadovaného výkonu |
| φ | $[1]$ | Podíl efektivně využitelného tepla ku maximálnímu tepla, které by šlo pro daný teplotní rozdíl získat |
| ϕ | $[1]$ | Distribuční funkce |

Horní indexy

| | |
|-------------------|-------------------------------|
| c | Celý objem PCM |
| l | „Liquid“ – kapalné skupenství |
| s | „Solid“ – pevné skupenství |
| $l \rightarrow s$ | Tuhnutí |
| $s \rightarrow l$ | Tání |

Dolní indexy

| | |
|---------|---|
| 0 | Počáteční podmínka |
| ak | Akumulátor |
| ave | Střední |
| $dovyb$ | Dovybívání akumulátoru |
| e | Hodnota z experimentu |
| ef | Pásmo efektivního získávání výkonu z akumulátoru |
| i | Index buněk modelu ve směru osy pouzdra |
| j | Index buněk modelu kolmo na směr osy pouzdra |
| k | Časový index kroků simulace |
| P | Původní model |
| $pož$ | Požadovaný |
| r | Rovnovážná hodnota |
| s | Hodnota ze simulace |
| tr | Případající na jednu trubku, na jedno pouzdro s PCM |
| U | Upravený model |
| VA | Vodní akumulátor |
| z | Změna z ohřevu na chlazení či obráceně |

Zkratky

| | |
|-------|--|
| HTF | „Heat transfer fluid“ – teplotonosná tekutina, pracovní tekutina v energetickém zařízení |
| LHTES | „Latent heat thermal energy storage“ – zařízení využívající latentní teplo pro uložení energie |
| PCM | „Phase change materiál“ – materiály měnící skupenství během pracovního cyklu |

1. Úvod

1.1. Cíle práce

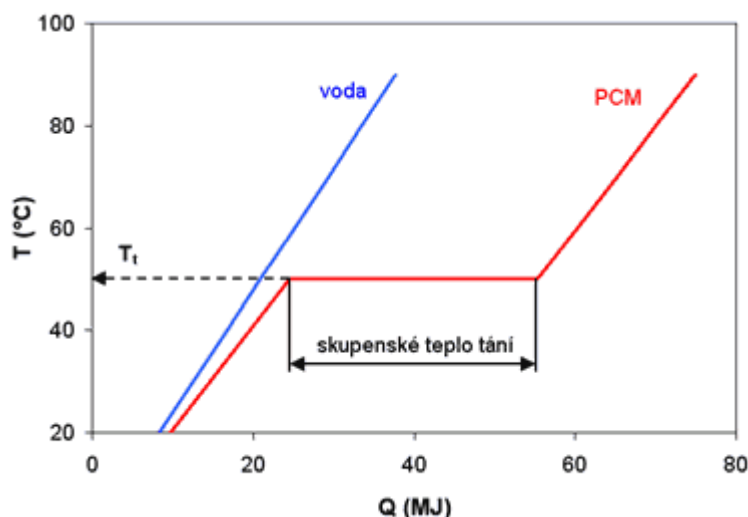
Hlavním cílem této diplomové práce je zvolení vhodného modelu hysterezního chování PCM látek při fázové změně a jeho implementace do numerického modelu tepelného akumulátoru. Tato práce se zabývá takovým uspořádáním, při kterém je PCM uloženo ve válcových pouzdrech, která jsou podélně naskládána v akumulátoru. Model zásobníku je dále nutné upravit i pro případy s nestacionárním průtokem vody, což je nutný předpoklad pro simulování vybíjení konstantním výkonem. Cílem této části práce je zjištění vlivu jednotlivých parametrů akumulátoru na tento režim vybíjení. Průběhy získané simulací je nutné porovnat s experimentálně naměřenými daty.

1.2. Motivace

Potřeba skladovat a uchovávat přebytečnou energii koresponduje s narůstající potřebou snižovat energetickou náročnost společnosti i s přetrvávajícím problémem časového nesouladu nabídky (generování) a poptávky (spotřeby) energie. Se vzrůstajícím společenským tlakem na využívání obnovitelných zdrojů se tento problém dále prohlubuje. Solární či větrnou energii není možné získávat nepřetržitě, většinou dokonce ani ne ve chvílích, kdy by jí zrovna bylo potřeba. Příkladem budiž používání sluneční energie pro vytápění budov. Teplo je získáváno v průběhu dne, potřeba by ale bylo ideálně až v chladných večerních hodinách. Pro efektivní hospodaření s tepelnou energií je tak nutné vyvinout účinná akumulární zařízení. [1][2]

1.3. Základní přehled PCM

PCM materiály (z anglického „phase change materials“) neboli materiály s látkovou přeměnou umožňují ukládat a uvolňovat velké množství tepelné energie, aniž by se jejich teplota drasticky změnila. Při pracovním cyklu totiž dochází u takové látky ke změně skupenství, čímž se do ní kromě citelného tepla uloží i teplo latentní. Tuto výhodu názorně demonstruje Obr. 1. V naprosté většině případů se využívá fázová změna z pevného do kapalného skupenství a obráceně. [3][4][6]



Obr. 1 Zjednodušený graf porovnávající ukládání tepla do vody a do PCM [5]

I přes to, že schopnost tavení a tuhnutí vykazují v podstatě všechny látky, jen určité skupiny splňují alespoň většinu ze základních požadavků pro smysluplné využití při skladování tepelné energie. Teplota tání musí být v rozsahu požadovaném pro danou aplikaci, materiál by měl mít vysoké měrné latentní teplo a tepelnou kapacitu a zároveň by měl vykazovat dobrou tepelnou vodivost. Naopak nežádoucími jevy jsou velké změny objemu při nárůstu či poklesu teploty, korozivní účinky či degradace materiálu při opakovaných fázových změnách. Velkým problémem je tzv. efekt podchlazení, při kterém se kapalina ochladí pod teplotu tání, aniž by došlo k jejímu ztuhnutí. U látek vykazujících toto chování tak může být obtížné v pracovním rozsahu dosáhnout fázové změny a získání uloženého tepla. [7][8]

Na základě výše uvedených požadavků se v praxi jako PCM nejčastěji používají následující skupiny látek. Každá má své specifické přednosti a nedostatky, které je nutné uvážit při volbě a posléze i při návrhu zařízení.

a) Organické PCM

Obecně mají nižší hustotu než anorganické, takže při podobném měrném latentním teple je pro dosažení požadavku na množství uložené energie potřeba větší objem.

Nejběžnějšími zástupci jsou parafíny, mezi jejichž přednosti patří zejména chemická netečnost a stabilita. Nevykazují efekt podchlazení, na druhou stranu mají nízkou tepelnou vodivost a jsou mírně hořlavé.

Dalšími organickými PCM látkami jsou mastné kyseliny, které mají podobné vlastnosti jako parafíny, a polyalkoholy (alkoholové cukry), které sice mají vyšší hustotu v porovnání se zbytkem organických PCM, na druhou stranu se u nich ale vyskytuje podchlazení. [7][9]

b) Anorganické PCM

Jejich výhodou je již zmíněná vyšší hustota, nicméně většina má korozivní účinky.

Do této skupiny patří zejména hydráty solí. V porovnání s organickými PCM mají vyšší tepelnou vodivost. Nevýhodou je efekt podchlazení, který může dosahovat až několika °C pod běžný rozsah teploty tavení.

Dále sem patří i kovy a slitiny s nízkou teplotou tání. Jejich hlavní předností je vynikající tepelná vodivost, k nedostatkům lze naopak řadit nízké měrné latentní teplo. [7][9][10]

1.4. Latentní tepelné akumulátory

Pro praktické využití vlastností PCM je nutné látku zabudovat do akumulací jednotky. Souhrnně se taková zařízení označují jako LHTES („latent heat thermal energy storages“). Účelem je jednak zajistit možnost výměny tepla mezi teplotonosným médiem proudícím v systému (např. vodou) a akumulacím médiem (PCM) při nabíjení či vybíjení akumulátoru a zároveň zajistit dobrou izolaci pro minimalizaci ztrát.




Mezi nejdůležitější konstrukční otázky patří:

a) Zapouzdření PCM

Ve většině realizací je nutné PCM uložit do pouzder či obalů. Hlavním důvodem je zabránění úniku látky, zejména pokud je v kapalném stavu, a jejímu usazení na nežádoucích místech v systému. U některých skupin PCM může obal bránit vzniku chemické reakce mezi látkou a okolím. Rovněž podporuje zvýšení tepelné vodivosti v akumulátoru. Geometrií pouzder se v praxi vyskytuje nepočítaně, podstatnými parametry jsou materiál a tvar pouzdra, dále tloušťka stěny, teplosměnná plocha či objemový podíl PCM ku obalu. Zapouzdření zároveň usnadňují manipulaci. [12][2]

Příklady pouzder jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1 Příklady pouzder (převzato z [13] a upraveno)

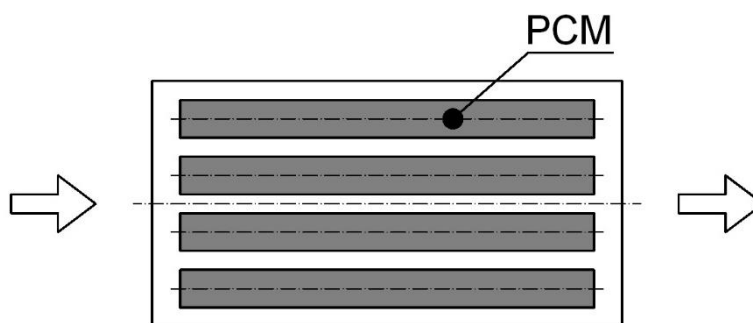
| Válcová pouzdra | Kulová pouzdra | Kovové pláty | Plastové nádoby |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |

U organických PCM se nabízí i možnost tzv. mikro-zapouzdření, u kterého se velikost kapslí může pohybovat až v řádech mikrometrů. Cílem takové úpravy je zvýšení

teplosměnné plochy. Vzniklý prášek je možné buď použít samostatně nebo ve formě kalu po smísení s kapalinou. [2]

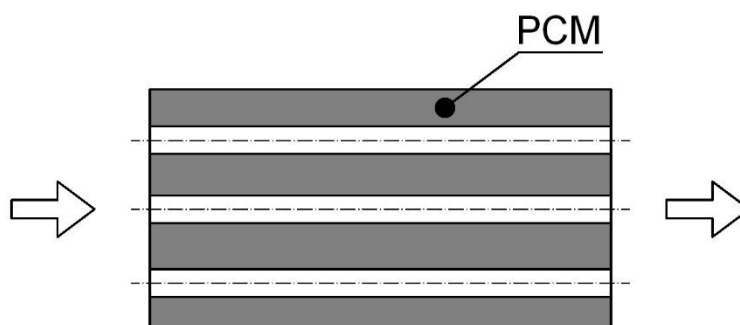
b) Konstrukční řešení akumulátoru

Nejčastějším typem jsou akumulátory navržené po vzoru tepelných výměníků. V nádrži jsou umístěny pouzdra s PCM, kolem kterých protéká teplotonosná tekutina (např. voda). Mezi oběma látkami tak dochází přes stěny k výměně tepelné energie. Jaký podíl objemu nádrže lze zaplnit PCM, či jaká bude celková teplosměnná plocha, závisí především na tvaru použitých pouzder. Akumulátor s válcovými je schematicky znázorněn na Obr. 2, šipkami je naznačen tok vody. [9]



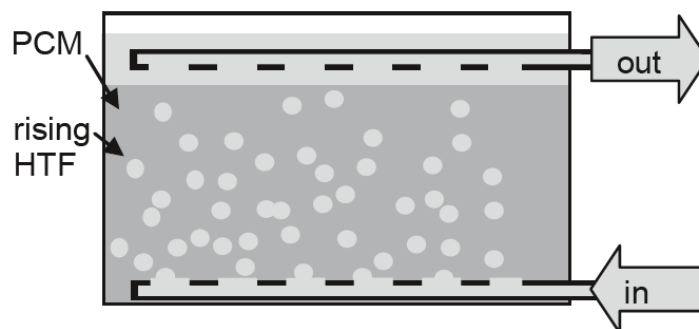
Obr. 2 Schéma akumulátoru s válcovými pouzdry

Pro tento typ akumulátoru se nabízí i inverzní konstrukce. Látkou je vyplněn veškerý prostor nádrže a voda proudí pouze skrz trubky, viz Obr. 3. Tímto řešením odpadá nutnost výroby mnoha pouzder, nevýhodou je naopak menší možnost následné modifikace. Zatímco u varianty na Obr. 2 lze pouzdra jednoduše vyjmout, přidat či vyměnit za jiný typ, u inverzní konstrukce lze jakékoli úpravy provádět jen s obtížemi. [1]



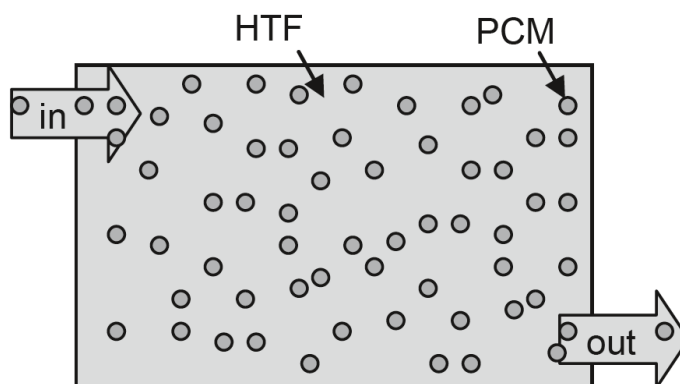
Obr. 3 Inverzní konstrukce trubkového akumulátoru

K méně konvenčním konstrukcím patří ty, u kterých je PCM v přímém kontaktu s pracovní tekutinou. Nutnými požadavky jsou vzájemná chemická netečnost obou látek a zamezení mísení. Lze například využít rozdílné hustoty, viz schéma na Obr. 4. Lehčí teplotonosná tekutina (HTF – „heat transfer fluid“) je přiváděna do dolní části nádrže a posléze stoupá skrze PCM, přičemž dochází k výměně energie. [9]



Obr. 4 Akumulátor využívající rozdílných hustot [9]

Pro využití mikro-zapouzdřeného PCM lze využít přístupu, při kterém směs ve formě kalu prochází celým systémem a slouží tedy zároveň jako akumulční i teplonosná tekutina. Jako akumulátor tak neslouží pouze prostor nádrže, nýbrž celý systém. Mezi přednosti se řadí i vyšší tepelná vodivost a hustota uložené energie. Návrh takového zařízení ovšem ztěžuje nedostatek znalostí o vlastnostech takto vzniklých směsí. [9][14]



Obr. 5 Akumulátor s mikro-zapouzdřeným PCM [9]

V dalších kapitolách se tato práce již bude věnovat pouze variantě s PCM ve válcových pouzdrech.

2. Modelování fázové změny PCM

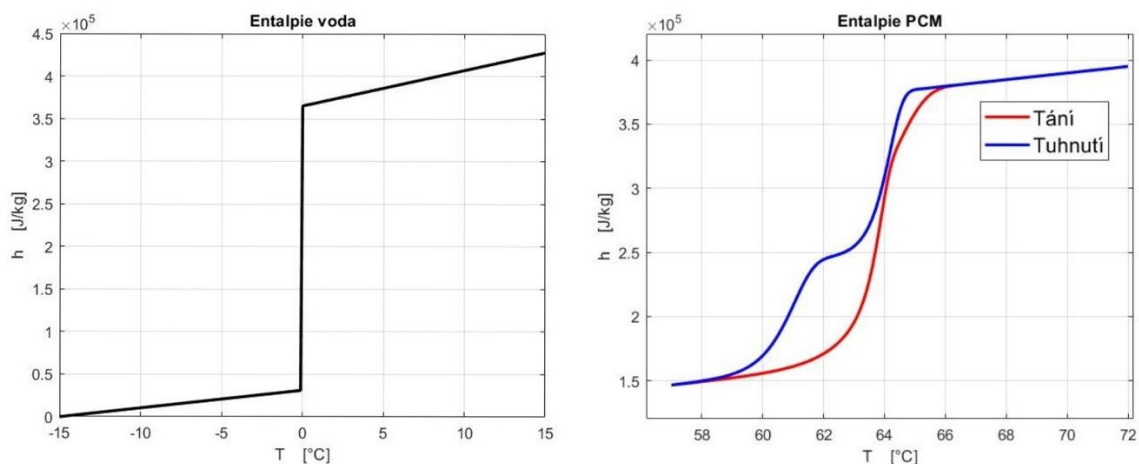
Pracovní cyklus latentních tepelných akumulátorů spočívá v opakovaném tání a tuhnutí PCM. Pro potřeby návrhu těchto zařízení a simulací jejich chování je tak nutné vyvinout modely, které by byly schopny popsat změny, které se v PCM udávají během fázového přechodu.

Provedme první předpoklad netýkající se přímo změny skupenství. Jelikož ale pracovní teploty zůstávají v jejím relativně blízkém okolí, uvažujme, že látka má v pevné a v kapalně fázi konstantní hodnoty termofyzikálních vlastností. Mezi nejdůležitější patří hustota, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. Pro pevnou fázi zavedme označení indexem s („solid“), pro kapalnou l („liquid“). Jedním z požadavků na model tedy musí být věrohodné popsání přechodu mezi těmito hodnotami.

$$\rho^s, \lambda^s, c_p^s \leftrightarrow \rho^l, \lambda^l, c_p^l \quad (1)$$

Během změny rovněž musí dojít k dodání či uvolnění latentního tepla. V měrných hodnotách tedy jde o Δh_t [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$].

Bohužel, u většiny PCM materiálů neprobíhá fázová přeměna při jedné konstantní teplotě, nýbrž v určitém rozmezí teplot, nelineárně a rozdílně pro tání a tuhnutí. Obr. 6 zobrazuje ukázkou porovnání závislosti entalpie (dodaného / odvedeného tepla) na teplotě pro vodu a pro PCM, konkrétně jde o organický materiál RT64HC od společnosti Rubitherm. Každé PCM vykazuje unikátní hysteretní chování, které je nutné modelem věrohodně zachytit. Odchyly od reality mohou totiž vést ke špatnému dimenzování systému. [11] [15] [16]



Obr. 6 Porovnání fázového přechodu u vody a PCM RT64HC

Teplotní rozmezí, ve kterém probíhá fázová změna, je rovněž specifické pro daný typ PCM. Teplotu, pod kterou je látka vždy v tuhém stavu, označíme obecně jako T_{min} .

Teplotu, nad kterou je látka vždy v kapalném stavu, jako T_{max} . Mezi těmito teplotami si lze strukturu představit jako směs obou fází.

Složení takové směsi lze charakterizovat hmotnostním zlomkem podílu kapalně fáze:

$$\xi = \frac{m^l}{m^l + m^s} \quad (2)$$

kde m^l je hmotnost kapalně fáze ve směsi a m^s je hmotnost pevně fáze. [11]

Druhým potřebným parametrem používaným ve většině analytických modelů fázové změny je tzv. efektivní měrná tepelná kapacita \tilde{c}_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. Tato veličina je obdobou klasické měrné tepelné kapacity a zahrnuje v sobě jak přechod mezi hodnotami c_p^s a c_p^l , tak vliv latentního tepla Δh_t . Definuje se jako:

$$\tilde{c}_p = \frac{dh(T)}{dT} = \xi c_p^l + (1 - \xi)c_p^s + \frac{d\xi}{dT} \Delta h_t \quad (3)$$

Pod teplotou T_{min} je z definice $\xi = 0$, $\frac{d\xi}{dT} = 0$, takže souhlasí, že $\tilde{c}_p = c_p^s$. Obdobně nad T_{max} je $\tilde{c}_p = c_p^l$.

Při použití \tilde{c}_p lze dodržet klasický vztah pro výpočet rozdílu entalpií mezi teplotami T_1 a T_2 :

$$h(T_2) - h(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} \tilde{c}_p(\tau) d\tau \quad (4)$$

Ten platí nezávisle na tom, zda se aktuálně pohybujeme v rozmezí fázové změny či nikoliv.

Z rovnic (3) a (4) vyplývá, že hodnoty měrné entalpie, efektivní měrné tepelné kapacity a podílu kapalně fáze jsou svázány. Cílem všech analytických modelů je tedy získat vyjádření alespoň jedné z těchto veličin jako funkce teploty, tedy nalezení závislosti $h(T)$, $\tilde{c}_p(T)$ či $\xi(T)$. [11][16]

2.1. Modelování úplné fázové změny

První skupina modelů vychází z předpokladu, že fázová změna proběhne celá, tedy projde celým teplotním rozmezím, a na konci bude v celém objemu směsi rozdílná fáze než na začátku. Pro tání se bude teplota po celou dobu zvyšovat, pro tuhnutí snižovat.

2.1.1. Lineární model

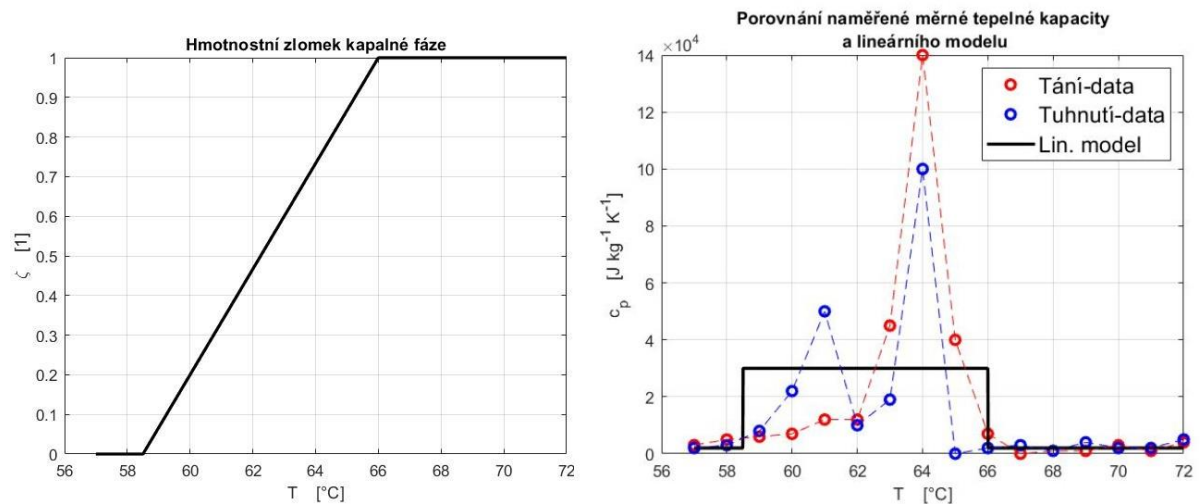
První, elementární model fázové změny vychází ze zjednodušujícího předpokladu, že podíl kapalné fáze se bude mezi hraničními teplotami T_{min} a T_{max} měnit lineárně. Závislost pak lze popsat následovně:

$$\begin{aligned} \xi(T) &= 0 & T < T_{min} \\ \xi(T) &= \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} & T_{min} < T < T_{max} \\ \xi(T) &= 1 & T > T_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

Je zřejmé, že model nedokáže popsat hysterezní rozdíl v chování mezi táním a tuhnutím, obě změny nahrazuje jedinou závislostí.

Druhou nevýhodou je fakt, že při vyjádření \tilde{c}_p vzniká při teplotách T_{min} a T_{max} nespojitost. Jelikož ξ je zde lineární funkcí a \tilde{c}_p je funkcí derivace $\frac{d\xi}{dT}$, znamená to, že závislost $\tilde{c}_p(T)$ bude po částech konstantní. [16][17]

Pro ukázkou byly opět využity naměřené hodnoty \tilde{c}_p materiálu RT64HC.



Obr. 7 Lineární model

Je patrné, že tento základní model nevystihuje reálné chování a je potřeba využít sofistikovanějších popisů.

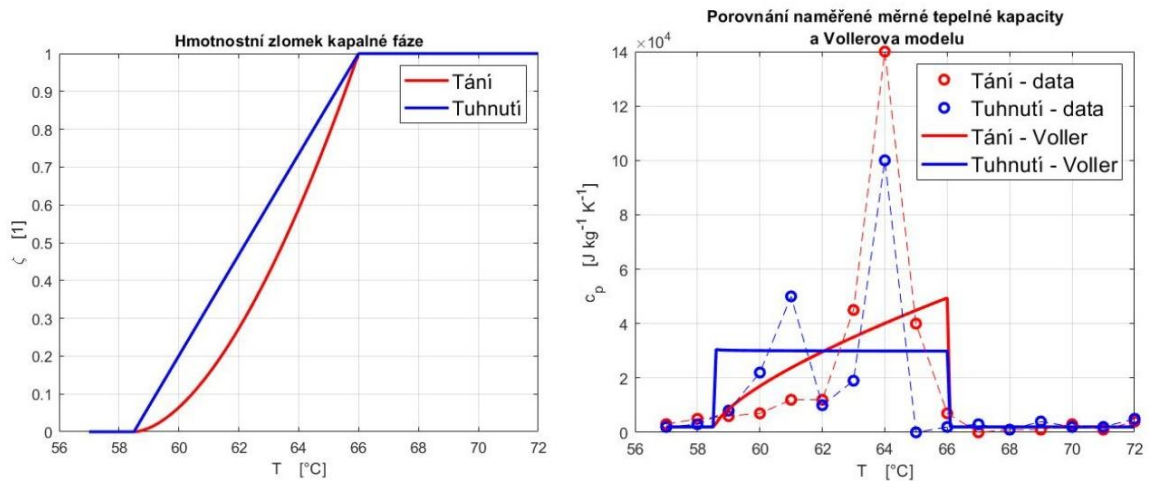
2.1.2. Vollerův model

Již v roce 1989 vyšel článek V. R. Vollera rozšiřující základní lineární model o exponent α_V . Takže nová struktura vypadá takto:

$$\begin{aligned} \xi(T) &= 0 & T < T_{min} \\ \xi(T) &= \left(\frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \right)^{\alpha_V} & T_{min} < T < T_{max} \\ \xi(T) &= 1 & T > T_{max} \end{aligned} \quad (6)$$

U tohoto modelu již není problém rozlišit tání a tuhnutí pomocí dvou koeficientů: $\alpha_V^{s \rightarrow l}$ pro tání, $\alpha_V^{l \rightarrow s}$ pro tuhnutí. Jejich hodnoty je potřeba identifikovat na základě dvou sad naměřených dat. [18][16]

Použití na složité chování PCM RT64HC ovšem opět ukazuje na nedostatečnost modelu. Koeficienty $\alpha_V^{s \rightarrow l}$ a $\alpha_V^{l \rightarrow s}$ byly určeny pomocí metody nejmenších čtverců, přesto výsledný model nekopíruje naměřená data.



Obr. 8 Vollerův model

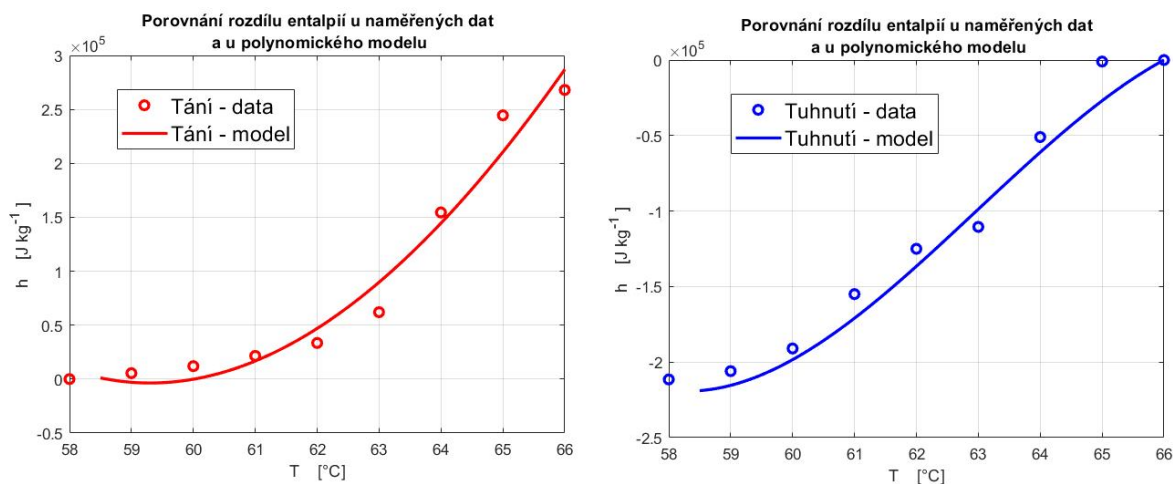
2.1.3. Polynomický model

Gowreesunker a kolektiv ve své práci [17] zvolili odlišný přístup a představili použití kubického modelu pro závislost entalpie na teplotě při fázové změně. Naměřená data dodaná výrobcem jsou nejčastěji ve formě hodnot $\tilde{c}_p^{s \rightarrow l}(T)$, $\tilde{c}_p^{l \rightarrow s}(T)$ v okolí fázové změny. Pokud z nich integrací získáme hodnoty $h^{s \rightarrow l}(T)$ a $h^{l \rightarrow s}(T)$, je možné je využít pro identifikaci koeficientů modelu.

$$\begin{aligned} \Delta h^{s \rightarrow l}(T) &= a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 \approx h^{s \rightarrow l}(T) - h(T_{min}) & \text{(tání)} \\ \Delta h^{l \rightarrow s}(T) &= b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 + b_3 \cdot T^3 \approx h^{l \rightarrow s}(T) - h(T_{max}) & \text{(tuhnutí)} \end{aligned} \quad (7)$$

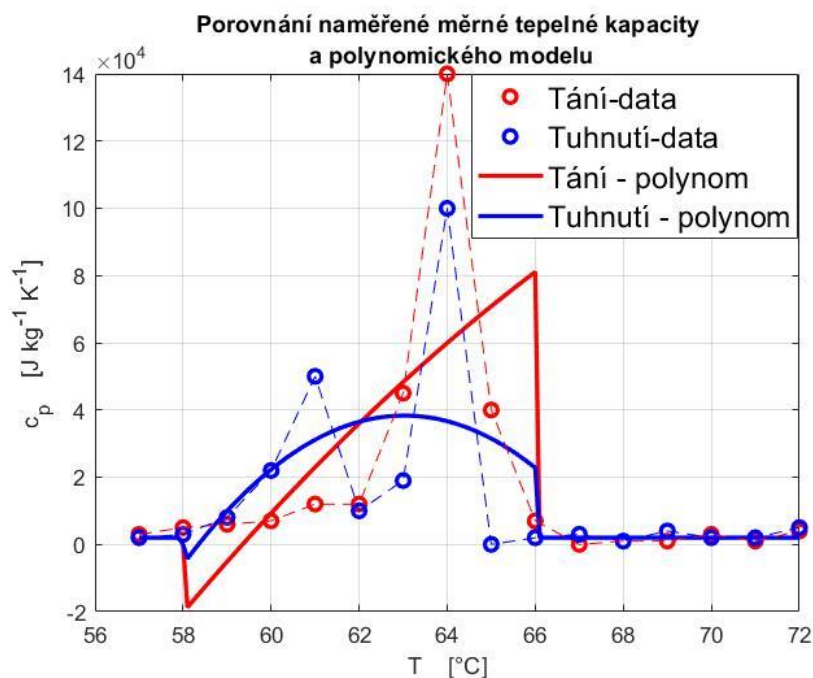
Členy $\Delta h^{s \rightarrow l}(T)$ a $\Delta h^{l \rightarrow s}(T)$ už s lepší přesností vystihují způsob rozložení přijímání či uvolňování latentního tepla v závislosti na teplotě. Při tání se entalpie zvyšuje, čemuž odpovídají kladné hodnoty prvního řádku modelu, při tuhnutí dochází ke snižování entalpie, proto budou hodnoty rozdílu v druhém řádku vycházet záporné.

Obr. 9 a Obr. 10 opět zachycují použití modelu na materiál RT64HC.



Obr. 9 Polynomický model – průběhy entalpií

Bohužel pokud se pokusíme průběhy entalpie derivovat podle teploty ve snaze o získání modelovaných závislostí $\tilde{c}_p^{s \rightarrow l}(T)$ a $\tilde{c}_p^{l \rightarrow s}(T)$, dostáváme stejně jako u předchozích modelů nespojitě průběhy. Realitě neodpovídají ani záporné hodnoty.



Obr. 10 Polynomický model – efektivní měrná tepelná kapacita

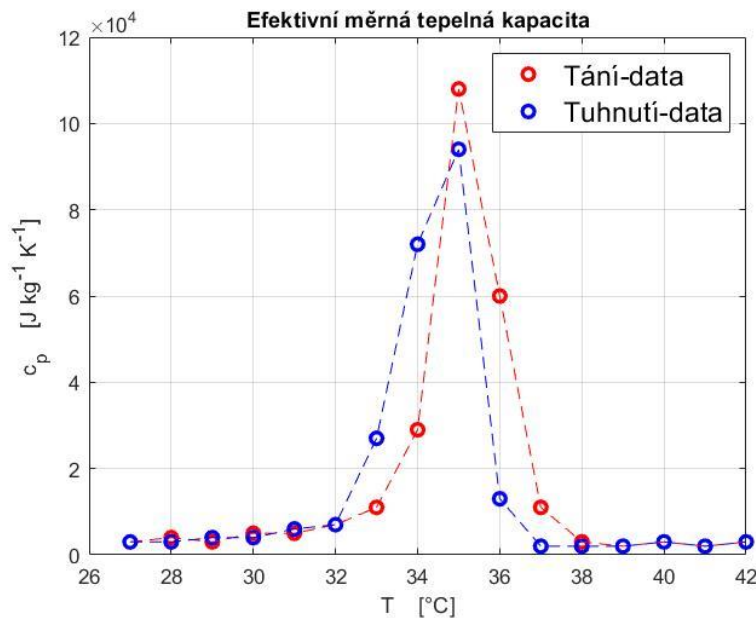
2.1.4. Gaussovské modely

Nejsložitější skupina modelů se opět vrací ke snaze o popsání průběhu efektivní tepelné kapacity či hmotnostního zlomku podílu kapalné fáze.

U většiny PCM jde pozorovat prudké zvýšení hodnoty \tilde{c}_p v relativně úzkém teplotním rozmezí, které předchází modely nedokázaly zachytit. Průběhy s jedním takovým nárůstem (viz PCM RT35HC na Obr. 11) lze dobře popsat Gaussovou funkcí, známou především jako vyjádření hustoty pravděpodobnosti. Uzan a kolektiv v článku [19] představili použití následujícího modelu:

$$\tilde{c}_p(T) = c_p + \frac{\Delta h_t}{\delta T \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{T - T_m}{\delta T}\right)^2\right) \quad (8)$$

využívajícího předpokladu, že $c_p^s = c_p^l = c_p$. Teplota T_m je taková teplota, pro kterou nabývá $\tilde{c}_p(T)$ maxima. Člen δT představuje polovinu teplotního rozsahu fázové změny neboli platí, že: $\delta T = \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$.



Obr. 11 RT35HC - naměřené hodnoty \tilde{c}_p [15]

Některé PCM ovšem mohou vykazovat více takových nárůstů. Poté je nutné do modelu zapracovat více Gaussových funkcí, což popisuje Barz a kolektiv v [11]. Ve svém článku se ovšem rozhodli pro popsání závislosti $\xi(T)$. Jak je patrné z definice, $\tilde{c}_p(T)$ je funkcí $\frac{d\xi}{dT}$. Pro modelování průběhu podílu kapalné fáze je tedy nutné Gaussovy funkce integrovat, čímž vzniknou obdoby distribučních funkcí. Barz konkrétně využívá tvar tzv. Gumbelovy distribuční funkce.

$$\phi^G(T, \mu, \beta, \kappa) = \frac{1}{\beta} \exp\left(\kappa \frac{T - \mu}{\beta}\right) \exp\left(-\exp\left(\kappa \frac{T - \mu}{\beta}\right)\right) \quad (9)$$

kde μ, β, κ jsou parametry funkce. κ leží v rozmezí $(-1, 1)$.

Složení více distribučních funkcí je provedeno pomocí váhových parametrů w_i (musí platit, že $\sum w_i = 1$):

$$\phi = \sum w_i \phi_i^G \quad (10)$$

Výslednou závislost pak dostaneme integrací:

$$\xi(T) = \int_{-\infty}^T \phi(\tau) d\tau \quad (11)$$

Efektivní měrnou tepelnou kapacitu už je pak možné dopočítat podle definice (3).

Barzův model vzniklý kombinací dvou distribučních funkcí byl opět aplikován na data látky RT64HC, u které je při tuhnutí možné pozorovat dvě oblasti strmého nárůstu $\tilde{c}_p(T)$. Složení distribuční funkce tedy vypadalo následovně:

$$\phi = w_1 \phi_1^G + (1 - w_1) \phi_2^G \quad (12)$$

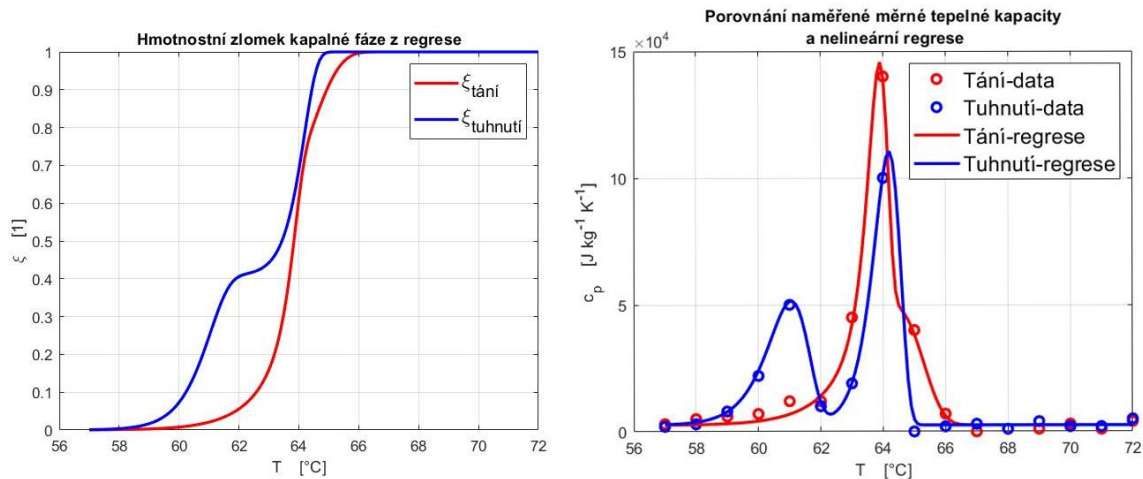
Metodou nejmenších čtverců byly nalezeny takové parametry, aby model co nejlépe odpovídal datům poskytnutých výrobcem ([15]).

Tab. 2 Přehled vypočtených parametrů pro tání

| | μ_1 | β_1 | μ_2 | β_2 | w_1 |
|--------|---------|-----------|---------|-----------|--------|
| RT64HC | 63,8833 | 0,3045 | 64,3470 | 0,9993 | 0,3958 |

Tab. 3 Přehled vypočtených parametrů pro tuhnutí

| | μ_{1c} | β_{1c} | μ_{2c} | β_{2c} | w_{1c} |
|--------|------------|--------------|------------|--------------|----------|
| RT64HC | 64,1890 | 0,4240 | 61,0487 | 0,6462 | 0,5924 |



Obr. 12 Modelovaný průběh $\xi(T)$ a $\tilde{c}_p(T)$ pro RT64HC

Z modelu lze rovněž spočítat rozdíl entalpií v určitém teplotním rozmezí okolo fázové změny. Tento rozdíl obsahuje jak latentní teplo, tak citelné teplo dodané materiálu. Jde tedy o celkovou měrnou energii, která se v materiálu naakumuluje. Výrobce uvádí jedinou hodnotu naměřenou kalorimetrem s přesností $\pm 7,5\%$. Model určuje rozdíl entalpií buď pro ohřev nebo pro ochlazování materiálu (přechod teplotním rozmezí oběma směry). Tyto hodnoty se liší v řádu desetin. Výsledná vypočtená hodnota je proto určena jako aritmetický průměr. Z porovnání hodnot v Tab. 4 je patrné, že model i v tomto ohledu odpovídá realitě.

Tab. 4 Porovnání rozdílu entalpií

| Materiál | Teplotní rozmezí | Rozdíl entalpií udávaný výrobcem $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ | Rozdíl entalpií vypočtený z modelu $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ |
|----------|------------------|---|---|
| RT64HC | 57°C - 72°C | 250 | 248,37 |

2.2. Modely částečné fázové změny

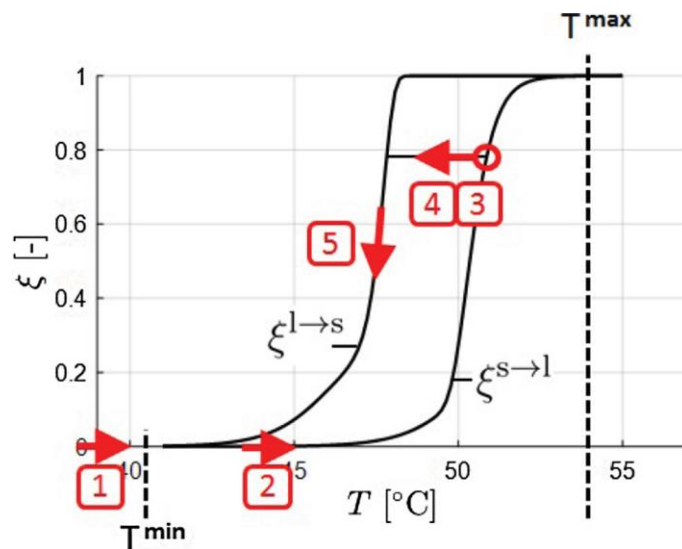
V praxi, při provozu akumulátoru tepla s PCM, může ovšem nastat situace, kterou předešlé modely nedokážou popsat. Fázová změna totiž nemusí proběhnout celá. Ku příkladu, u tání nebude možné dodat dostatek tepelné energie, aby materiál změnil skupenství kompletně. Načež se již pracovní cyklus posune a z části roztáté PCM začne opět tuhnout. Je tedy potřeba aplikovat model, který dokáže tyto situace zachytit s dostatečnou přesností. Všechny zde uvedené modely jsou definovány pro závislost podílu kapalné fáze ve směsi ξ .

První dva modely částečné fázové změny využívají hodnot z modelu pro úplnou fázovou změnu, jsou tedy jen jakousi „nadstavbou“. Zároveň jde o modely statické. Neuvažujeme

tedy vliv rychlosti změny teploty a platí, že $\xi = \xi(T)$. Pro křivku popisující kompletní tání je použito označení $\xi^{s \rightarrow l}$, pro kompletní tuhnutí $\xi^{l \rightarrow s}$. [11][20]

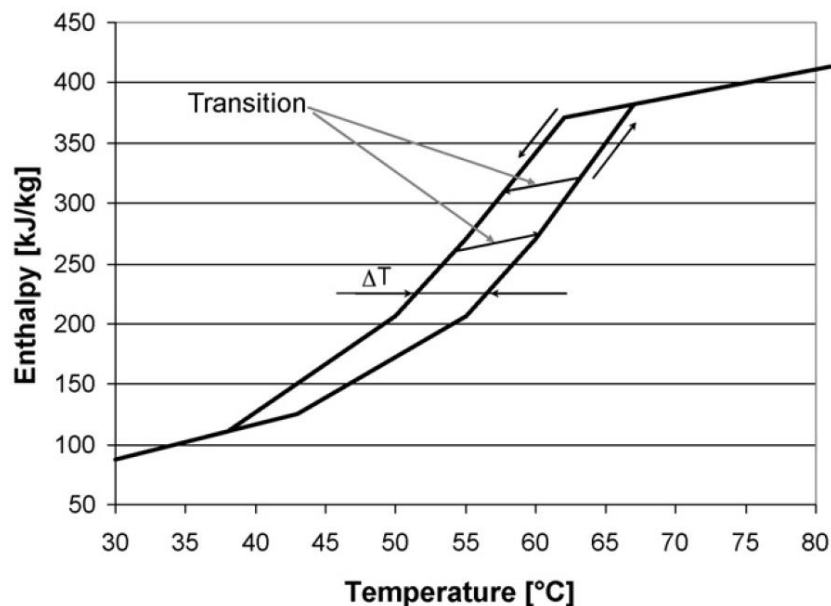
2.2.1. Úsečkový model

Principem modelu je přechod mezi křivkami $\xi^{s \rightarrow l}(T)$ a $\xi^{l \rightarrow s}(T)$ po úsečkách s konstantním $\xi(T)$. Pokud tedy fázová změna začíná pod teplotou T_{min} , jak je vidět na Obr. 13, postupuje nejprve pro rostoucí teplotu po křivce $\xi^{s \rightarrow l}(T)$. V bodě 3 ovšem dojde ke změně směru teploty z ohřevu na chlazení. Model proto začne pro klesající T držet konstantní ξ , dokud se nepotká s křivkou $\xi^{l \rightarrow s}(T)$ a nepřeskočí na ni. Pokud by zase začala teplota stoupat, model bude muset konstantně přejít na křivku $\xi^{s \rightarrow l}(T)$ a teprve potom začne podíl kapalné fáze ve směsi narůstat. [11]



Obr. 13 Úsečkový model [11]

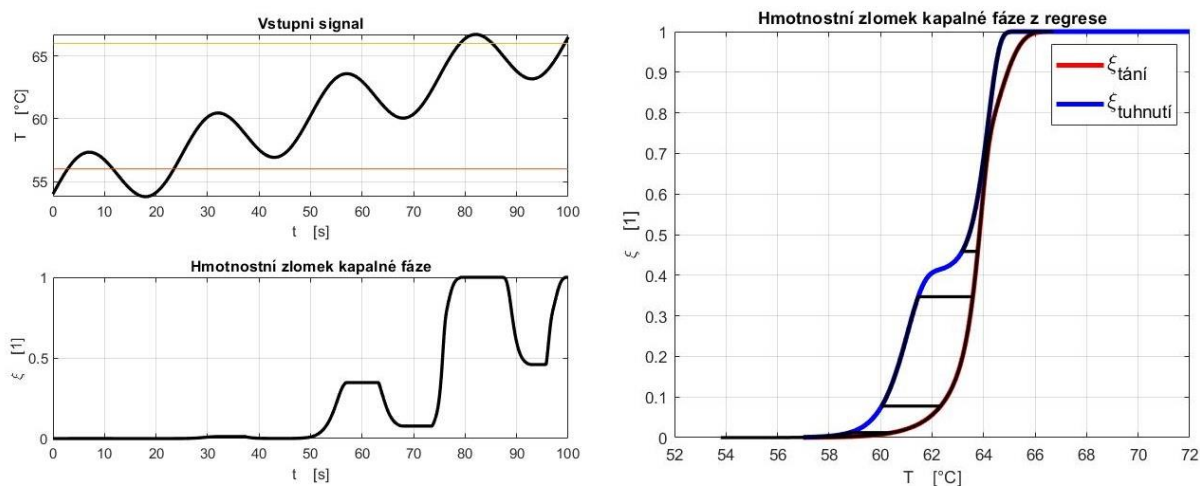
Původními autory této myšlenky jsou Bony a Citherlet, kteří v článku [21] popsali totéž, pouze pro závislost $h(T)$. Za předpokladu, že platí $c_p^s = c_p^l$, se přechody mezi $h^{s \rightarrow l}(T)$ a $h^{l \rightarrow s}(T)$ projeví jako lineární úsečky pod stejným sklonem, jaký má $h(T)$ mimo oblast fázové změny. Neboli pro přechod platí, že: $\tilde{c}_p = c_p^s = c_p^l$, z čehož plyne, že: $\frac{d\xi}{dT} = 0, \xi = konst.$



Obr. 14 Úsečkový model v grafu $h(T)$ [21]

Pro správnou funkci úsečkového modelu je nutné, aby se křivky kompletní fázové změny neprotínaly. V opačném případě dojde v modelu k nespojitostem.

Praktická ukázka modelu byla opět provedena na materiálu RT64HC [15]. Byla simulována odezva na vstupní časovou závislost teploty na čase.



Obr. 15 Použití úsečkového modelu na RT64HC

2.2.2. Měřítkový model

Tento model, představený autory Barzem a Sommerem v [20] a rozvinutý v práci [11] opět využívá modelů kompletní změny $\xi^{s \rightarrow l}(T)$ a $\xi^{l \rightarrow s}(T)$. Z nich je aktuální stav PCM v každém časovém kroku určen v měřítku, které se odvíjí od posledního bodu, při kterém došlo ke změně z ohřevu na chlazení či obráceně. Pro takový bod se ukládá jeho teplota T_z

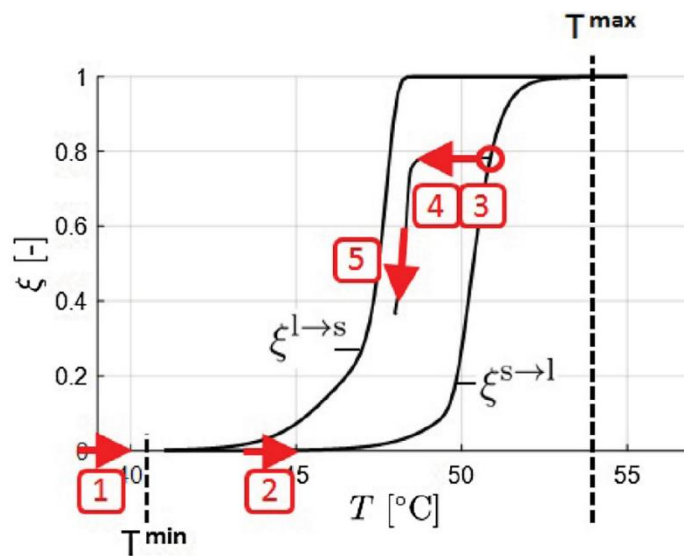
a hmotnostní podíl kapalné fáze $\xi_z = \xi(T_z)$. Tyto hodnoty jsou používány až do další změny, při které dojde k jejich přepsání.

Potom lze křivku pro jakýkoli ohřev ($\text{sgn}\left(\frac{dT}{dt}\right) \geq 0$) popsat jako:

$$\xi(T) = 1 - \frac{1 - \xi_z}{1 - \xi^{s \rightarrow l}(T_z)} \left(1 - \xi^{s \rightarrow l}(T)\right) \quad (13)$$

Křivku pro jakékoli chlazení ($\text{sgn}\left(\frac{dT}{dt}\right) < 0$):

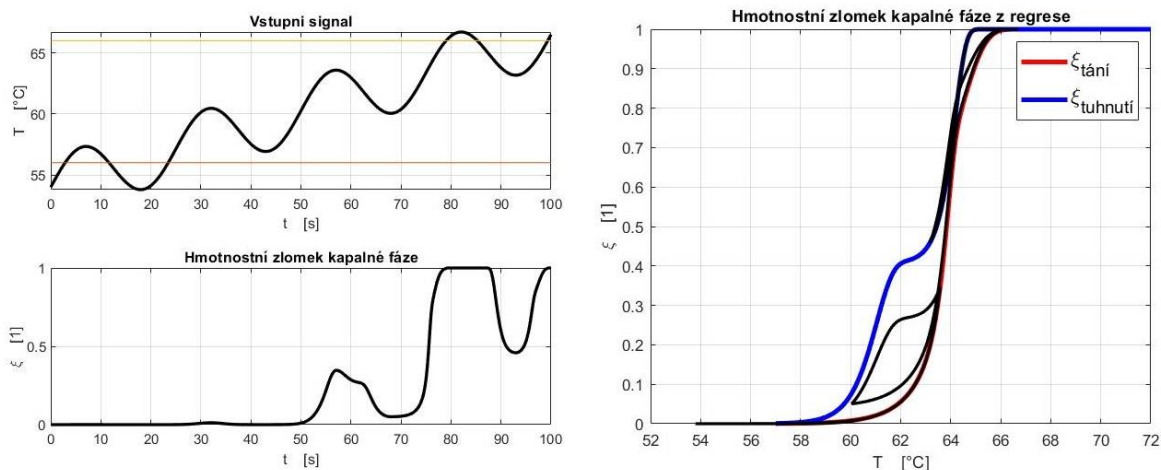
$$\xi(T) = \frac{\xi_z}{\xi^{l \rightarrow s}(T_z)} \xi^{l \rightarrow s}(T) \quad (14)$$



Obr. 16 Měřitkový model [11]

Barz a kolektiv v [11] ukazují, že měřítkový model přesněji vystihuje reálné chování PCM materiálů. Ve své studii provedli šest měření na experimentálním zařízení a z výsledků plyne, že měřítkový model vykazoval mnohem lepší shodu než výše uvedený model úsečkový. Průměrná odchylka od naměřených dat se snížila o 53 %. Nevýhodou modelu je ovšem delší výpočtový čas. Úsečkový model je navíc odzkoušen a používán v mnoha komerčních programech, což se o měřítkovém modelu říct zatím nedá.

Použití měřítkového modelu na RT64HC [15] vypadá následovně:

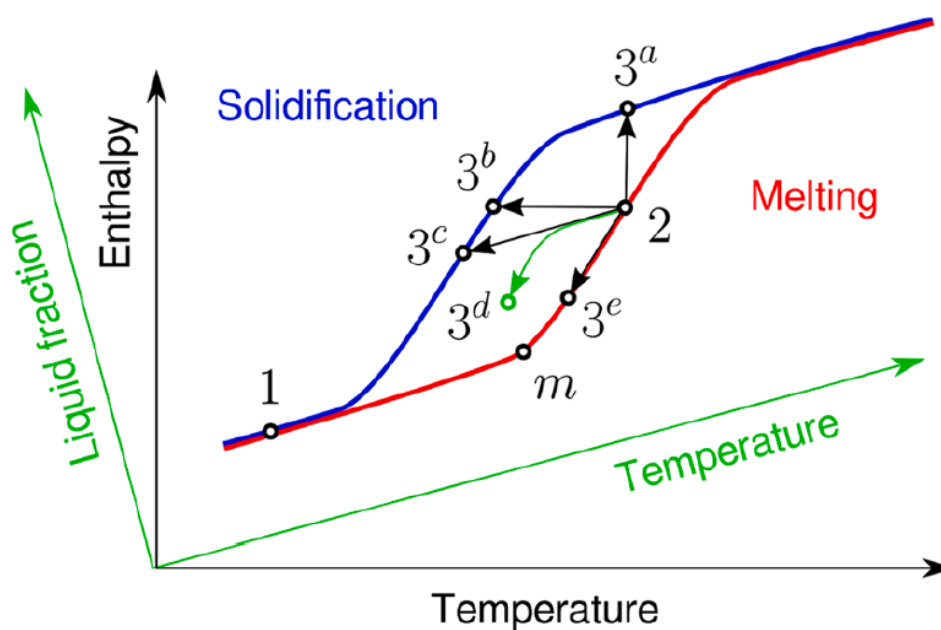


Obr. 17 Použití měřítkového modelu na RT64HC

Je patrné, že použitím měřítkového modelu nevznikají nespojitosti v závislostech ξ na T či t .

2.2.3. Další statické modely

Statických modelů částečné fázové změny je v literatuře uvedeno více. Kromě úsečkového a měřítkového je již nebudu dopodrobna rozebírat, většinou se jedná o obdoby prvního uvedeného. Článek [22] nabízí přehled a porovnání jednotlivých modelů, které je graficky zachyceno na Obr. 18. Bod 3^d označuje měřítkový model, bod 3^c model úsečkový.



Obr. 18 Porovnání modelů částečné fázové změny [22]

2.2.4. Dynamický model

Všechny předešle uvedené modely byly modely statickými, tedy platilo, že ξ je pouze funkcí teploty a stav PCM nezávisí na rychlosti změn, které v systému probíhají. V realitě ovšem toto zjednodušení neplatí, zejména při rychlých změnách PCM nestíhá přizpůsobovat svůj stav nekonečně rychle. Pro příklad v této práci tedy uvádím i model dynamický, publikovaný v článku [20], který se snaží popsat a aproximovat mikromechanismy omezující rychlost fázové změny, například nukleaci a růst zárodků při tuhnutí.

Matematický popis takového chování vede na diferenciální rovnice a řešení počáteční (Cauchyho) úlohy. Jedním z možných tvarů dynamického modelu fázové změny PCM je:

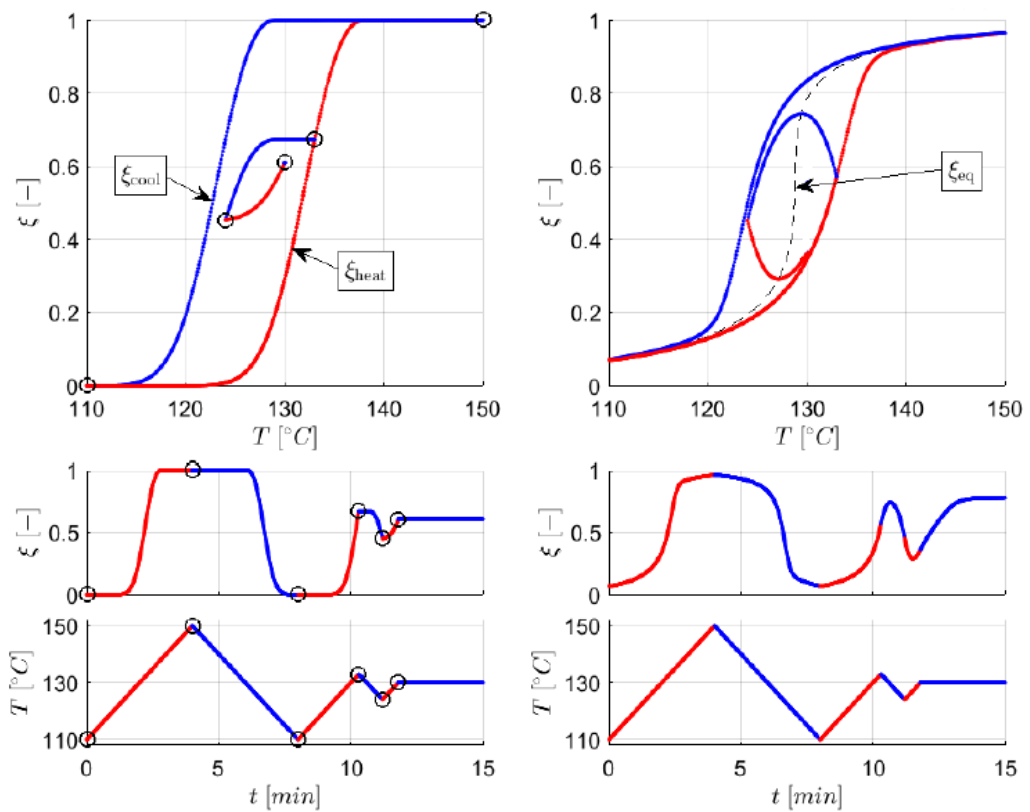
$$\begin{aligned}\frac{d\xi}{dt} &= k^{s \rightarrow l}(T) \cdot f^{s \rightarrow l}(1 - \xi) - k^{l \rightarrow s}(T) \cdot f^{l \rightarrow s}(\xi) \\ \xi_0 &= \xi(T_0)\end{aligned}\tag{15}$$

kde $k(T)$ a $f(\xi)$ jsou rychlostní a reakční funkce. Index $s \rightarrow l$ značí opět tání, $l \rightarrow s$ tuhnutí.

Po delším čase ustálení teploty ($\frac{dT}{dt} \rightarrow 0$) se hmotnostní podíl kapalné fáze dostává na rovnovážnou, ustálenou hodnotu ξ_r , pro kterou platí:

$$0 = k^{s \rightarrow l}(T) \cdot f^{s \rightarrow l}(1 - \xi_r) - k^{l \rightarrow s}(T) \cdot f^{l \rightarrow s}(\xi_r)\tag{16}$$

Autoři modelu popisují i způsob sestavení funkcí $k(T)$ a $f(\xi)$, klade se zejména důraz na to, aby jejich volba nezpůsobila porušení monotónnosti závislosti $\xi_r(T)$.



Obr. 19 Porovnání měřítkového (vlevo) a dynamického (vpravo) modelu [20]

Na Obr. 19 je vyznačeno porovnání chování měřítkového a dynamického modelu. Z hlediska porovnání s experimentálními daty dosáhly autoři u dynamického modelu dokonce lepších výsledků a podobných výpočtových časů. Bohužel za cenu toho, že pro určení parametrů dynamického modelu nelineární regresí byly použity přímo naměřené průběhy konkrétní úlohy. Na rozdíl od měřítkového modelu, u kterého lze vystačit pouze s daty dodanými výrobcem. [20]

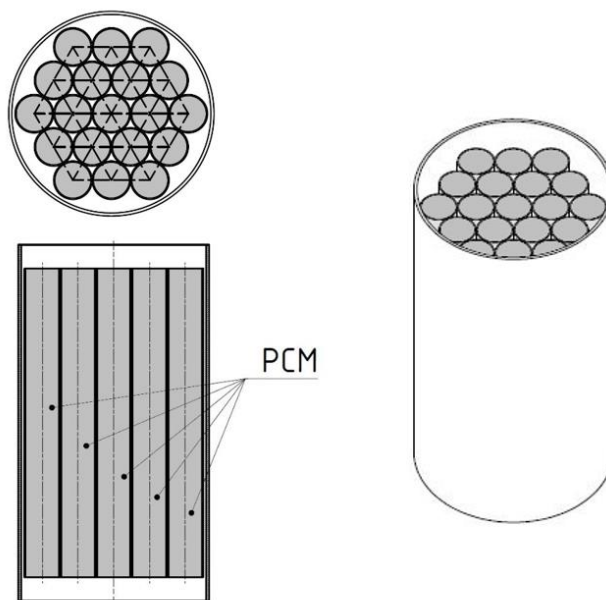
Pro predikci chování PCM a latentních akumulátorů se tak z hlediska dosažitelné přesnosti jeví jako nejlepší právě model měřítkový.

3. Modelování hysterezního chování latentního akumulátoru

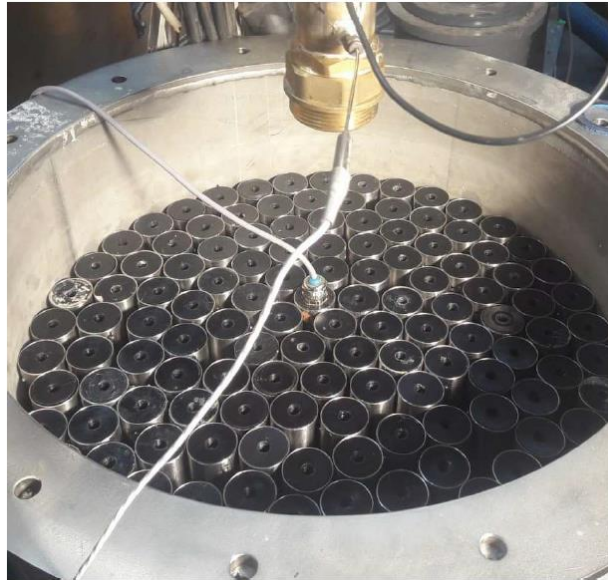
Modely fázové změny PCM je potřeba implementovat do poskytnutého numerického modelu akumulátoru, jehož experimentální verze vznikla v laboratoři Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky na Fakultě strojní ČVUT.

3.1. Stručný popis akumulátoru

Jak bylo již zmíněno v úvodu práce, tepelný akumulátor je navržen po vzoru tepelných výměníků. PCM je zapouzdřeno v úzkých trubicích, které jsou naskládány ve vnějším pouzdru tím způsobem, že v příčném řezu akumulátorem tvoří jejich osy vrcholy rovnostranných trojúhelníků. Limitní případ, kdy jsou trubky natěsnány tak, že se dotýkají, je zobrazen na Obr. 20. Na Obr. 21 je zachycen pohled dovnitř otevřeného experimentálního akumulátoru na naskládaná válcová pouzdra s PCM.



Obr. 20 Schéma hlavní části akumulátoru



Obr. 21 Naskládané tyče s PCM v experimentálním zařízení [23]

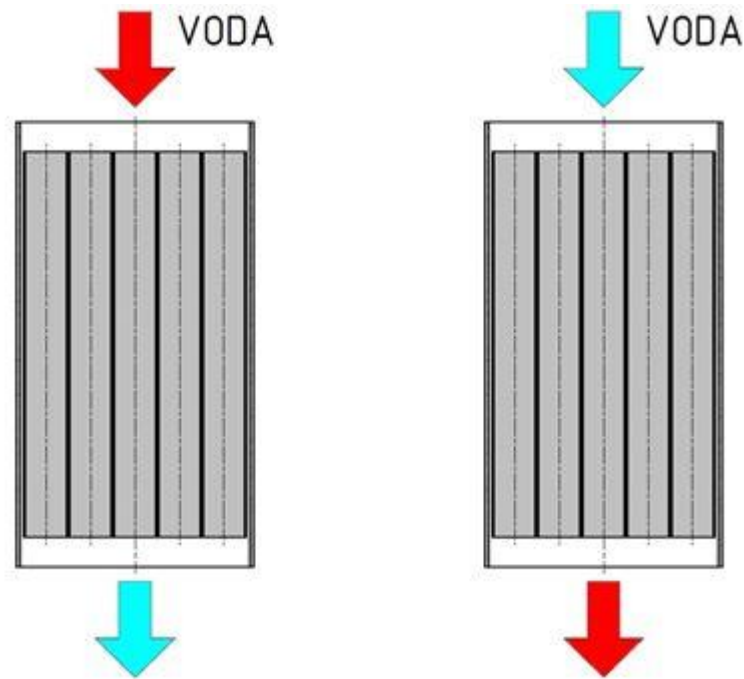
Dovnitř pláště je přiváděna voda jako teplotnosné médium. Ta prouděním v akumulátoru mezi trubicemi s PCM buď přijímá nebo odevzdává teplo, podle toho, zda se soustava zrovna nachází v režimu vybíjení nebo nabíjení.

a) Nabíjení akumulátoru

V tomto režimu proudí do akumulátoru voda ohřátá od průchodu zdrojem tepla (např. solárním kolektorem). Toto získané teplo předává do PCM, které se ohřívá. Pokud je dodané množství tepla dostatečné, dojde k postupnému roztavení PCM.

b) Vybíjení akumulátoru

Před začátkem vybíjení je většinou PCM roztavené a má teplotu vyšší, než je teplota okolí. Jakmile je potřeba teplo odvést na místo potřeby, do akumulátoru začne proudit chladná voda, průchodem získá teplo od PCM a odchází zahřátá. Při přechodu přes teplotní rozmezí fázové změny PCM postupně tuhne.



Obr. 22 Režimy nabíjení (vlevo) a vybíjení (vpravo)

3.2. Poskytnutý výpočtový model akumulátoru

Výpočtový model akumulátoru byl vytvořen doc. Ing. Tomášem Hyhlíkem, Ph.D. v prostředí MATLAB.

Místo zdlouhavého výpočtu přes všechny trubky s PCM provádí model všechny operace na poloměru jedné referenční trubky. Toto zjednodušení je možné uvažovat díky symetrii uložení trubek do rovnostranných trojúhelníků, při zanedbání rozdílnosti trubek okrajových.

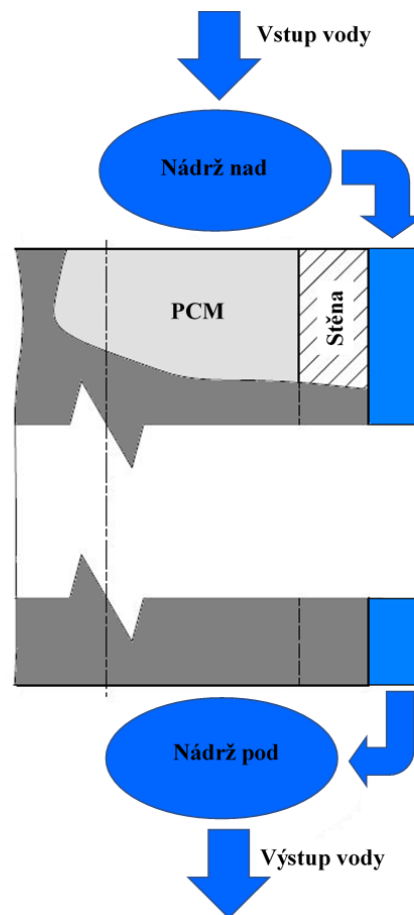
Vstupem do modelu jsou počáteční a okrajové podmínky, které určují stav modelu.

Jde o:

- 1) Počáteční teplotu PCM v celém objemu - T_{PCM_0}
- 2) Teplotu vody vstupující do akumulátoru (je funkcí času) - $T_{voda_{vstup}}(t)$
- 3) Hmotnostní tok vody vstupující do akumulátoru - \dot{m}_{voda}
- 4) Parametr nazvaný „Ohřev“, který určuje, zda jde o nabíjení akumulátoru ($Ohřev = 1$) nebo o vybíjení akumulátoru ($Ohřev = 0$)

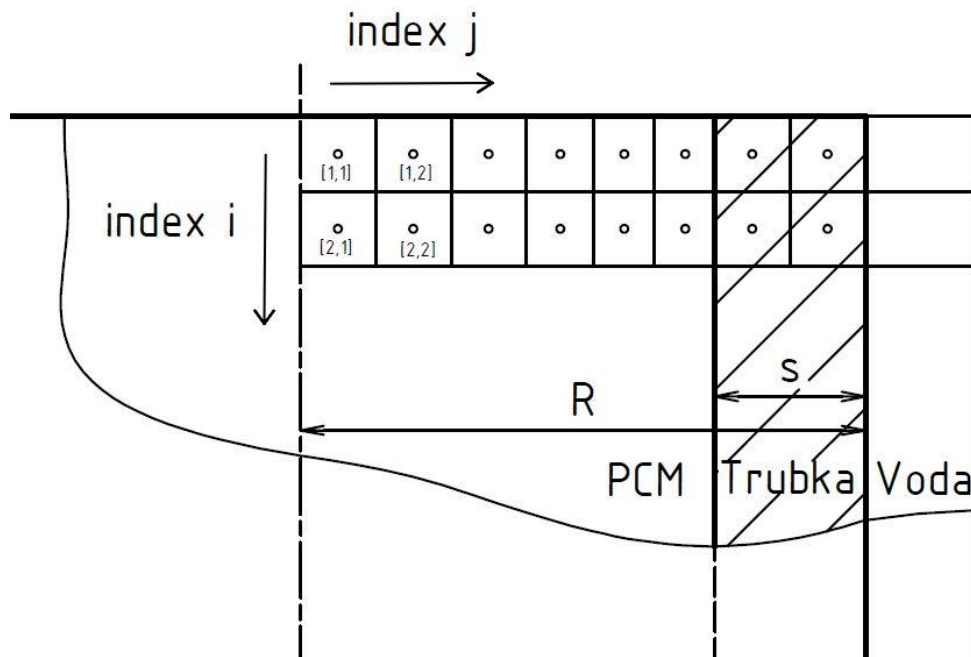
Schéma průtoku vody modelem je zobrazeno na Obr. 23. Vstupující voda nevtéká hned mezi trubky, nýbrž vstupuje do prostoru, který je v modelu pojmenován jako „nádrž“. V realitě sice nejde o oddělenou nádobu, jak je zobrazeno na diagramu, nýbrž o prostor nad trubkami přímo v akumulátoru. Funkce ale zůstává stejná, dochází zde k rozvedení vody z přívodu do celého průřezu akumulátoru a k mísení vtékající vody s vodou již přítomnou. Z nádrže voda pak pokračuje prostorem podél trubky, kde dochází k výměně tepla s PCM

přes stěnu trubky. Dole opět dochází k mísení vody v prostoru pod trubkami a následnému výstupu z akumulátoru.



Obr. 23 Schéma průtoku vody modelem

Dle zadaných parametrů je na ploše modelu (poloměru jedné trubky s PCM) vytvořena výpočtová síť. Naznačení prvních dvou řádků sítě je na Obr. 24. Prostor s PCM a stěna trubky jsou rozděleny na buňky, jejichž poloha je dána dvěma indexy. Jeden běží po délce trubky ($i=1,2,\dots,m$) a jeden kolmo ($j=1,2,\dots,j_{stěna},\dots,n$). Buňky, pro které platí $j = j_{stěna}$, jsou posledními buňkami PCM v kolmém směru. Pro $j > j_{stěna}$ už se buňky nacházejí ve stěně trubky. V blízkosti stěny trubky bylo voleno zjemnění sítě, tedy postupné zmenšení šířky buněk v PCM.



Obr. 24 Naznačení výpočtové sítě modelu

Ke každému řádku přísluší i jedna buňka představující objem vody nacházející se zrovna u dané oblasti stěny trubky.

Hlavním cílem výpočtu je určit teplotní pole v akumulátoru $T(i, j, k)$. Podle indexů tedy jde o teplotu v každém bodu sítě (indexy i, j) a v každém časovém kroku (k). Pokud celkový počet časových kroků označíme jako K , teplotní pole má velikost $T(m, n, K)$. Pro danou hodnotu k postupuje výpočet po řádcích (po délce trubky). V těžištích buněk daného řádku jsou určeny hodnoty hustoty ρ a efektivní měrné tepelné kapacity \tilde{c}_p . Na hranicích buněk jsou počítány hodnoty tepelné vodivosti λ . Na základě těchto veličin, spolu se součinitelem přestupu tepla α mezi trubkou a vodou, je možné pomocí iterací určit jak příslušné hodnoty $T_{i,j}(k)$, tak teplotu příslušného dílku vody $T_{voda_i}(k)$. Ta je funkcí teploty na přilehlé stěně trubky, teploty vody přicházející z horní nádrže a teploty vody v daném místě z předchozího okamžiku.

Pro daný časový krok k se určí i výsledná teplota vody vytékající z akumulátoru $T_{voda_{out}}(k)$. Ta je použita pro výpočet tepelného toku připadajícího na jednu trubku:

$$\dot{Q}_{tr}(k) = \dot{m}_{voda_{tr}} \cdot c_{voda} \cdot (T_{voda_{out}}(k) - T_{voda_{vstup}}(k)) \quad (17)$$

kde: $\dot{m}_{voda_{tr}}$ je hmotnostní tok vody připadající na jednu trubku
 c_{voda} je měrná tepelná kapacita vody
 $T_{voda_{vstup}}(k)$ je teplota vody vstupující do akumulátoru v daném čase

Ze získaného teplotního pole $\mathbf{T}(i, j, k)$ je následně dopočítáno:

a) pole hmotnostního zlomku kapalné fáze PCM $\xi(i, j, k)$ – jelikož nemá smysl počítat pro buňky ve stěně trubky, reálných hodnot nabývá jen pro $j \leq j_{Stěna}$

- při nabíjení akumulátoru se použije křivka popisující tání $\xi^{s \rightarrow l}(T)$
- při vybíjení akumulátoru se použije křivka popisující tuhnutí $\xi^{l \rightarrow s}(T)$
- pro popis křivek $\xi^{s \rightarrow l}(T)$ a $\xi^{l \rightarrow s}(T)$ zvolil doc. Hyhlík Barzův model úplné fázové změny, využívající kombinace dvou Gumbelových distribučních funkcí (koeficienty modelu je třeba stanovit předem, regresí z dat poskytnutých výrobcem)

b) pole entalpie $\mathbf{h}(i, j, k)$ – výpočet je rozdílný pro buňky v PCM a pro buňky ve stěně trubky

- výpočet pro buňky v PCM ($j \leq j_{Stěna}$)

$$h_{i,j}(k) = c_{p_{i,j}}(k) \cdot (T_{i,j}(k) - T_0) + \xi_{i,j}(k) \cdot \Delta h_t \quad (18)$$

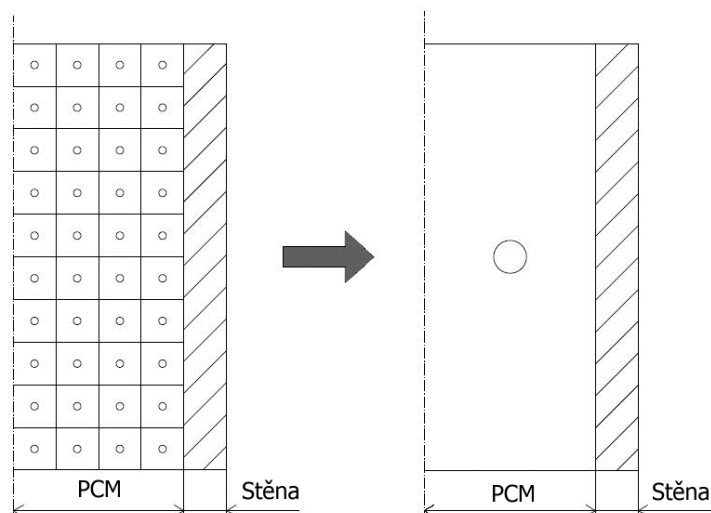
kde $T_0 = 273,15$ K, Δh_t je měrné skupenské teplo PCM a $c_p = c_p^s = c_p^l$

- výpočet pro buňky ve stěně trubky ($j > j_{Stěna}$)

$$h_{i,j}(k) = c_{tr} \cdot (T_{i,j}(k) - T_0) \quad (19)$$

kde c_{tr} je měrná tepelná kapacita trubky

Integrací po poloměru a sečtením přes řádky jsou získány celkové hodnoty pro celou trubku pro daný časový krok. Model takto určuje celkovou entalpii PCM a trubky, celkovou entalpii vody a celkový objem kapalné fáze PCM. Tyto hodnoty jsou počítány zejména kvůli zjednodušení a vizualizaci výsledků, nicméně mohou sloužit i v dalším zjednodušení modelu akumulátoru. Jeho podstatou je nahrazení sítě diskretních bodů v PCM jedním bodem, ve kterém by se soustředily takové hodnoty fiktivních parametrů, aby chování akumulátoru bylo zachováno, tedy aby celkové tepelné účinky zůstaly stejné.



Obr. 25 Schématické znázornění myšlenky zjednodušení modelu

Z integrovaných hodnot můžeme jako jeden z těchto fiktivních parametrů přímo využít střední měrnou entalpii PCM $h_{ave_{PCM}}(k)$. Ta se určí jako:

$$h_{ave_{PCM}}(k) = \frac{H_{PCM}(k)}{m_{PCM}} \quad (20)$$

kde: $H_{PCM}(k)$ je celková entalpie PCM v jedné trubce v daném čase
 m_{PCM} je hmotnost PCM v jedné trubce

Problém nastává, pokud chceme celý objem PCM v trubce popsat jedinou teplotou. Bohužel není možné pouze spočítat aritmetický průměr teplot v bodech výpočtové sítě. Měrná entalpie určená z průměrné teploty by se lišila od hodnoty $h_{ave_{PCM}}(k)$. Proto je pro účely modelu vytvořen koncept střední teploty PCM v trubce - $T_{ave_{PCM}}$.

V každém časovém kroku (pro každé k) je tedy nutné najít takovou hodnotu $T_{ave_{PCM}}(k)$, aby se měrná entalpie PCM o této teplotě co nejvíce blížila hodnotě $h_{ave_{PCM}}(k)$. Výpočet entalpie ale závisí i na aktuálním hmotnostním podílu kapalné fáze PCM, který je rovněž závislý na teplotě, navíc přes složitý nelineární vztah. Ve výsledku to znamená, že hodnotu $T_{ave_{PCM}}(k)$ je sice možné najít, ale za cenu hledání minima nelineární rovnice v každém kroku.

Jak je patrné ze zavedení parametru $Ohřev$, původní model předpokládá monotónní vývoj v průběhu celého časového intervalu. Pokud bylo před výpočtem nastaveno $Ohřev = 1$, předpokládalo se, že po celou dobu bude akumulátorem proudit voda teplejší než PCM, bude do něj teplo dodávat a teplota PCM poroste. Naopak pro $Ohřev = 0$ se předpokládalo ochlazování PCM.

Z hlediska vlastností PCM pracuje tedy původní model pouze s modelem úplné fázové změny. Pro $Ohřev = 1$ tedy půjde o tání PCM, $Ohřev = 0$ indikuje tuhnutí. Od toho se dále odvíjejí vztahy pro výpočet chování PCM.

3.2.1. Vzorová úloha

Pro možnost pozdějších porovnání původního modelu s upravenými variantami byla odsimulována vzorová úloha chování fiktivního akumulátoru.

Akumulátor:

- 1000 natěsno naskládaných trubek TR 30 x 1–720
- PCM: Rubitherm SP31 – data pro regresi poskytnutá výrobcem [15]

Počáteční a okrajové podmínky:

- 1) Počáteční teplota PCM: $T_{PCM_0} = 45 \text{ °C}$
- 2) Teplota vody vstupující do akumulátoru: $T_{voda_{vstup}} = 15 \text{ °C}$ (konstantní)
- 3) Hmotnostní tok vody vstupující do akumulátoru $\dot{m}_{voda} = 5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- 4) $Ohřev = 0$

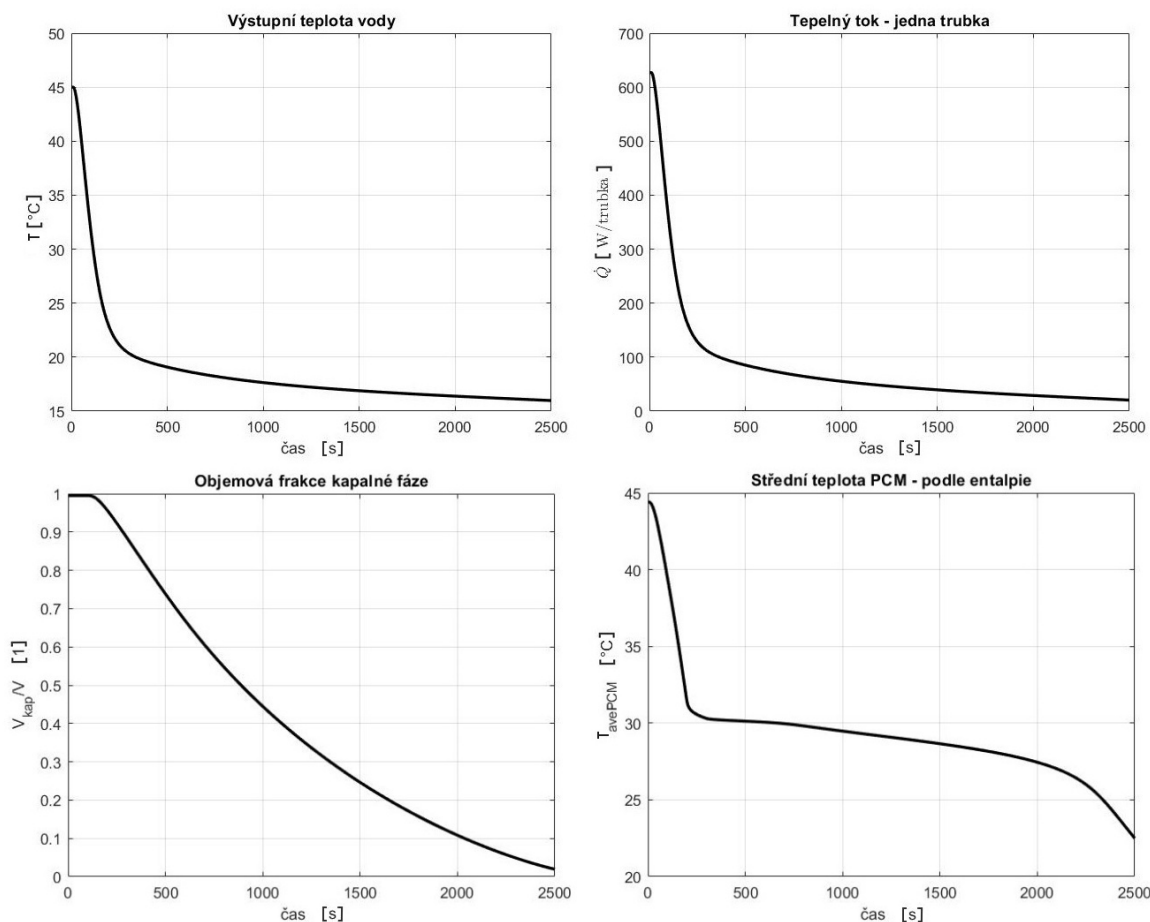
Doba simulace: 2500 s

Výpočtová síť:

- 100 dílků po délce trubky, 80 dílků po poloměru (z toho 17 ve stěně trubky)

Výsledky:

- Výpočtový čas: 1166 s
- Získané teplo: $1,9496 \cdot 10^8 \text{ J} = 54,16 \text{ kWh}$



Obr. 26 Přehled výsledků původního modelu pro vzorovou úlohu

3.3. Úpravy modelu pro možnost simulování částečné fázové změny

Jak bylo popsáno v kapitole 2.2, v praxi nemusí vždy fázová změna probíhat monotónně. V těchto situacích není možné z důvodu hysterezního chování PCM pouze přepnout parametr *Ohřev* a přejít tak přímo z křivky $\xi^{s \rightarrow l}(T)$ na $\xi^{l \rightarrow s}(T)$ či obráceně. Je potřeba do výpočtového modelu zapracovat model částečné fázové změny, který bude lépe vystihovat reálné chování PCM v akumulátoru.

Vzhledem k dobré dosažitelné přesnosti výsledků a schopnosti predikce bez konkrétních naměřených dat z akumulátoru byl zvolen model měřítkový.

3.3.1. Implementace do modelu akumulátoru

Doplnění původní funkce pro výpočet $\xi_{i,j}(k)$ o měřítkový model si vyžádalo změny ve více místech skriptu. První vyvstala při předefinování samotné funkce. Vstupy původní funkce byly pouze aktuální teplota $T_{i,j}(k)$ a parametr *Ohřev*, tedy:

$$\xi_{i,j}(k) = \xi(T_{i,j}(k), \text{Ohřev}) \quad (21)$$

V měřítkovém modelu ovšem v podmínkách vystupuje výraz $\text{sgn}\left(\frac{dT}{dt}\right)$, který je pro diskrétní systém nahrazen výrazem $\text{sgn}(T_{i,j}(k) - T_{i,j}(k - 1))$. Spolu s hodnotami popisujícími poslední bod změny tak vzrostl počet potřebných vstupů do funkce ze dvou na čtyři, tedy:

$$\xi_{i,j}(k) = \xi(T_{i,j}(k), T_{i,j}(k - 1), T_{z_{i,j}}, \xi_{z_{i,j}}) \quad (22)$$

Dodáním hodnoty $T_{i,j}(k - 1)$ do vzorce nastala nutnost rozšíření vlivu počátečních podmínek. Místo jejich aplikace pouze na první časový krok ($k = 1$), je nyní nutné jejich použití na první i druhý (tedy pro $k = [1,2]$). Zdůvodnění se skrývá v iteračním výpočtu řádku pole $T_{i,j}(k)$.

Tab. 5 Výběr z kódu pro iterační určení teplotního pole

| Vybrané části kódu | Popis |
|---|---|
| <code>T(1:m, 1:n, 1:2) =;</code> | Počáteční podmínky pro $k = [1,2]$ |
| <code>for k = 3:length(cas)</code> | Cyklus přes čas |
| <code>for i = 1:m</code> | Cyklus přes řádky sítě |
| <code>tOld = T_voda(i, k)+10; while (abs(T_voda(i, k) - tOld) > 1e-6) tOld = T_voda(i, k);</code> | Zavedení iterace cyklem while. Ten probíhá, dokud se změna hodnoty $T_{voda_i}(k)$ od posledního kroku nedostane pod toleranci. |
| <code>[aw, ap, ae, d] = MODELvlastnost.tvorMatici (T(i, 1:n, k-1), T(i, 1:n, k-2), T_voda(i, k),);</code> | Tvorba matice soustavy. Zde dochází k určení $\rho(\xi)$, $c_p(\xi)$, $\lambda(\xi)$ v buňkách řádku sítě. Navíc bylo ukázáno, že: $\xi_{i,j}(k) = \xi(T_{i,j}(k), T_{i,j}(k - 1), \dots)$ Jelikož $T_{i,j}(k)$ je cílem této iterace, určují se tyto parametry z minulého časového kroku. Tedy například: $\rho = \rho(\xi_{i,j}(k - 1)) =$ $= \rho(T_{i,j}(k - 1), T_{i,j}(k - 2), \dots)$ Pro krok $k = 3$ tak potřebujeme znát hodnoty $k = [1, 2]$. |
| <code>T(i, :, k) = TDMA solver(-aw, ap, -ae, d); T_voda(i, k) = ...</code> | Vlastní řešení teplotního pole v čase k a následný výpočet teploty vody v přilehlé buňce. |
| <code>end end end</code> | |

Tato úprava se ovšem neprojeví na celkovém řešení úlohy, jelikož model umožňuje volit nekonstantní velikost časového kroku. Na začátku úlohy je tak interval $(t(k+1) - t(k))$ zjemněn až na 0,01 s oproti nižším jednotkám sekund, které se využívají od času 20 s dále.

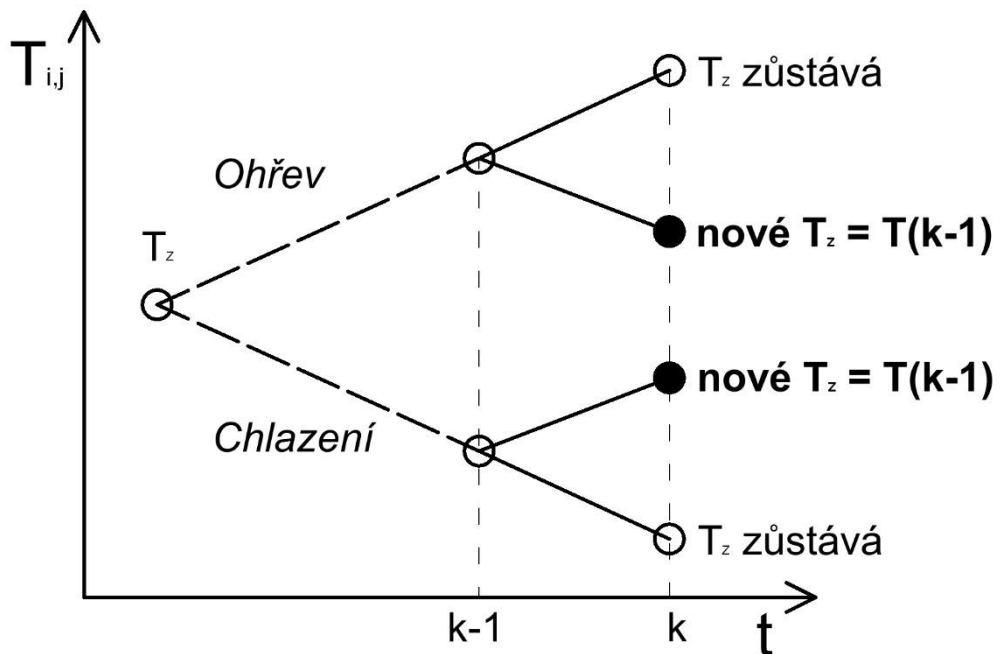
Jakmile pro daný čas k a řádek sítě i vyplynou z iterací hodnoty teplot $T_{i,j}(k)$, je nutné z nich určit hodnoty $\xi_{i,j}(k)$. Pro správnou funkci měřítkového modelu je ovšem nutné nejprve zkontrolovat všechny buňky řádku. Pokud by v některé z nich došlo ke změně z ohřevu na chlazení či obráceně, je nutné přepsat v dané buňce parametry $T_{z_{i,j}}, \xi_{z_{i,j}}$. K tomu slouží vytvořená funkce *kontrolaTz*.

$$\left[T_{z_{i,j}}, \xi_{z_{i,j}} \right] = \text{kontrolaTz} \left(T_{i,j}(k), T_{i,j}(k-1), \xi_{i,j}(k-1), T_{z_{i,j}}, \xi_{z_{i,j}} \right) \quad (23)$$

Tab. 6 Funkce kontrolaTz

| Vybrané části kódu | Poznámky |
|--|--|
| <code>function[vysledek_1, vysledek_2] = kontrolaTz(T, T1, zeta1, Tz, zetaTz)</code> | Zavedení funkce. Hodnoty ve vektoru <i>vysledek_1</i> odpovídají $T_{z_{i,j}}$ v daném řádku sítě, u <i>vysledek_2</i> odpovídají $\xi_{z_{i,j}}$. Vstupy funkce odpovídají vstupům v rovnici (23) ve stejném pořadí. |
| <code>vysledek_1 = Tz; vysledek_2 = zetaTz;</code> | Současné hodnoty (před kontrolou) se nahrají do <i>vysledek_1</i> a <i>vysledek_2</i> |
| <code>for i=1:length(T) if (T(i)-T1(i)<0 && T1(i)-Tz(i)>0) (T(i)-T1(i)>0 && T1(i)-Tz(i)<0)</code> | V každé buňce řádku se kontroluje, zda nedošlo ke změně z chlazení na ohřev či obráceně. |
| <code> vysledek_1(j) = T1(j); vysledek_2(j) = zeta1(j);</code> | Pokud došlo, přepíší se hodnoty v dané buňce známými hodnotami z posledního kroku: $T_{z_{i,j}} = T_{i,j}(k-1), \xi_{z_{i,j}} = \xi_{i,j}(k-1)$ |
| <code> End end end</code> | Pokud ne, zachovají se staré hodnoty $T_{z_{i,j}}$ a $\xi_{z_{i,j}}$. |

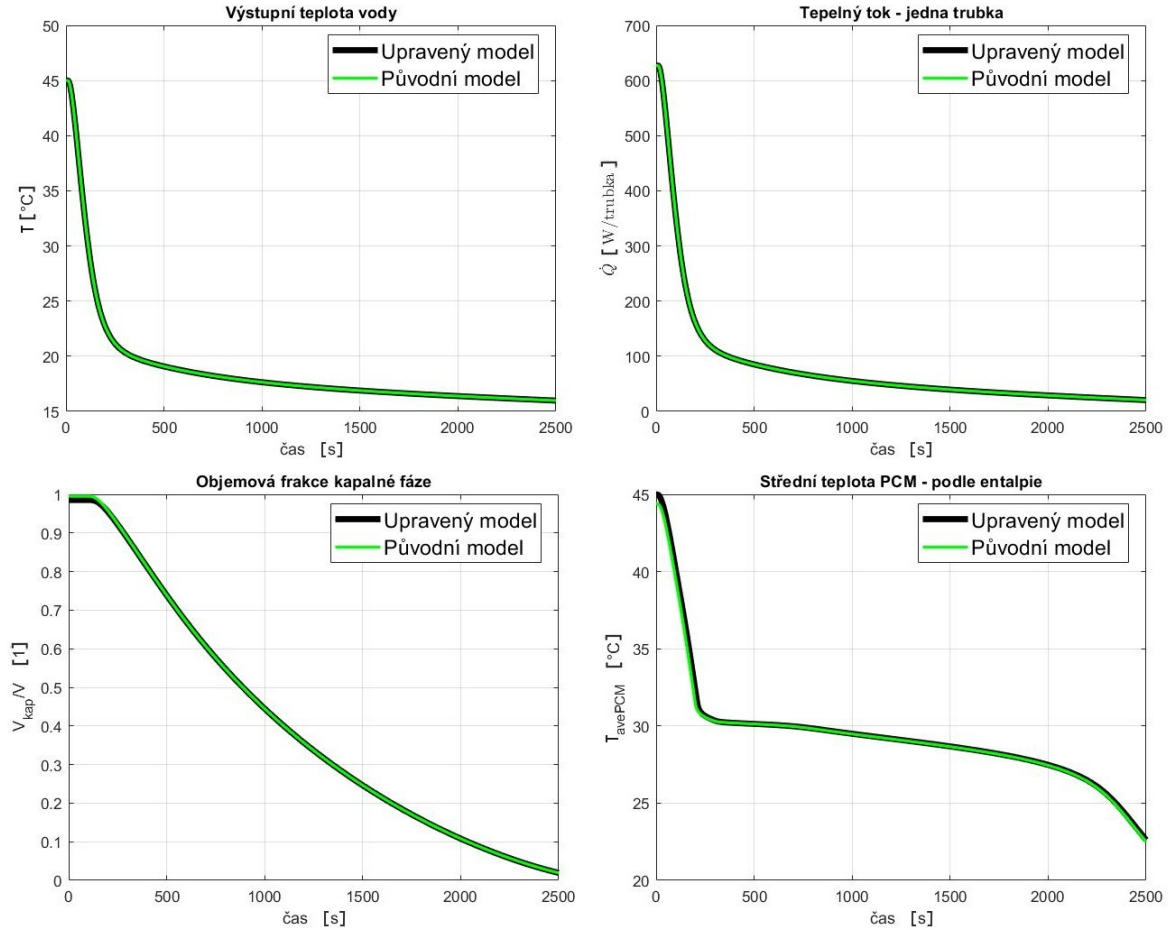
Grafické znázornění podmínek funkce pro obecnou buňku danou indexy $[i,j]$ je na Obr. 27. Plný bod v horní větvi zobrazuje změnu z ohřevu na chlazení, stejné vyobrazení ve spodní větvi indikuje změnu opačnou.



Obr. 27 Grafické znázornění principu funkce kontrola T_z

Po vypočtení celých polí \mathbf{T} a ξ se již stejným způsobem jako u původního modelu vypočítá pole \mathbf{h} .

Po odstranění všech chyb typu překlep bylo nutné zkontrolovat, zda upravený model pracuje v souladu s očekáváním. První nutnou podmínkou úspěšné úpravy je získání stejných výsledků pro monotónní změny jako z původního modelu. K tomu využijeme vzorovou úlohu vybíjení akumulátoru. Porovnání výsledných průběhů získaných z obou modelů je zobrazeno na Obr. 28.



Obr. 28 Porovnání řešení vzorové úlohy a) původním modelem (zeleně), b) upraveným modelem (černě)

Pro jeden z nejdůležitějších parametrů – podíl kapalné fáze v PCM ξ , respektive pro jeho objemovou variantu ξ_o (na Obr. 28 odpovídá grafu vlevo dole) byla určena průměrná odchylka dat.

$$s_{\xi_o} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left| \frac{\xi_{o_U}(k) - \xi_{o_P}(k)}{\xi_{o_P}(k)} \right| = 0,15 \% \quad (24)$$

kde: $\xi_{o_U}(k)$ je hodnota ξ_o v k-tém časovém kroku vypočtená z upraveného modelu
 $\xi_{o_P}(k)$ je hodnota ξ_o v k-tém časovém kroku vypočtená z původního modelu

Z vizuální kontroly i z velikosti odchylky s_{ξ_o} je patrné, že pro vzorovou úlohu dostáváme téměř identické řešení.

Dalším krokem (stále však pouze nutnou podmínkou), bylo otestování modelu na výpočtu libovolného nemonotónního chování akumulátoru. V průběhu výpočtu tak musí

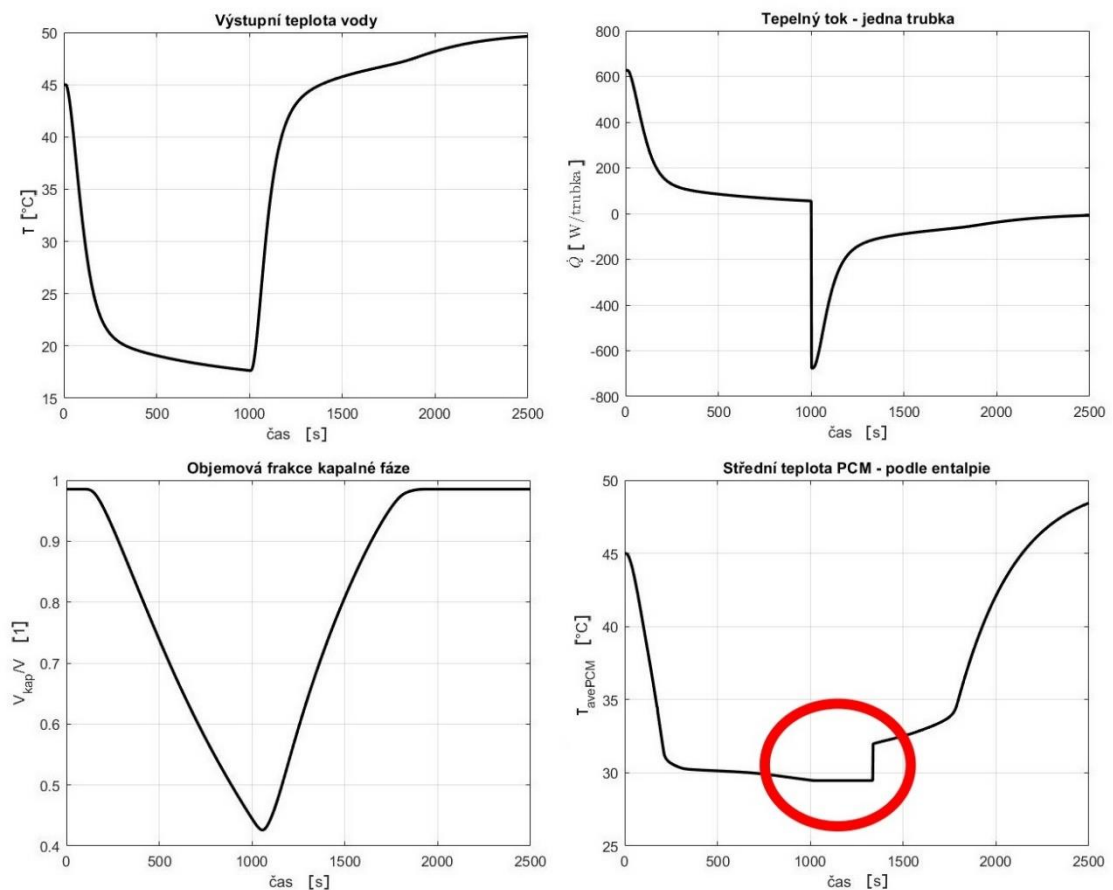
dojít vlivem změny teploty vstupující vody ke změně z vybíjení na nabíjení či obráceně. Za tímto účelem využijeme vzorovou úlohu a pouze modifikujeme vstup z:

$$T_{voda_{vstup}} = 15 \text{ °C (konstantní)} \quad (25)$$

na:

$$\begin{aligned} T_{voda_{vstup}} &= 15 \text{ °C (pro čas } t \leq 1000 \text{ s)} \\ T_{voda_{vstup}} &= 50 \text{ °C (pro čas } t > 1000 \text{ s)} \end{aligned} \quad (26)$$

Výsledné průběhy jsou zobrazeny na Obr. 29. Průběhy výstupní teploty vody $T_{voda_{vstup}}$, tepelného toku na jednu trubku \dot{Q}_{tr} a objemového podílu kapalné fáze PCM ξ_o , odpovídají představě o správném chování akumulátoru.



Obr. 29 Přehled výsledků upraveného modelu pro modifikovanou vzorovou úlohu

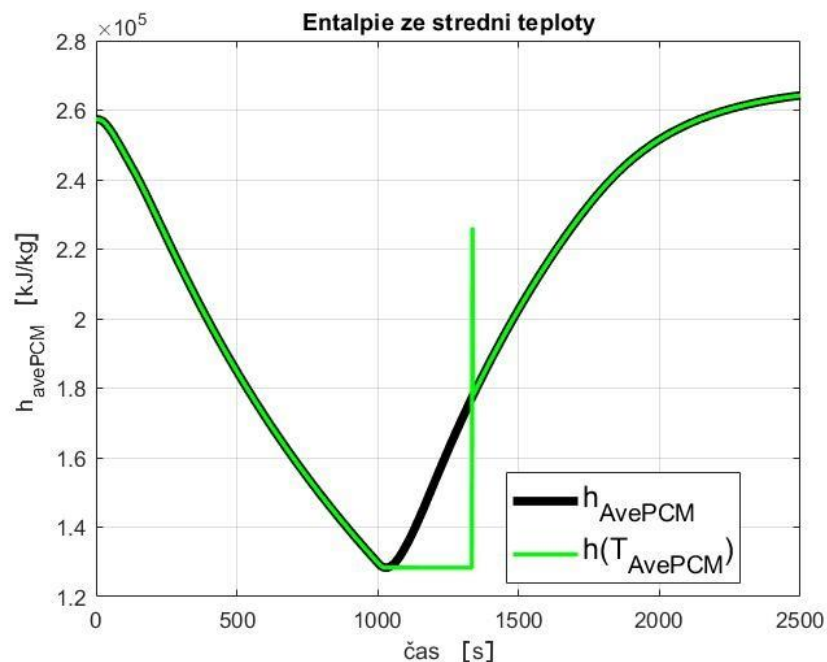
V čase $t = 1000$ s nastala změna z vybíjení akumulátoru na nabíjení. Výstupní teplota proto začne růst směrem k vstupní teplotě $T_{voda_{vstup}} = 50 \text{ °C}$. Zlom nastal rovněž pro tepelný tok. Pro $t < 1000$ s se akumulátor vybíjí, získané teplo má tedy kladnou hodnotu. V druhé části děje musí nutně dojít k převrácení do záporných hodnot, jelikož akumulátor

přijímá teplo od vody. Se snižujícím se teplotním rozdílem zároveň tepelný tok klesá. Průběh ξ_0 stejně jako u předchozích dvou veličin kopíruje až do času změny vzorovou úlohu. Poté dochází vlivem dodaného tepla k zvyšování podílu kapalné fáze.

Problém nastal při výpočtu střední teploty $T_{ave_{PCM}}$. Až do této chvíle byla pro určení hodnoty ξ vždy jedním ze vstupů do měřítkového modelu příslušná teplota (viz vztah (22)). V tomto případě ovšem iteračním řešičem hledáme pro každý časový krok právě teplotu $T_{ave_{PCM}}(k)$ takovou, aby byla řešením rovnice:

$$h(T_{ave_{PCM}}(k)) - h_{ave_{PCM}}(k) = 0 \quad (27)$$

Jelikož se navíc měřítkový model na základě průběhu teploty rozvětjuje na část pro ohřev (vztah (13)) a na část pro chlazení (vztah (14)), má iterační řešič problém nalézt řešení přechodu přes lokální extrém $T_{ave_{PCM}}$, ve kterých má dojít ke změně z jedné podmínky na druhou. Jakmile řešič nenajde uspokojivé řešení v daném časovém kroku, zapíše jako hodnotu počáteční odhad rovný $T_{ave_{PCM}}(k - 1)$, čímž v grafu na Obr. 29 vzniká rovná část. To samé lze pozorovat na Obr. 30, kde je zobrazeno porovnání průběhů $h(T_{ave_{PCM}})$ a $h_{ave_{PCM}}$. Při dostatečném rozdílu entalpií už dokáže řešič přeskočit do druhé podmínky. Tím vzniká nespojitost, rovněž pozorovatelná na obou grafech.



Obr. 30 Porovnání entalpií

Toto chování se nepodařilo odstranit ani použitím jiného řešiče nelineární rovnice, ani změnou počátečního odhadu, ani jiným nastavením tolerancí řešiče.

3.3.2. Úprava měřítkového modelu pro výpočet střední teploty

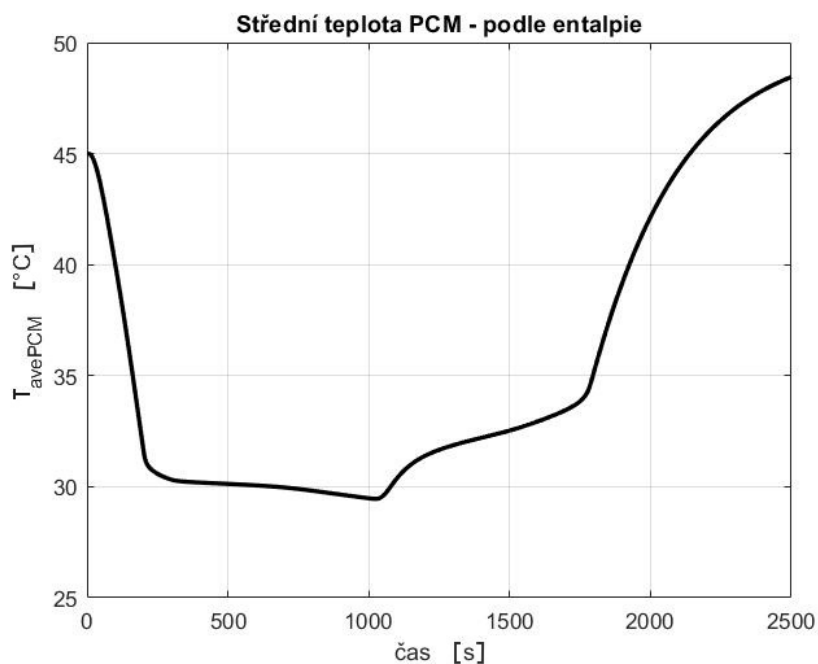
Za účelem získání kýženého průběhu střední teploty tak bylo nutné upravit samotný měřítkový model a předefinovat jej tak, aby rozvětvení výpočtu na ohřev a chlazení nezáviselo na aktuální teplotě $T_{ave_{PCM}}(k)$.

Do měřítkového modelu byl implementován parametr *Ohřev*, který byl v předchozích úpravách odstraněn z modelu akumulátoru. Význam parametru byl zachován, tedy hodnota $Ohřev = 1$ implikuje nabíjení akumulátoru, $Ohřev = 0$ vybíjení. Podmínky v měřítkovém modelu je pak možné nahradit:

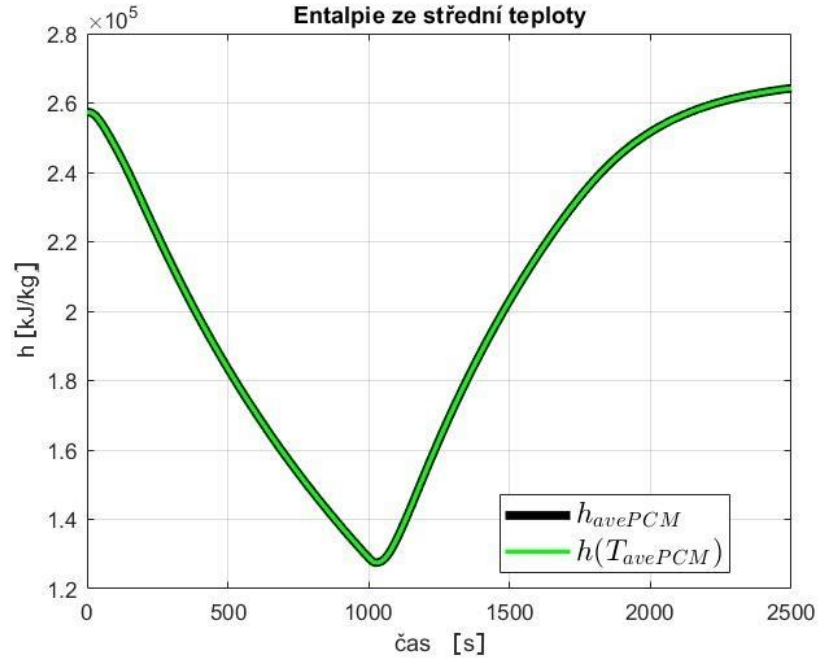
$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}\left(\frac{dT}{dt}\right) \geq 0 &\rightarrow Ohřev = 1 \\ \operatorname{sgn}\left(\frac{dT}{dt}\right) < 0 &\rightarrow Ohřev = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

Parametr *Ohřev* již ale není zadáván natvrdo jako počáteční podmínka. Jeho prvotní hodnota se stanoví z porovnání počáteční teploty PCM T_{PCM_0} a hodnoty $T_{voda_{vstup}}(t = 0 \text{ s})$. V dalších časových krocích je kontrolován funkcí *kontrolaTz*, která byla upravena tak, aby v případě změny kromě přepsání hodnot T_z a ξ_z změnila i hodnotu *Ohřev*.

Pomocí takto upraveného měřítkového modelu již získáme spojitý průběh střední teploty (viz Obr. 31), splňující rovnici (28). To je patrné na Obr. 32.



Obr. 31 Střední teplota – upravený měřítkový model

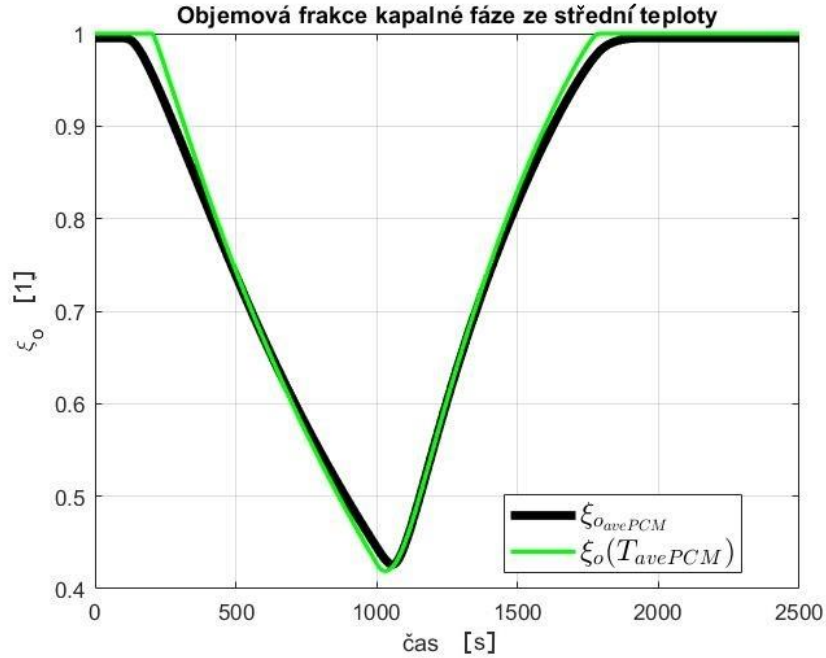


Obr. 32 Porovnání měrné entalpie získané a) integrací (černě), b) ze střední teploty (zeleně)

Střední teplota popisuje PCM jako jedinou buňku. V každém časovém okamžiku bylo pro potřeby měřítkového modelu navíc nutné vypočítat hmotnostní podíl kapalně fáze PCM této jediné buňky $\xi(T_{avePCM}(k))$. Pokud z něj pomocí přepočtového vztahu (29) určíme objemový podíl $\xi_o(T_{avePCM}(k))$, je možné jej porovnat s objemovým podílem získaným integrací přes všechny buňky velkého modelu $\xi_{o_{avePCM}}(k)$.

$$\xi_o = \frac{V^l}{V^c} = \frac{\frac{m^l}{\rho^l}}{\frac{m^l + m^s}{\rho^c}} = \xi \cdot \frac{\rho^c}{\rho^l} = \xi \cdot \frac{(\rho^l - \rho^s) \cdot \xi + \rho^s}{\rho^l} \quad (29)$$

kde: index l značí kapalnou fází PCM
index s značí pevnou fází PCM
index c značí celý objem PCM



Obr. 33 Porovnání ξ_o získaného a) integrací (černě), b) ze střední teploty (zeleně)

Průměrná odchylka průběhů na Obr. 33 je:

$$S_{\xi_{o_{ave}}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \left| \frac{\xi_o(T_{avePCM}(k)) - \xi_{o_{avePCM}}(k)}{\xi_{o_{avePCM}}(k)} \right| = 1,22 \% \quad (30)$$

kde: $\xi_o(T_{avePCM}(k))$ je hodnota ξ_o v kroku k vypočtená ze střední teploty
 $\xi_{o_{avePCM}}(k)$ je hodnota ξ_o v kroku k získaná integrací z mnohobuňkového modelu

Bohužel velikost této odchylky objemových podílů obecně závisí na konkrétní úloze, zejména u monotónních úloh dosahovala i 20 %.

I přes tyto vysoké odchylky je možné vždy sestavit jednobuňkový model akumulátoru, který lze popsat průběhem teploty T_{avePCM} . Tento model pak vykazuje stejné tepelné účinky jako model mnohobuňkový (stejná střední měrná entalpie), nezávisle na odchylce $s_{\xi_{o_{ave}}}$.

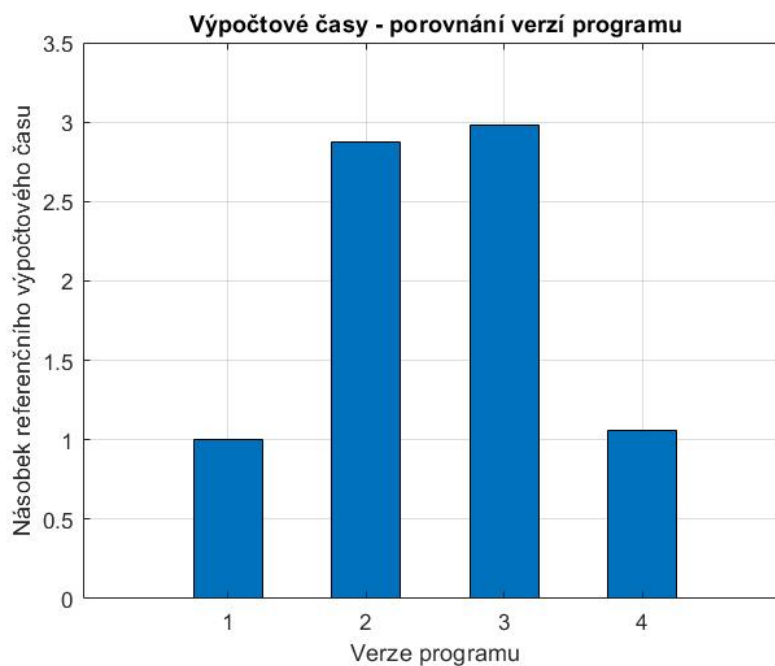
3.4. Optimalizace kódu

Veškeré výše popsané změny v programu měly bohužel negativní efekt na výpočtový čas simulace. Jelikož jeho hodnota závisí i na zařízení použitém pro výpočet, budu všechny časy uvádět jako násobky referenčního výpočtového času. Za ten považuji dobu simulace provedené pomocí originální verze programu před provedením jakékoli změny.

Pro porovnání je zde opět využita vzorová úloha. V Tab. 7 jsou uvedeny hodnoty pro hlavní verze programu, tak jak vznikaly v chronologickém pořadí.

Tab. 7 Porovnání výpočtových časů

| Číslo verze | Popis verze | Násobek referenčního výpočtového času |
|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | Originál | 1 |
| 2 | Implementován měřítkový model | 2,87 |
| 3 | Verze 2 + oprava na střední teplotu | 2,98 |
| 4 | Verze 3 + optimalizace | 1,06 |



Obr. 34 Porovnání výpočtových časů

Původní doba (cca 1000 s) se po implementaci měřítkového modelu téměř ztrojnásobila. Ke zjištění toho, na které části kódu je výhodné se z hlediska zkrácení času zaměřit, posloužila funkce programu MATLAB – tzv. „Profiler“.

Z této analýzy vyplynulo, že podstatnou část z celkového času tvoří samotný výpočet všech $\xi_{i,j}(k)$ měřítkovým modelem. Tyto hodnoty je potřeba určit pro každou buňku modelu v každé iteraci při získávání teplotního pole, jelikož na ní závisí veličiny $\lambda_{i,j}(k)$ a $\rho_{i,j}(k)$ při sestavování matice soustavy. Výpočet teplotního pole ovšem probíhá po řádcích sítě, proto bylo možné místo výpočtu v každé buňce určit tyto hodnoty jako pole pomocí jediného odkazu na měřítkový model pro celý řádek najednou. Stejný princip lze použít i pro výpočet hodnot $\xi_{i,j}(k)$, $T_{z_{i,j}}$ a $\xi_{z_{i,j}}$, jakmile je z iterací určena příslušná hodnota teplotního pole.

Mezi verzemi 3 a 4 se tak počet odkazů na měřítkový model snížil z cca $135 \cdot 10^6$ na zhruba $1 \cdot 10^6$.

Spolu s dalšími drobnými úpravami se tak podařilo srazit výpočtový čas téměř na původní hodnotu.

4. Vybíjení konstantním výkonem a vliv jednotlivých parametrů

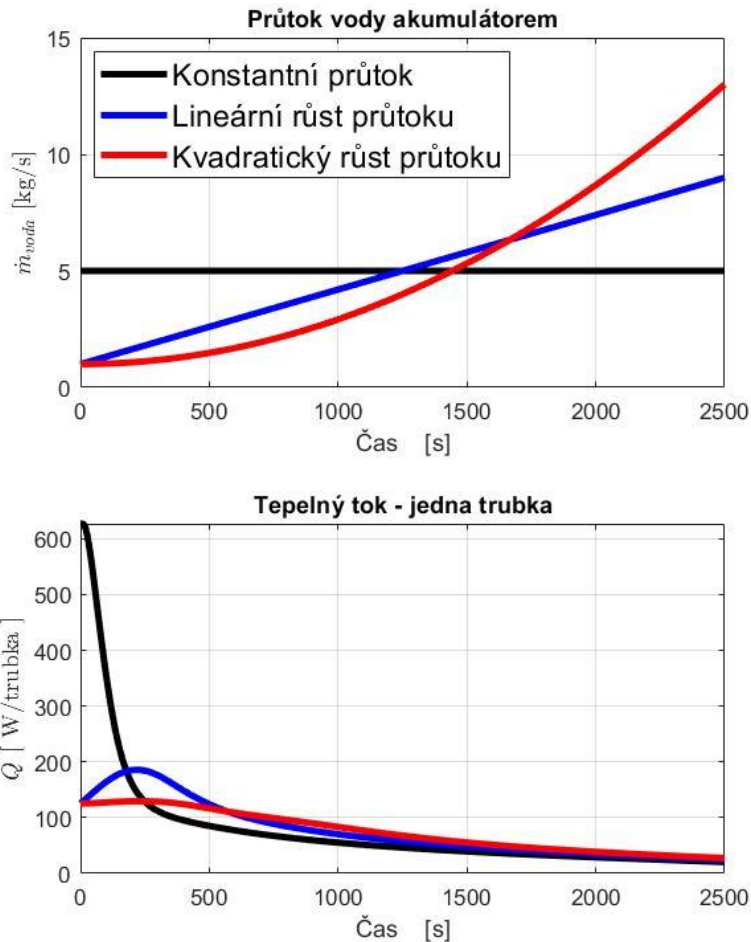
Z průběhu tepelného toku ze vzorové úlohy (Obr. 26, graf vpravo nahoře) je patrné, že při vybíjení nebude akumulátor dodávat konstantní výkon. Z počátečních vysokých hodnot (přes 600 W/trubka) v rámci několika minut rychle klesá a ke stabilnějšímu průběhu bude docházet až na nižších výkonech.

V praxi ovšem bude místo prudkých výkyvů spíše požadováno dodání stabilního výkonu po delší čas. Jedním ze způsobů, jakým by šlo výkon akumulátoru regulovat, je regulace průtoku vody akumulátorem.

4.1. Úpravy modelu pro nestacionární průtok vody

Až do této chvíle byl zadáván konstantní hmotnostní průtok \dot{m}_{voda} . Nenáročnou úpravou byla tato veličina v programu předefinována jako časově závislá. Jediným důsledkem této změny byla nutnost transformace Reynoldsova čísla proudění vody rovněž z konstanty na časově závislou funkci. Podobnostní číslo Re je totiž přímo závislé na rychlosti proudění vody mezi trubkami a tato rychlost je přímo úměrná průtoku. Po úpravě na $\dot{m}_{voda}(t)$ musí tedy platit i $Re(t) = Re(\dot{m}_{voda}(t))$.

Ukázkou vlivu $\dot{m}_{voda}(t)$ na průběh výkonu akumulátoru je porovnání vzorové úlohy s konstantním průtokem ($\dot{m}_{voda} = 5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) a jejích dvou modifikací. U všech variant proteče za dobu simulace akumulátorem stejné množství vody. V první modifikaci průtok v čase lineárně roste od počáteční hodnoty $\dot{m}_{voda}(t = 0 \text{ s}) = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ až do hodnoty na konci výpočtu $\dot{m}_{voda}(t = 2500 \text{ s}) = 9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. V druhé modifikaci má průběh průtoku v čase charakter kvadratické funkce, opět vycházející z hodnoty $\dot{m}_{voda}(t = 0 \text{ s}) = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 35 Vliv průtoku vody na výkon akumulátoru

Je patrné, že správným řízením průtoku vody by bylo možné docílit téměř konstantního výkonu akumulátoru. Na Obr. 35 je zřejmý pokles všech průběhů u vzorové úlohy, ten je však dán tím, že ke konci simulace už je teplotní rozdíl mezi PCM a vodou malý a téměř veškerý objem PCM v akumulátoru je roztaven.

4.2. Regulace průtoku vody akumulátorem

Snahou této úlohy je nalezení takového průběhu průtoku vody, aby byl z akumulátoru po co nejdelší dobu získáván požadovaný výkon $\dot{Q}_{pož}$. Před simulací je tedy nutné do okrajových podmínek zadat následující parametry:

- Požadovaný tepelný výkon: $\dot{Q}_{pož}$ [W]
- Maximální průtok vody akumulátorem: $\dot{m}_{voda,max}$ [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

Pro účely této práce jsem použil jednoduché zpětnovazební řízení průtoku. Rozšířením vztahu (17) pro výpočet výkonu z jedné trubky na celý akumulátor a dosazením požadované hodnoty $\dot{Q}_{pož}$ je získána rovnice (31), pomocí které se v průběhu simulace na začátku

každého časového kroku (k) dopočítává nutný průtok vody na základě $\dot{Q}_{pož}$ a aktuálního teplotního rozdílu:

$$\dot{m}_{voda}(k) = \frac{\dot{Q}_{pož}}{c_{voda} \cdot (T_{voda_{out}}(k) - T_{voda_{vstup}}(k))} \quad (31)$$

Pokud by měl průtok překročit maximální povolený, dojde k omezení:

$$\dot{m}_{voda}(k) = \dot{m}_{voda,max} \quad (32)$$

4.3. Studium vlivu parametrů akumulátoru na vybíjení konstantním výkonem

Aby bylo možné porovnávat jednotlivé konfigurace akumulátoru z hlediska schopnosti vybíjení, je třeba definovat:

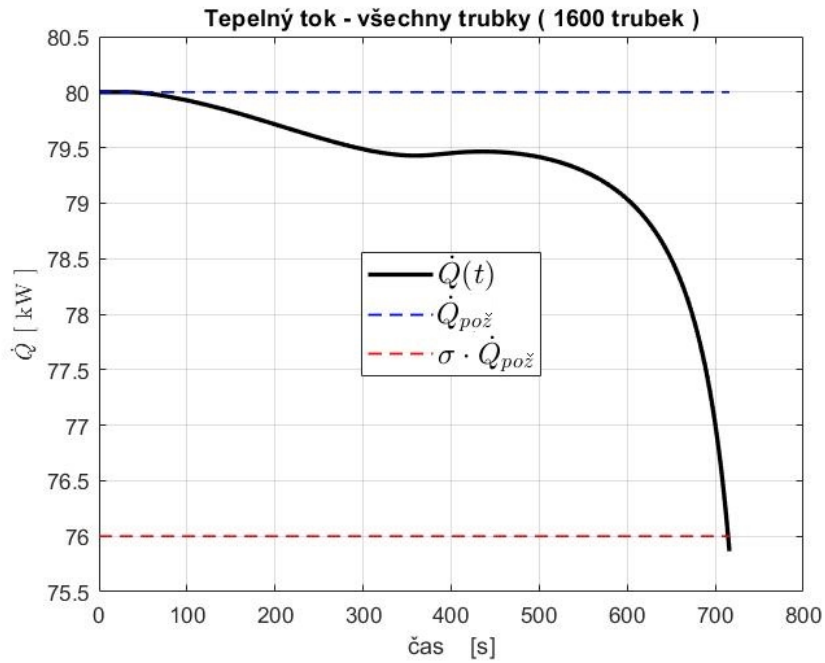
- a) jednotný průběh a podmínky simulací
- b) veličiny, pomocí kterých bude možné vyhodnotit klady a zápory jednotlivých geometrií

Ač se regulace průtoku snaží udržet výkon na požadované hodnotě, v určitém okamžiku začne $\dot{Q}(k)$ samozřejmě klesat. Zavedme proto toleranci požadovaného výkonu σ [%]. Prozatím nás bude zajímat pouze oblast, ve které je požadovaný výkon s přihlédnutím k toleranci dodržen. Simulace se tedy ukončí, jakmile získávaný výkon klesne pod akceptovatelnou hranici. Podmínka zastavení tak nabývá tvaru:

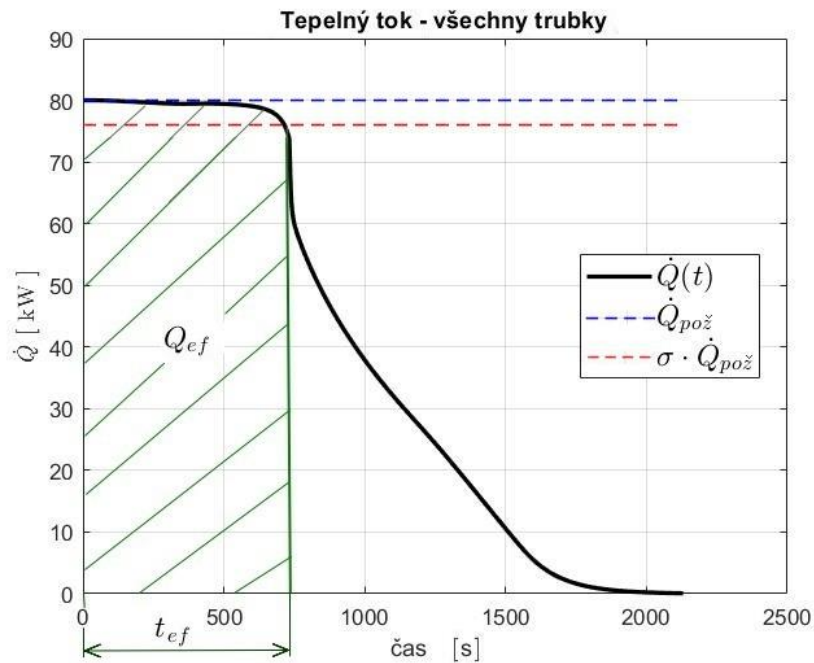
$$\dot{Q}(k) < \sigma \cdot \dot{Q}_{pož} \quad (33)$$

Ukázka tolerančního rozsahu, ve kterém je teplo efektivně získáváno, je vyobrazena na Obr. 36. Modrou přerušovanou čarou je vyznačena hodnota $\dot{Q}_{pož}$, červenou hodnota $\sigma \cdot \dot{Q}_{pož}$.

Celkové teplo, získané v tomto efektivním pásmu, označíme jako Q_{ef} , čas ukončení simulace jako t_{ef} , podíl kapalné fáze PCM v tomto okamžiku jako ξ_{ef} . Na Obr. 37 jsou vyznačeny veličiny Q_{ef} a t_{ef} na celém průběhu vybíjení akumulátoru.



Obr. 36 Ukázka tolerančního rozsahu pro $\dot{Q}_{poz} = 80 \text{ kW}$ a $\sigma = 0,95$



Obr. 37 Ukázka efektivního pásma

V odborné literatuře lze nalézt články zabývající se optimalizací uložení energie v latentních akumulátorech. Jelikož jsem neobjevil mnoho prací tohoto typu zabývající se přímo akumulátorem s PCM uloženým v trubkových pouzdrech (výjimkou budiž práce [27]), využiji zde parametry definované v článku [24] a používané i v [25] a [26]. Tyto práce

se sice zabývají akumulátory s inverzní konstrukcí (viz Obr. 3), nicméně následující poměrové veličiny jsou dobře využitelné pro jakýkoli typ geometrie.

- Podíl efektivně využitelného tepla ku maximálnímu teplu, které by šlo pro daný teplotní rozdíl ($T_{PCM_0} - T_{voda_{vstup}}$) získat:

$$\varphi = \frac{|Q_{ef}|}{|Q_{max}|} \quad (34)$$

- Poměr porovnávající efektivně využitelné teplo z latentní akumulátoru s teplem, které by šlo získat z vodního akumulátoru stejného objemu:

$$E_{ST} = \frac{|Q_{ef}|}{|Q_{VA}|} \quad (35)$$

Maximální možné teplo se rovná rozdílu entalpií akumulátoru mezi počátečním stavem, kdy je celý akumulátor nabitý na teplotou T_{PCM_0} , a stavem, při kterém se celý akumulátor vybije až na teplotu vstupující vody $T_{voda_{vstup}}$. Pro materiál trubek a vodu je výpočet jednodušší než pro PCM. Za předpokladu, že PCM projde v daném teplotním rozmezí celou oblastí fázové změny, dochází mezi okrajovými teplotami T_{max} a T_{min} ke změně hustoty této látky. Složitá závislost během fázové přeměny byla aproximována průměrnou hustotou ρ_{ave} . Poté platí (za předpokladu, že: $c_p = c_p^s = c_p^l$):

$$\begin{aligned} Q_{max} = & V_{PCM} \cdot \left(\rho^l \cdot c_p \cdot (T_{PCM_0} - T_{max}) \right) + \\ & + V_{PCM} \cdot \left(\rho_{ave} \cdot (c_p \cdot (T_{max} - T_{min}) + \Delta h_t) \right) + \\ & + V_{PCM} \cdot \left(\rho^s \cdot c_p \cdot (T_{min} - T_{voda_{vstup}}) \right) + \\ & + V_{tr} \cdot \rho_{tr} \cdot c_{tr} \cdot (T_{PCM_0} - T_{voda_{vstup}}) + \\ & + V_{voda} \cdot \rho_{voda} \cdot c_{voda} \cdot (T_{PCM_0} - T_{voda_{vstup}}) \end{aligned} \quad (36)$$

Součet objemů PCM, trubek a vody musí dát dohromady objem celého akumulátoru.

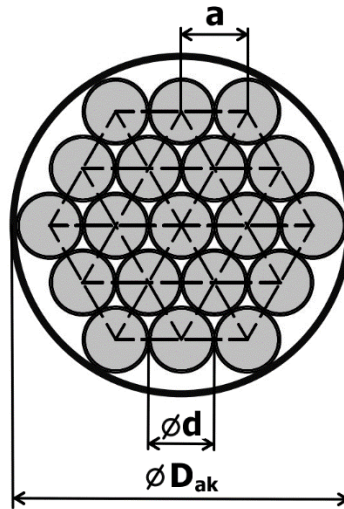
$$V_{ak} = V_{PCM} + V_{tr} + V_{voda} \quad (37)$$

Pro vodní akumulátor o stejném objemu musí platit:

$$Q_{VA} = V_{ak} \cdot \rho_{voda} \cdot c_{voda} \cdot (T_{PCM_0} - T_{voda_{vstup}}) \quad (38)$$

Simulacím jednotlivých konfigurací byly předepsány následující podmínky:

- Trubky s PCM (o průměru d) se v akumulátoru navzájem dotýkají – jejich osy tvoří při pohledu shora rovnostranné trojúhelníky o straně $a = d$ (viz Obr. 38)
- Velká nádoba (o průměru D_{ak}) těsně obepíná trubky
- Neměnná tloušťka stěn trubek (volím 1 mm)



Obr. 38 Vyznačení rozměrů akumulátoru

- Požadovaný výkon: $\dot{Q}_{pož} = 80 \text{ kW}$
- Tolerance požadovaného výkonu: $\sigma = 95 \%$
- Počáteční teplota PCM: $T_{PCM_0} = 45 \text{ °C}$
- Teplota vody vstupující do akumulátoru: $T_{voda_{vstup}} = 15 \text{ °C}$ (konstantní)
- Celkový objem PCM - V_{PCM} je konstantní (volím $0,2 \text{ m}^3$)
- Maximální průtok byl zvolen tak, aby proudění podél trubic stále spadalo do laminární oblasti, pro kterou je definován výpočet Nusseltova čísla používaného v modelu. Lze odvodit, že pro $\dot{m}_{voda,max}$ musí platit:

$$\dot{m}_{voda,max} = \frac{\pi \cdot N \cdot d \cdot \eta_{voda}}{4} Re_{krit} \quad (39)$$

kde: $Re_{krit} = 2200$
 η_{voda} je dynamická viskozita vody [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

Hlavním cílem je zjistit optimální rozložení PCM v akumulátoru, a to pomocí tří hlavních proměnných parametrů geometrie. Délky trubek l_{tr} , jejich průměru d a jejich počtu N . Jelikož je zadán objem PCM v akumulátoru, pouze dvě z těchto veličin jsou nezávislé. Úlohy tak byly simulovány pro zvolený počet a průměr trubek, ke kterým se dopočítávala jejich délka.

4.3.1. Hypotézy

Jako jeden z hlavních nedostatků latentních akumulátorů je zmiňována nízká tepelná vodivost PCM. Důsledkem je pak problematické získávání uloženého tepla ve fázi vybíjení. Jelikož tato vlastnost nesouvisí s tvarem pouzder, je zmiňována v člancích nezávisle na geometrii. V [27] pro PCM uloženém v trubkách, v [24] a [26] pro inverzní geometrii a v [28] pro kulová pouzdra.

Ideálním případem by tedy bylo nalezení takové kombinace parametrů, která by výše zmiňovaný nedostatek vybalancovala. Pokud budeme uvažovat zjednodušený vztah pro tepelný tok PCM a vodou, musí platit:

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_T} (T_{PCM} - T_{voda}) \cdot S_t \quad (40)$$

kde: R_T je tepelný odpor mezi PCM a protékající vodou

S_t je teplosměnná plocha mezi PCM a protékající vodou

Pro zvýšení tepelného toku je tedy nutné snížit R_T , či zvýšit S_t . Tepelný odpor závisí přímo úměrou na průměru trubky a nepřímo úměrně na tepelné vodivosti a součiniteli přestupu tepla, $R_T = R_T(d, \lambda, \alpha)$. Jelikož předmětem této práce není zkoumání prostředků pro zvýšení tepelné vodivosti, nabízí se metoda snížení R_T pomocí zmenšení průměru kapslí.

Při zanedbání tloušťky stěny platí pro teplosměnnou plochu vztah:

$$S_t = N \cdot \pi \cdot d \cdot l_{tr} \quad (41)$$

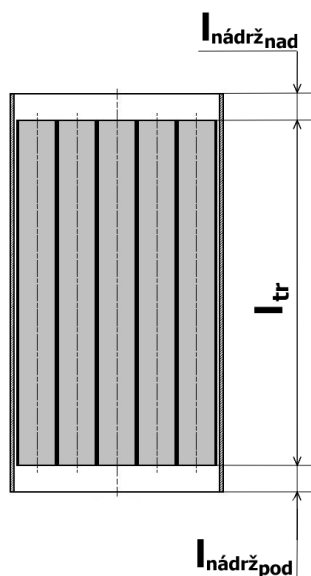
Pokud uvažujeme konstantní objem PCM, je žádoucí získat co nejvyšší hodnotu poměru $\frac{S_t}{V_{PCM}}$. Dosazením a úpravou získáváme vztah:

$$\frac{S_t}{V_{PCM}} = \frac{N \cdot \pi \cdot d \cdot l_{tr}}{N \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l_{tr}} = \frac{4}{d} \quad (42)$$

Zdá se tedy, že pro snížení R_T i zvýšení S_t se jako žádoucí jeví vytvoření akumulátoru s co nejúžšími válcovými pouzdry, což při konstantním objemu vede k jejich prodloužení či zvýšení jejich počtu.

4.3.2. Konstantní výška nádrží

Při prvních simulacích byla spolu s konstantním objemem PCM držena i konstantní výška prostorů nad a pod trubkami (označovaných jako nádrže).



Obr. 39 Vyznačení délkových rozměrů akumulátoru

Pro $N = 1000$, $l_{nádrž_{nad}} = l_{nádrž_{pod}} = 300$ mm a zvolený vnější průměr trubek d lze dopočítat kompletní geometrii akumulátoru (délku trubek l_{tr} , délku celého akumulátoru $l_{ak} = l_{tr} + l_{nádrž_{nad}} + l_{nádrž_{pod}}$ a průměr akumulátoru D_{ak}).

Tab. 8 Konstantní výška nádrží ($N=1000$) – geometrie

| d [mm] | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| l_{tr} [mm] | 3979 | 1507 | 786 | 481 | 325 | 234 | 176 | 111 | 76 |
| l_{ak} [mm] | 4579 | 2107 | 1386 | 1081 | 925 | 834 | 776 | 711 | 676 |
| D_{ak} [mm] | 332 | 498 | 664 | 830 | 996 | 1162 | 1328 | 1660 | 1992 |
| S_t [m ²] | 125,0 | 71,01 | 49,38 | 37,81 | 30,61 | 25,71 | 22,16 | 17,36 | 14,27 |

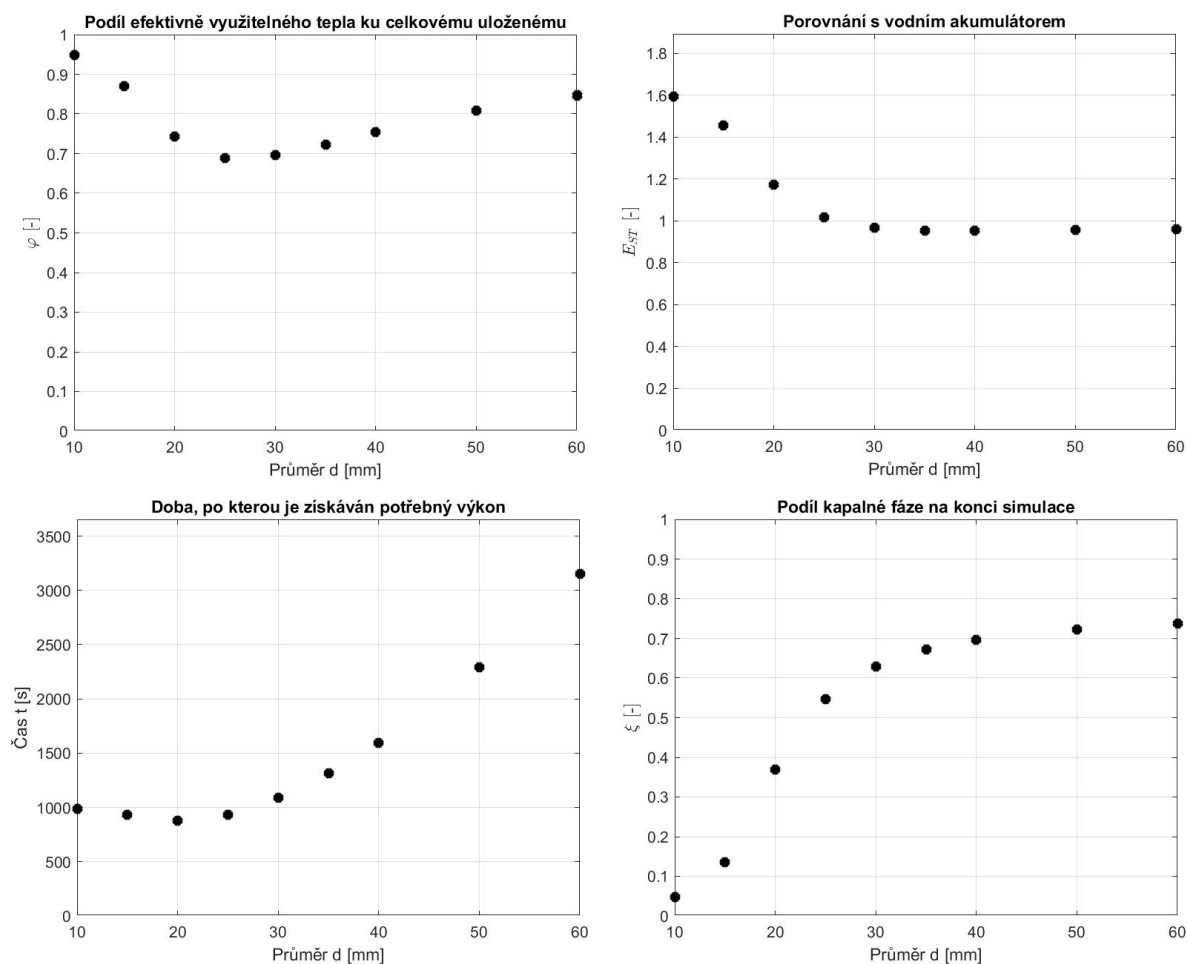
Pro různé konfigurace akumulátoru, uvedené v Tab. 8, byly provedeny simulace dle zadání úlohy. Již z dopočítané geometrie je patrný dramatický nárůst teplosměnné plochy se zmenšujícím se průměrem trubek. Výsledky simulací jsou pak uvedeny v Tab. 9. Šedé pole indikuje nejlepší dosaženou hodnotu daného parametru.

Tab. 9 Konstantní výška nádrží ($N=1000$) – hodnoty parametrů (v šedém poli nejlepší dosažené hodnoty)

| d [mm] | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| φ [-] | 0,95 | 0,87 | 0,74 | 0,69 | 0,70 | 0,72 | 0,75 | 0,81 | 0,85 |
| E_{ST} [-] | 1,59 | 1,45 | 1,17 | 1,02 | 0,97 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,96 |
| t_{ef} [s] | 984 | 932 | 880 | 930 | 1088 | 1314 | 1596 | 2292 | 3154 |
| ξ_{ef} [-] | 0,05 | 0,13 | 0,37 | 0,55 | 0,63 | 0,67 | 0,70 | 0,72 | 0,74 |

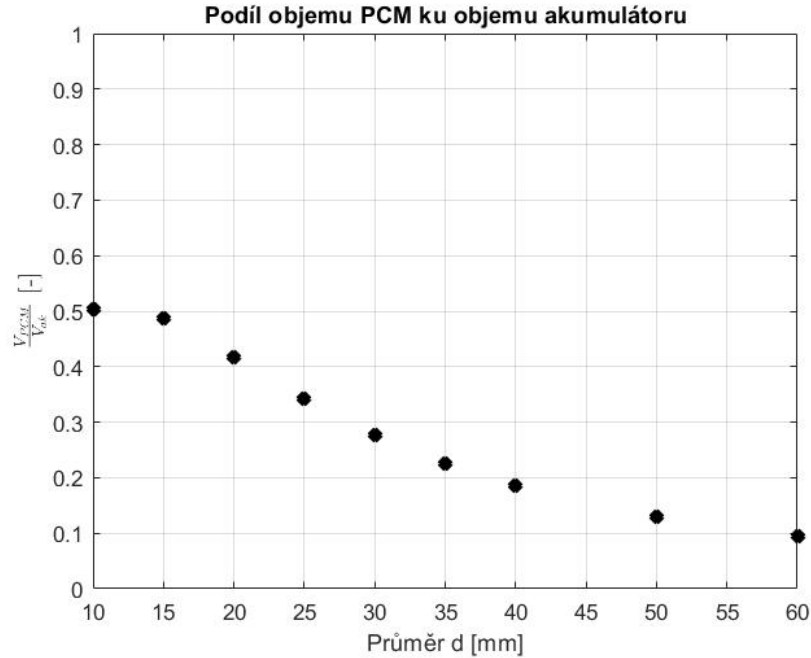
Dle předpokladu se nejvíce tepla povedlo v efektivním rozsahu vybití z nejužších trubek ($d = 10$ mm), které zároveň musejí být na základě požadavku konstantního V_{PCM} i nejdelší.

Zvláštní chování ovšem vykazuje jak podíl efektivně využitelného tepla φ , tak doba t_{ef} , po kterou lze efektivní výkon odebírat. Jak lze vidět na Obr. 40, na kterém jsou graficky znázorněny výsledky z Tab. 9, parametr φ nejprve s rostoucím d klesá, ale poté začíná opět růst. Podobné chování vykazuje i doba t_{ef} . Pokud je tedy dále zvětšován průměr trubek, lze v efektivním rozsahu vybití větší podíl tepla. Vybití zároveň trvá delší dobu, po kterou výkon nespadne pod tolerovanou mez.



Obr. 40 Konstantní výška nádrží – porovnání

Vysvětlení tohoto chování se skrývá v samotné definici geometrie. S narůstajícím průměrem trubek (a tudíž i akumulátoru) roste totiž objem nádrží (jejichž výška je stejná pro všechny varianty). Jinak řečeno, roste objem vody v akumulátoru a snižuje se podíl objemu PCM ku objemu akumulátoru. To je demonstrováno na následujícím grafu (Obr. 41).

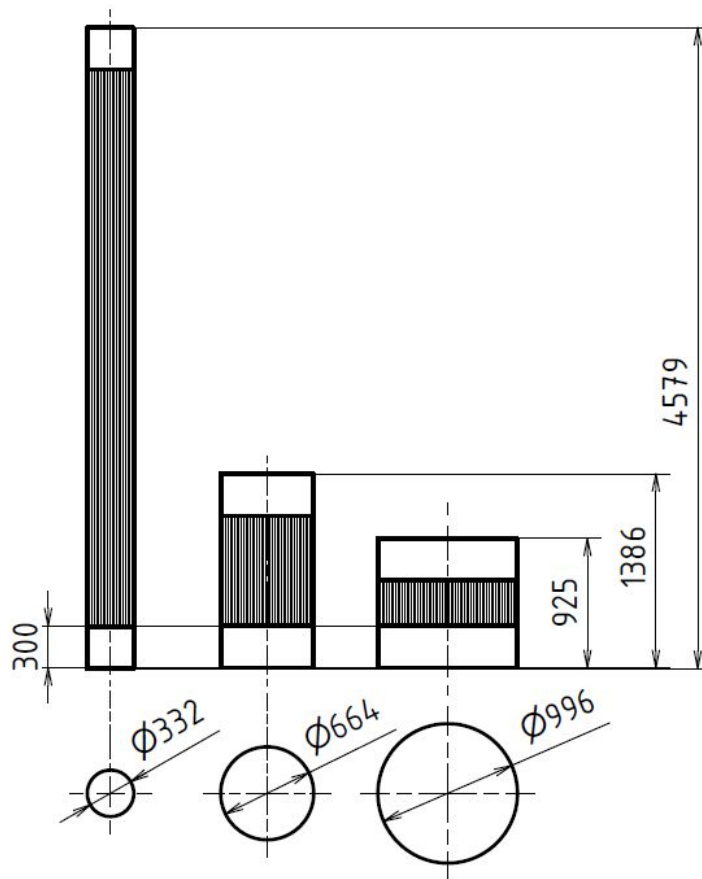


Obr. 41 Konstantní výška nádrží – podíl objemu PCM

Na Obr. 42 lze vidět porovnání geometrií akumulátorů pro průměry $d = 10$ mm, $d = 20$ mm a $d = 30$ mm. Šrafovaně je vyznačena oblast s trubicemi obsahujícími PCM, oblast nádrží je bez šraf.

Pro větší průměry je tak vliv PCM minimální, akumulátor se svými vlastnosti blíží akumulátoru vodnímu. Je tak schopen vybit podstatnou část tepla bez nutnosti překonávání tepelného odporu.

Jelikož tento přístup nereflektuje výhody či nevýhody jednotlivých konfigurací rozložení PCM po akumulátoru, byl nahrazen přístupem uvažujícím jak konstantní V_{PCM} , tak konstantní V_{ak} . Tím pádem i objem vody je neměnný a všechny konfigurace mají jednotné podmínky.



Obr. 42 Porovnání geometrií akumulátoru pro průměry trubek $d = 10$, $d = 20$ a $d = 30$ mm (zleva doprava)

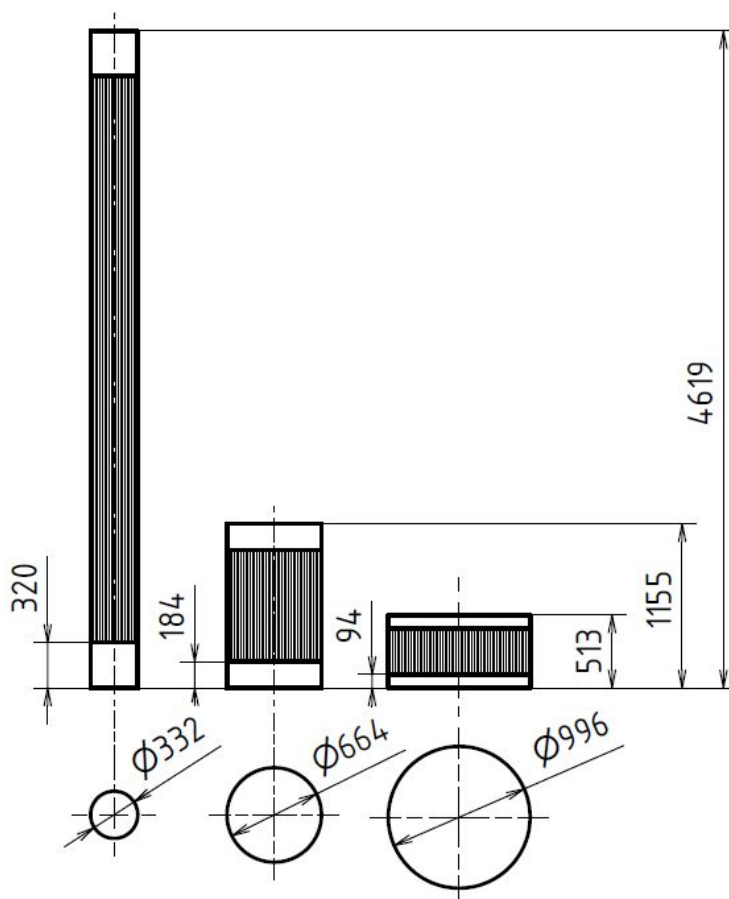
4.3.3. Konstantní objem akumulátoru

Podmínky této úlohy jsou identické s předchozím případem. Jediný rozdíl je, že ke zvolenému objemu $V_{PCM} = 0,2 \text{ m}^3$ je definován i objem akumulátoru $V_{ak} = 0,4 \text{ m}^3$. Dopotávají se tedy výšky vodních nádrží. Akumulátor je uvažován jako symetrický, tedy platí, že $l_{nádrž} = l_{nádrž_{nad}} = l_{nádrž_{pod}}$. Přehled jednotlivých konfigurací je opět uspořádán do tabulky (Tab. 10).

Tab. 10 Konstantní objem akumulátoru ($N=1000$) - geometrie

| d [mm] | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| l_{tr} [mm] | 3979 | 1507 | 786 | 481 | 325 | 234 | 176 | 111 | 76 |
| $l_{nádrž}$ [mm] | 320 | 273 | 184 | 129 | 94 | 72 | 56 | 37 | 26 |
| l_{ak} [mm] | 4619 | 2053 | 1155 | 739 | 513 | 377 | 289 | 185 | 128 |
| D_{ak} [mm] | 332 | 498 | 664 | 830 | 996 | 1162 | 1328 | 1660 | 1992 |
| S_t [m ²] | 125,0 | 71,01 | 49,38 | 37,81 | 30,61 | 25,71 | 22,16 | 17,36 | 14,27 |

Vzhledem k definici se v tomto případě výšky nádrží zmenšují pro zvyšující se průměr akumulátoru.

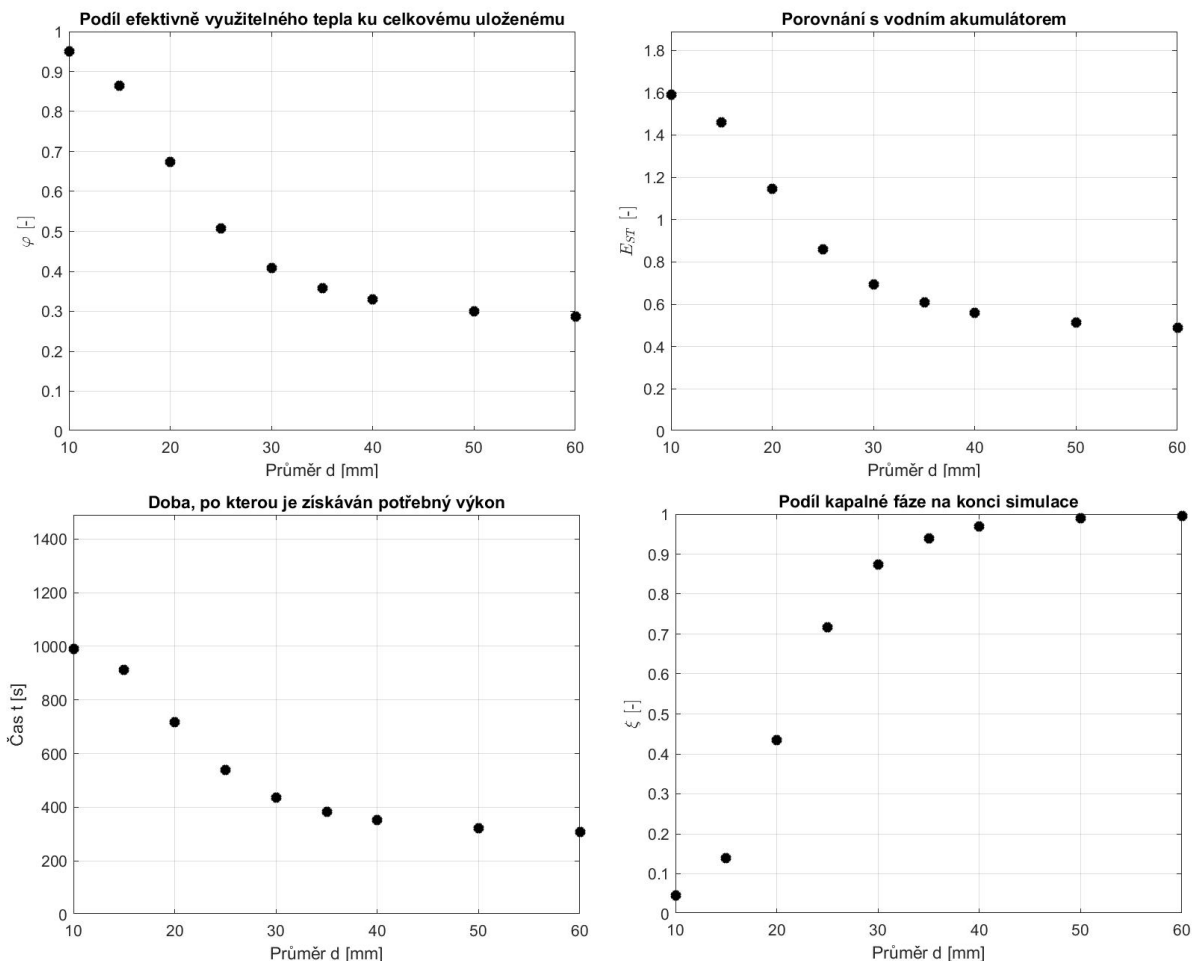


Obr. 43 Porovnání geometrií akumulátoru pro průměry trubek $d = 10$, $d = 20$ a $d = 30$ mm (zleva doprava)

Obdržené výsledky ze simulací jsou zobrazeny jak v Tab. 11 (šedé pole opět indikuje nejlepší dosaženou hodnotu daného parametru), tak graficky na Obr. 44.

Tab. 11 Konstantní výška nádrží ($N=1000$) – hodnoty parametrů (v šedém poli nejlepší dosažené hodnoty)

| d [mm] | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| φ [-] | 0,95 | 0,86 | 0,67 | 0,51 | 0,41 | 0,36 | 0,33 | 0,30 | 0,29 |
| E_{ST} [-] | 1,59 | 1,46 | 1,14 | 0,86 | 0,70 | 0,61 | 0,56 | 0,51 | 0,49 |
| t_{ef} [s] | 990 | 912 | 716 | 540 | 436 | 382 | 352 | 322 | 308 |
| ξ_{ef} [-] | 0,05 | 0,14 | 0,43 | 0,72 | 0,87 | 0,94 | 0,97 | 0,99 | 0,99 |

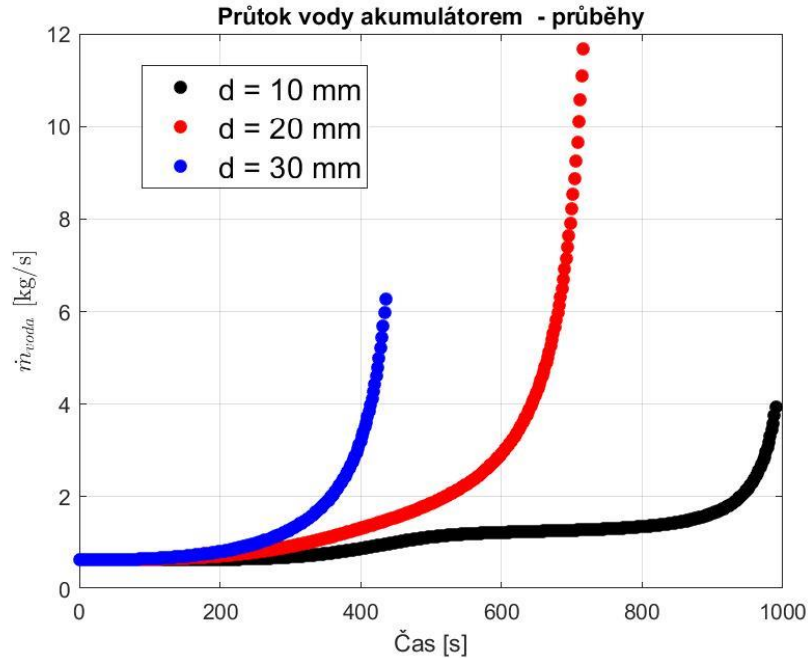


Obr. 44 Konstantní objem akumulátoru - porovnání

U této úlohy s pevným poměrem $\frac{V_{PCM}}{V_{ak}} = 0,5$ je z výsledků jasně pozorovatelný trend. Čím jsou trubky s PCM tenčí a delší, tím déle jsou schopny vodě předávat požadované teplo a jsou tedy na konci simulace více vybité. U varianty s $d = 10$ mm je dokonce dosaženo hodnoty $\varphi = 0,95$, což znamená, že téměř veškeré teplo uložené v akumulátoru je možné vybit požadovaným výkonem 80 kW. U širších trubek není akumulátor schopen vodě předat dostatečné teplo a výkon akumulátoru klesá tak rychlým tempem, že ani zvyšující se tok vody nedokáže vývoj zvrátit.

Z hodnot parametru E_{ST} plyne, že všechny konfigurace s $d > 20$ mm nepředstavují u této úlohy zlepšení oproti konvenčnímu vodnímu akumulátoru.

Zajímavý náhled přineslo sledování vývoje průtoku vody akumulátorem. Pro příklad uvádím průběhy pro tři různé konfigurace.

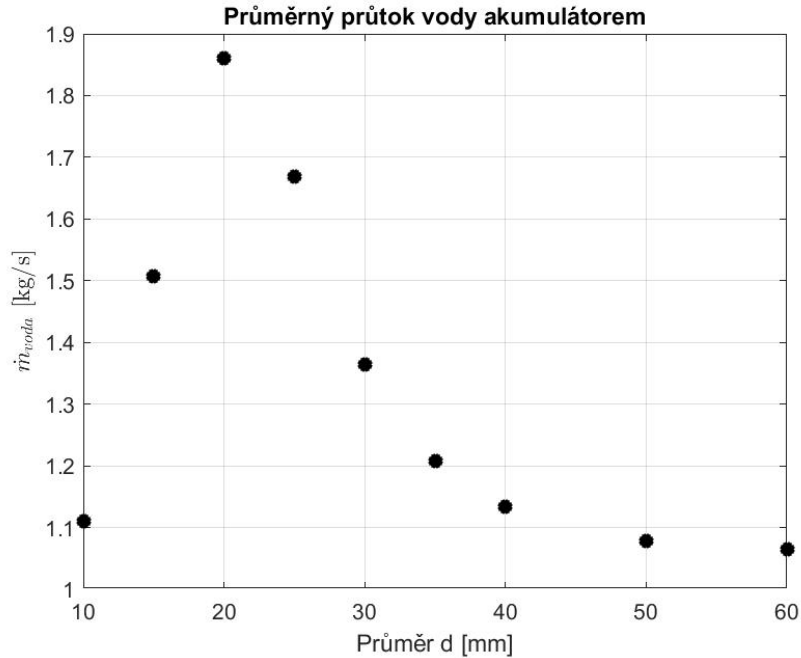


Obr. 45 Porovnání průběhů průtoků vody

Ze všech tří průběhů lze vypožorovat podobný trend. V průběhu vybíjení klesá schopnost vody se od PCM dostatečně ohřát, což zpětná vazba, za účelem dorovnání výkonu, kompenzuje navyšováním průtoků. Rychlost tohoto navyšování v globálním měřítku rovněž narůstá. V žádném z případů ovšem hodnota průtoků nestihla ani vystoupat na mez $\dot{m}_{voda,max}$. Při dosažení určité strmosti totiž už zpětná vazba není schopna efektivně zareagovat a výkon poklesne pod tolerovanou mez.

U varianty s trubkami $d = 10$ mm k tomuto jevu dojde, až když je akumulátor téměř vybit. S rostoucím průměrem pouzder nastává tento kritický okamžik dříve. U varianty s průměrem trubek $d = 30$ mm je již po 436 sekundách vybíjení simulace pro nízký odváděný výkon ukončena.

Integrací těchto průběhů lze získat celkové hmotnosti proteklé vody akumulátorem. Jelikož v každé konfiguraci trvalo efektivní vybíjení jinou dobu t_{ef} , jsou tyto dvě veličiny poděleny a porovnáván je průměrný průtok.



Obr. 46 Průměrný průtok vody

Je patrné, že ač varianta $d = 10$ mm dosáhla nejlepších výsledků, nepotřebovala k tomu vysoké hodnoty průtoku, což značí i menší náklady na pohon čerpadla. Naopak konfigurace $d = 20$ mm pro získání relativně dobrých výsledných hodnot potřebovala více než 1,5násobný průměrný průtok. U variant se širšími pouzdry PCM už byl nárůst průtoku tak strmý, že se nestihl na hodnotě průměrného průtoku projevit.

Pokud tedy nebudeme uvažovat ostatní vlivy, jako například pracnost výroby či náklady na materiál a montáž zařízení, jeví se na základě těchto porovnání jako nejlepší řešení využití co nejužších pouzder na PCM. Což je v souladu s počátečními hypotézami. V realitě bude nutné najít optimum tak, že nalezneme co největší průměr pouzder, se kterými bude akumulátor stále vykazovat přijatelné výkonové charakteristiky.

Stále ovšem nebyla zodpovězena otázka, zda je lepší daný objem PCM rozdělit do několika úzkých dlouhých trubek či do mnoha trubek kratších. Neboli zda je po minimalizaci průměru d výhodnější maximalizovat parametr l_{tr} či N . Stanovme tedy nyní pevně průměr trubek d a variujme počet trubek N . Pro konstantní $V_{PCM} = 0,2 \text{ m}^3$ lze tedy opět dopočítat l_{tr} . Pro $V_{ak} = 0,4 \text{ m}^3$ pak také výšky vodních nádrží.

Tab. 12 Konstantní objem akumulátoru ($d = 20 \text{ mm}$) - geometrie

| N [-] | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 | 2600 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| l_{tr} [mm] | 491 | 437 | 393 | 357 | 327 | 302 |
| $l_{nádrž}$ [mm] | 115 | 102 | 92 | 84 | 77 | 71 |
| l_{ak} [mm] | 722 | 642 | 577 | 525 | 481 | 444 |
| D_{ak} [mm] | 840 | 891 | 939 | 985 | 1029 | 1071 |
| S_t [m ²] | 49,38 | 49,38 | 49,38 | 49,38 | 49,38 | 49,38 |

Z výpočtu teplosměnné plochy $S_t = N \cdot \pi \cdot d \cdot l_{tr}$ jasně vyplývá, že pro pevné d , zvolené N a k němu dopočtenou délku l_{tr} musí zůstat S_t zachováno. Některé parametry ovšem konstantní nezůstanou. V následující tabulce je uvedeno porovnání vybraných parametrů pro obecný případ, ve kterém je počet trubek druhé konfigurace celočíselným násobkem N_1 ($N_2 = n \cdot N_1$).

Tab. 13 Konstantní objem akumulátoru a pevné d – porovnání

| Veličina | | Konfigurace 1 | Konfigurace 2 |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Počet trubek | N | N_1 | $n \cdot N_1$ |
| Délka trubek | l_{tr} | l_{tr1} | $\frac{l_{tr1}}{n}$ |
| Průtok vody akumulátorem | \dot{m}_{voda} | \dot{m}_{voda1} | \dot{m}_{voda1} |
| Průtok připadající na 1 trubku | $\dot{m}_{voda_{tr}}$ | $\frac{\dot{m}_{voda1}}{N_1}$ | $\frac{\dot{m}_{voda1}}{n \cdot N_1}$ |
| Rychlost proudění vody | v | v_1 | $\frac{v_1}{n}$ |
| Reynoldsovo číslo | Re | Re_1 | $\frac{Re_1}{n}$ |

Například zvýšení počtu trubek na dvojnásobek znamená poloviční průtok vody připadající na jednu trubku. Zároveň se ale trubky zkrátily na polovinu, takže čas, který částice tekutiny stráví v kontaktu s akumulátorem, zůstává stejný.

Pro varianty z Tab. 12 jsou výsledné hodnoty srovnávacích parametrů uvedeny v Tab. 14. Jak je možné vidět, tyto hodnoty vychází identicky pro všechny variace.

Tab. 14 Konstantní objem akumulátoru ($d = 20 \text{ mm}$) - hodnoty parametrů

| $N [-]$ | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 | 2400 | 2600 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| $\varphi [-]$ | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,67 |
| $E_{ST} [-]$ | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 | 1,14 |
| $t_{ef} [s]$ | 716 | 716 | 716 | 716 | 716 | 716 |
| $\xi_{ef} [-]$ | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |

Stejné výsledky byly ovšem obdrženy nejen pro tyto konkrétní parametry, nýbrž pro celé časové průběhy veličin jako je průtok vody \dot{m}_{voda} , tepelný výkon akumulátoru \dot{Q} či střední teplota PCM T_{avePCM} . Z vnějšího pohledu se tedy všechny varianty chovají stejně.

Možné vysvětlení se skrývá ve výpočtu prostupu tepla mezi PCM a protékající vodou. Jak bylo ukázáno, teplosměnná plocha zůstává stejná. Druhou veličinou, hrající ve výpočtu roli dle vztahu (40), je tepelný odpor $R_T = R_T(d, \lambda, \alpha)$. Průměr d i tepelná vodivost λ jsou pro varianty v Tab. 12 neměnné, u součinitele α toto ovšem není zřejmé. Jak je ukázáno v Tab. 13, zvyšováním počtu trubek klesá rychlost proudění vody, což by v obecném případě mohlo mít na součinitel α vliv. Výpočet součinitele přestupu tepla je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{\lambda_{voda} \cdot Nu}{\frac{d}{2}} \quad (43)$$

kde právě Nusseltovo číslo Nu může být funkcí rychlosti proudění. Pro tento model ovšem doc. Hyhlík identifikoval jako nejvhodnější následující vztah (pro $Re < 2200$):

$$Nu = 3,66 + 4,12 \cdot \left(\frac{2 \cdot D_h}{d} - 0,205 \right)^{0,569} \quad (44)$$

kde: D_h je hydraulický průměr plochy, kterou teče voda, připadající na jednu trubku

Přestup tepla tedy nezávisí na rychlosti proudění. Pokud je zachován průměr trubek, všechny varianty by měly mít stejný celkový tepelný odpor. Z toho lze odhadovat, že i tepelný tok by měl zůstat identický a jednotlivé konfigurace by měly navenek vykazovat stejné chování.

Pro konstrukci akumulátoru tedy plyne závěr takový, že po zvolení optimálního průměru trubek lze libovolně variovat mezi délkou a počtem trubek bez velkých změn ve výsledném výkonovém chování akumulátoru.

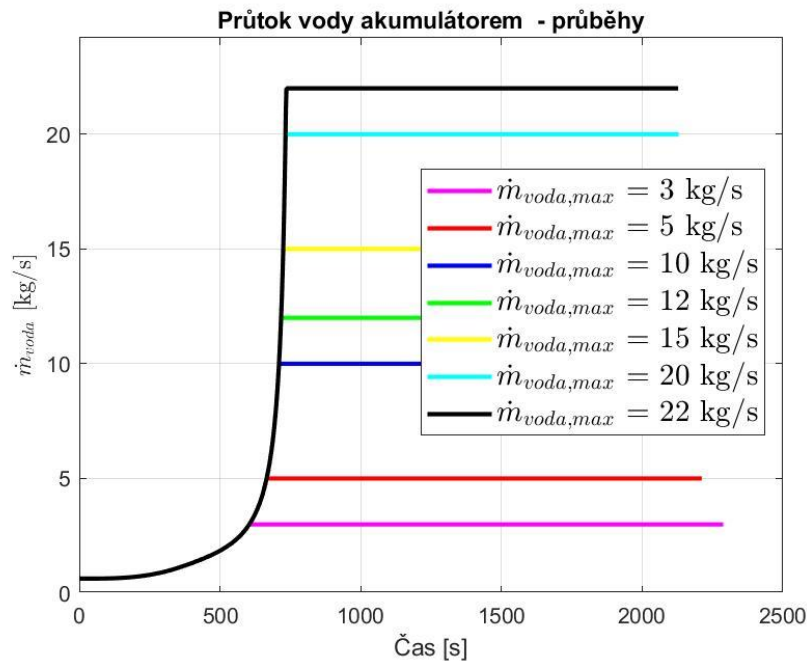
4.3.4. Dovybívání a vliv maximálního průtoku vody

Jakmile výkon klesne pod tolerovanou hodnotu, nastává fáze tzv. dovybívání akumulátoru. U praktických aplikací se tuto oblast ležící mimo efektivní pásmo snažíme minimalizovat, nicméně i zbytkové uložené teplo se můžeme pokusit co nejlépe využít.

V průběhu vybíjení už lze způsob dovybití zbytkového tepla z akumulátoru ovlivnit v podstatě pouze nastavením průtoku vody. Pokud zachováme zpětnovazební řízení z minulých kapitol, lze vzhledem ke strmosti nárůstu průtoku na konci efektivní oblasti předpokládat dosažení maximální hodnoty již na počátku dovybíjecí fáze.

Maximální hodnota byla definována vztahem (39) vzhledem k zachování laminárnímu proudění. Otázkou je, zda se nevyplatí ji snížit, jelikož by tímto vysokým průtokem voda proudila až do konce vybíjení. Zároveň ale není vhodné zvolit maximální průtok příliš malý, neboť takové nastavení by mohlo ovlivnit nejen dovybíjecí, ale i efektivní oblast, což by bylo značně nežádoucí.

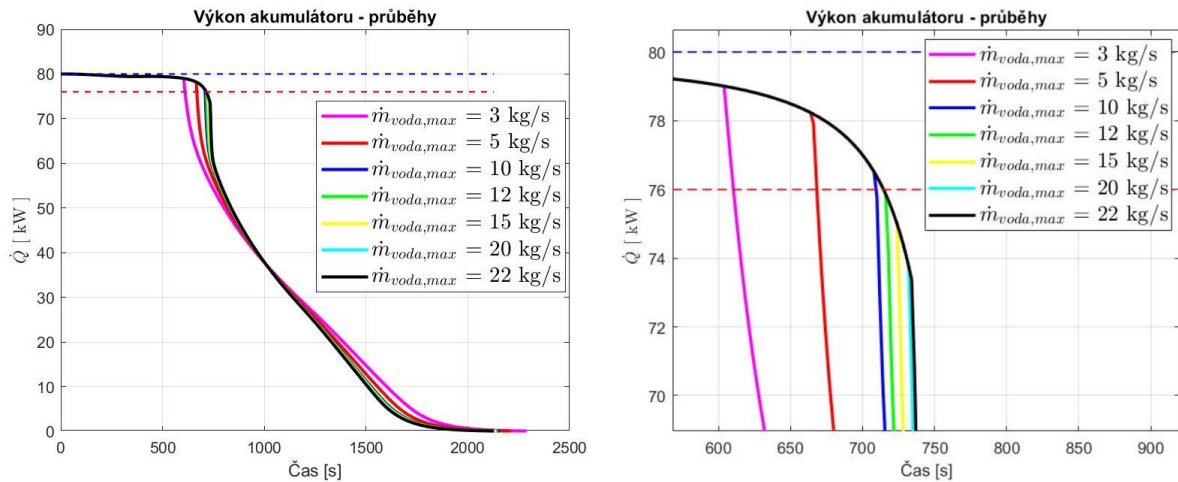
Pro zvolený akumulátor ($d = 20$ mm, $N = 1600$) vychází z laminárního omezení, že: $\dot{m}_{voda} \leq 22,12$ kg \cdot s $^{-1}$. Následně bylo zvoleno několik nižších hodnot omezujícího průtoku, pro které byl odsimulován celý vybíjecí proces.



Obr. 47 Průběh průtoku pro vybrané hodnoty maximálního průtoku vody

Na Obr. 48 jsou zachyceny průběhy vybíjecího výkonu i s vyznačením tolerovaného pásma. Vpravo je vyobrazeno přiblížení na přechod mezi efektivní a dovybíjecí fází. Z něj je patrné, že zvolené hodnoty $\dot{m}_{voda,max} = [3,5,10]$ kg \cdot s $^{-1}$ ovlivňují i efektivní oblast, a tudíž zkracují dobu vybíjení požadovaným výkonem. Vyšší hodnoty $\dot{m}_{voda,max}$ omezí

nárůst průtoku počítaný zpětnou vazbou až v dovybíjecí fázi. Mezní hodnota má v tomto případě velikost $\dot{m}_{voda,max} = 11,68 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ a byla odečtena zpětně jako hodnota $\dot{m}_{voda}(t_{ef})$.



Obr. 48 Průběh výkonu pro vybrané hodnoty maximálního průtoku vody

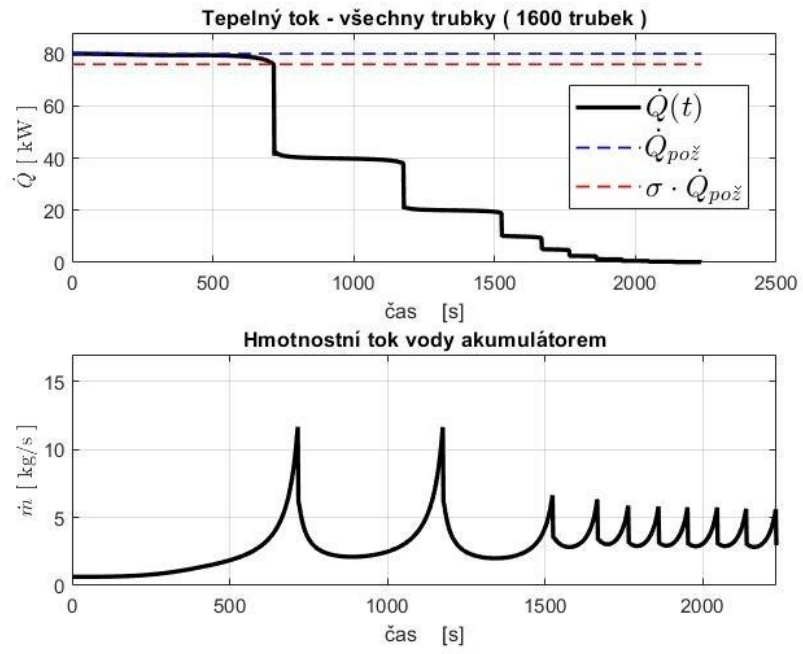
Pokud se omezíme pouze na hodnoty vyšší než $11,68 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, odlišnost v chování dovybjení není příliš markantní. Mělo by platit, že čím vyšším průtokem bude akumulátor dovybjen, tím kratší dobu t_{dovyb} tato fáze zabere. Rozdíl je ovšem v jednotkách sekund, a to za cenu mnohem většího průtoku. Není tedy účelné využívat vysokých průtoků s úmyslem rychlého dovybití akumulátoru.

Tab. 15 Porovnání dovybíjecích časů

| $\dot{m}_{voda,max}$ [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$] | 12 | 15 | 20 | 22 |
|--|------|------|------|------|
| t_{dovyb} [s] | 1432 | 1422 | 1414 | 1412 |

Druhým možným přístupem je dovybití zbytkového tepla rovněž konstantním výkonem. Ten ovšem musí být nižší než \dot{Q}_{poz} v efektivní oblasti. Princip zpětnovazebního výpočtu potřebného průtoku zůstává zachován. Jakmile výkon klesne pod tolerovanou hodnotu, sníží se požadovaný výkon. Pokud akumulátor není schopen udržet ani tento snížený výkon, je možné snížení provést znovu. Tím vzniká jakási kaskáda dovybíjecích výkonů.

Pro příklad uvádím ryze nepraktickou kaskádu, při které se požadovaný výkon vždy sníží na polovinu toho předchozího.



Obr. 49 Kaskádovité dovybjení

5. Porovnání simulací s výsledky experimentů

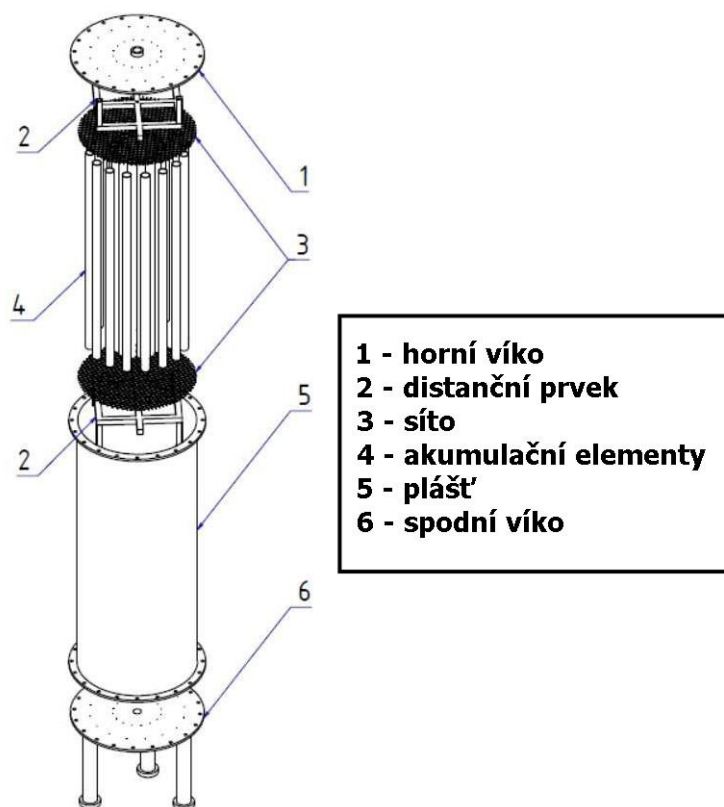
Jak bylo již řečeno v úvodu kapitoly č.3, na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky na Fakultě strojní ČVUT vznikla laboratorní verze akumulátoru stejné konstrukce, pro kterou byl vytvořen výpočtový model.

Během vytváření této práce bohužel nebylo možné provádět na akumulátoru měření. Příčinou byla poškozená teplotní čidla snímající teplotu PCM. Musel jsem proto využít data naměřená již na podzim roku 2020 Ing. Deverou. Všechny experimenty se ovšem v té době zabývaly pouze monotónním vybíjením akumulátoru. Technické údaje a některé poznatky čerpám ze dvou technických zpráv [23] a [29]. Za souhlas s jejich využitím bych rád poděkoval autorům.

Pro vlastní srovnání hysterezního chování PCM a posouzení účinnosti měřítkového modelu při modelování částečné fázové změny jsem použil experimentální data zveřejněná v článku [31], viz kapitola 5.4.

5.1. Popis laboratorního akumulátoru

Nádoba akumulátoru vyrobená z nerezové oceli má objem 125 litrů, $l_{ak} = 1000$ mm a $D_{ak} = 400$ mm. PCM je zapouzdřeno v trubkách TR 30 x 1 – 800. Při jejich vzájemném kontaktu je možné jich do akumulátoru nainstalovat až 143. Jako PCM byla použita látka RT35HC od společnosti Rubitherm [15]. V prostorech nad a pod pouzdry (nádrží) se nacházejí prvky pro zajištění rovnoměrnosti proudu vody. Síta vyobrazená na schématu Obr. 50 byla později nahrazena distribučním diskem v horní části a statickým mixérem pod trubkami.



Obr. 50 Schéma experimentálního akumulátoru [29]

Akumulátor byl zapojen do oběhu, sestávajícího se z bazénu jako zásobárny vody, odpadního kanálu, kotlů pro ohřev vody, čerpadel, průtokoměru a teplotních snímačů. Ty byly umístěny tak, aby zaznamenávaly teplotu vody v bazénu a na vstupu a výstupu z akumulátoru. Dále bylo pět snímačů nainstalováno uvnitř jedné z tyčí pro měření teplotního profilu PCM.



Obr. 51 Pohled na průtokoměr a teplotní čidla na vstupu do akumulátoru [29]

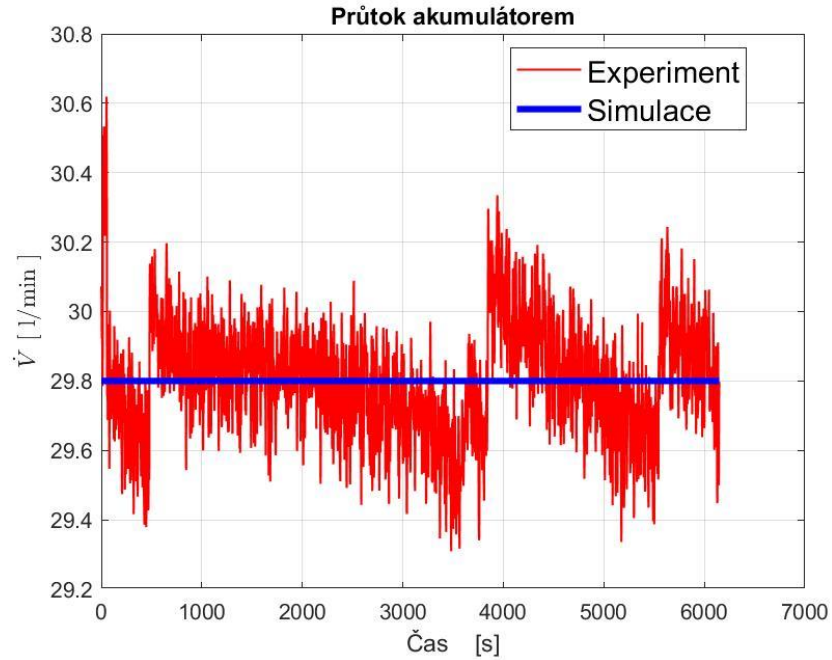
5.2. Vybíjení konstantním průtokem

Většina měření byla provedena pro vybíjení konstantní hodnotou průtoku vody. To odpovídá režimu vzorové úlohy z kapitoly 3.2.1. a k simulaci je možné využít již původní model doc. Hyhlíka.

Pro ukázkou porovnání se simulačním modelem jsem využil naměřená data Rub_RT35_vyb_09_15_12_25 (příloha č.5), ze kterých byly odečteny následující podmínky:

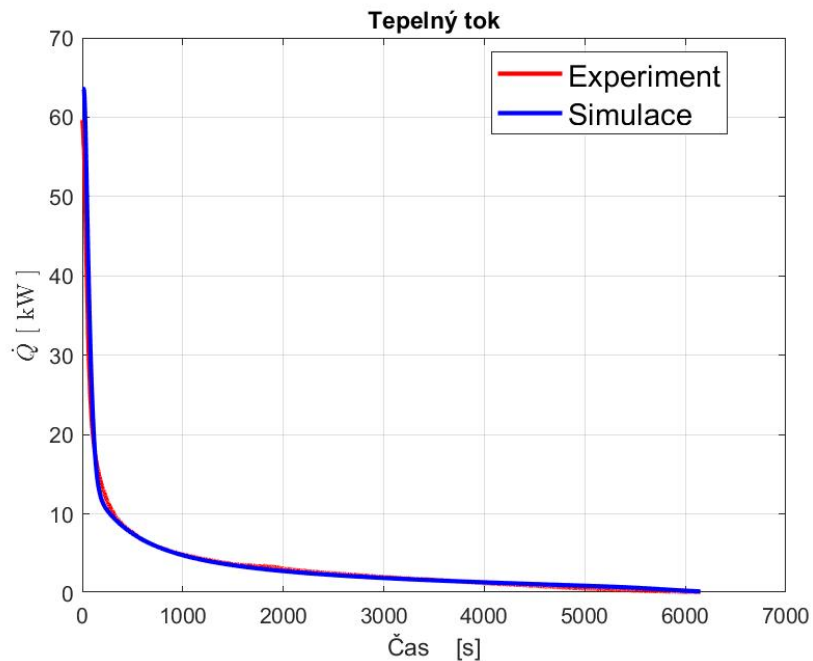
- 1) Počáteční teplota PCM: $T_{PCM_0} = 55 \text{ °C}$
- 2) Průměrná teplota vody vstupující do akumulátoru: $T_{voda_{vstup}} = 24,07 \text{ °C}$
- 3) Střední průtok vody akumulátorem: $\dot{V}_{voda} = 29,8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Hodnota průtoku při měření oscilovala okolo výše uvedeného průměru, jenž byl použit pro simulační model.



Obr. 52 Průběhy průtoků při porovnání vybíjení konstantním průtokem

Hlavním porovnávacím parametrem je průběh výkonu odebíraného z akumulátoru při vybíjení. Data z experimentu a simulačního modelu se překrývají na Obr. 53.



Obr. 53 Průběhy výkonů při porovnání vybíjení konstantním průtokem

Byl určen průměrný rozdíl $\Delta_{\dot{Q}}$ [kW] mezi experimentálními a nasimulovanými daty a průměrná odchylka $s_{\dot{Q}}$ [%]

$$\Delta_{\dot{Q}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K |\dot{Q}_e(k) - \dot{Q}_s(k)| = 0,350 \text{ kW}$$

$$s_{\dot{Q}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \left| \frac{\dot{Q}_e(k) - \dot{Q}_s(k)}{\dot{Q}_s(k)} \right| = 15,63 \%$$
(45)

kde: $\dot{Q}_e(k)$ je hodnota výkonu v k-tém časovém kroku získaná z experimentu
 $\dot{Q}_s(k)$ je hodnota výkonu v k-tém časovém kroku získaná simulací

Velikost odchylky lze pokládat za vcelku úspěšnou, vzhledem ke kolísání teploty vody vtékající do akumulátoru ($T_{voda_{vstup}} = (24,07 \pm 1,48) \text{ °C}$), kolísání průtoku vody (viz Obr. 52) a nepřesnostem použitých termočlánků (třída přesnosti B vykazuje toleranci $\pm(0,3 + 0,005 \cdot T) \text{ °C}$ [30]). Velkou roli také hraje způsob časového ořezání dat o počáteční náběh při spouštění čerpadla a následná korelace s modelovanými daty.

5.3. Vybíjení konstantním výkonem

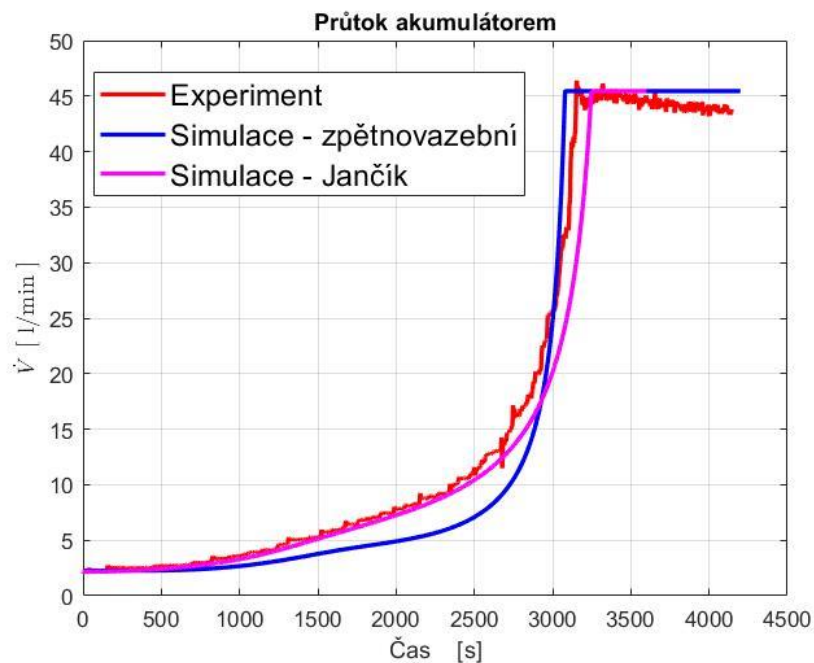
Na experimentálním akumulátoru byla provedena i dvě měření, při kterých byl průtok modulován šoupátkovým ventilem tak, aby se průběh výkonu akumulátoru přiblížil konstantní hodnotě. Jelikož experimentální zařízení nebylo uzpůsobeno pro zpětnovazební řízení, byl Ing. Jančíkem nejprve v simulačním modelu z požadovaného výkonu vypočten potřebný průběh průtoku vody. Ten byl posléze aplikován na experimentálním zařízení.

Jelikož má práce zahrnovala úpravu modelu pro případ nestacionárního průtoku a vybíjení konstantním výkonem, předkládám v této kapitole porovnání vlastní simulace s naměřenými daty Rub_RT35_vyb_10_30_15_28 (příloha č.5) a nezávisle nastaveným modelem Ing. Jančíka.

Na zadanou úlohu byl aplikován model se zpětnovazebním řízením průtoku, do kterého byly zadány následující hodnoty:

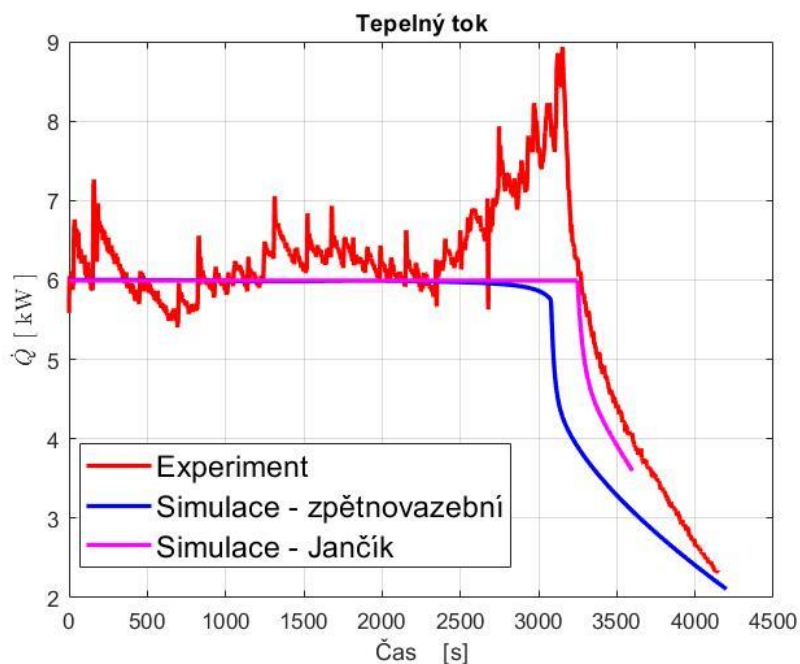
- 1) Počáteční teplota PCM: $T_{PCM_0} = 55 \text{ °C}$
- 2) Průměrná teplota vody vstupující do akumulátoru: $T_{voda_{vstup}} = 15,37 \text{ °C}$
- 3) Požadovaný tepelný výkon: $\dot{Q} = 6 \text{ kW}$
- 4) Maximální průtok vody akumulátorem: $\dot{V}_{voda,max} = 45 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Z výpočtů Ing. Jančíka a zpětnovazebního modelu byl získán velmi podobný průběh průtoku, potřebný pro udržení výkonu 6 kW. Ten byl přibližně dodržen v průběhu měření na experimentálním zařízení.



Obr. 54 Průběhy průtoků při porovnání vybíjení konstantním výkonem

Jak je ovšem patrné na Obr. 55, na kterém jsou vyobrazené průběhy odebíraného výkonu, vypočtený průtok vody nevyústil při aplikaci na reálném zařízení v úplně konstantní výkonovou křivku.



Obr. 55 Průběhy výkonů při porovnání vybíjení konstantním výkonem

V poslední části efektivního vybíjení došlo k postupnému nárůstu výkonu až téměř k hodnotě 9 kW. I přes tuto odlišnost je odchylka mezi simulací a naměřeným průběhem číselně podobná jako u úlohy z minulé kapitoly.

$$\Delta_{\dot{Q}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K |\dot{Q}_e(k) - \dot{Q}_s(k)| = 0,645 \text{ kW}$$

$$s_{\dot{Q}} = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \left| \frac{\dot{Q}_e(k) - \dot{Q}_s(k)}{\dot{Q}_s(k)} \right| = 14,40 \%$$
(46)

Na rozdíl od minulé úlohy již při tomto měření už nedocházelo ke kolísání vstupní teploty ($T_{voda_{vstup}} = (15,37 \pm 0,03) \text{ } ^\circ\text{C}$).

První z možných vysvětlení nárůstu spočívá v kombinaci již zmíněné nepřesnosti použitých termočlánků Pt100 s postupným snižováním teplotního rozdílu vody mezi vstupem do akumulátoru a výstupem na opačné straně.

$$\dot{Q}(k) = \dot{m}_{voda}(k) \cdot c_{voda} \cdot (T_{voda_{out}}(k) - T_{voda_{vstup}}(k))$$
(47)

Výkon je z měřených hodnot počítán dle vztahu (47). Pokud dosadíme za rozdíl teplot hodnoty odečtené v okamžiku maximálního tepelného toku, a to i s vypočtenými odchylkami senzorů, dostáváme:

$$\begin{aligned} T_{voda_{out}} - T_{voda_{vstup}} &= (18,15 \pm 0,39) - (15,37 \pm 0,38) = \\ &= 2,78 \pm 0,77 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$
(48)

Pokud bychom se posunuli ke spodnímu okraji intervalu, výkon v tomto okamžiku by teoreticky mohl být mnohem blíže k 6 kW, než bylo naměřeno. S postupným snižováním teplotního rozdílu v průběhu vybíjení tak roste vliv použité měřící aparatury.

Jev samozřejmě může být způsoben i nedostatkem simulačního modelu. Ten totiž nezahrnuje všechny části akumulátoru, například vnější plášť či pomocné konstrukční prvky uvnitř. Je tedy možné, že v reálném akumulátoru zůstalo více uloženého tepla a při prudkém navýšení průtoku se to projevilo zvýšením tepelného toku. Mezi časy 0 s a 3500 s totiž bylo z modelu vybito 20,028 MJ tepla oproti 22,078 MJ z experimentálního zařízení. Které navíc v čase 3500 s vykazuje vyšší dovybíjecí výkon při stejném průtoku.

Pokud by ovšem k tomuto navýšení výkonu nedošlo, vypadaly by všechny průběhy velmi podobně. Krátce po čase 3000 sekund je krásně pozorovatelný prudký pokles výkonu. V tomto okamžiku totiž zvyšující se průtok narazil na své omezení $\dot{V}_{voda,max}$ a přestal plnit svou roli dorovnávání výkonu.

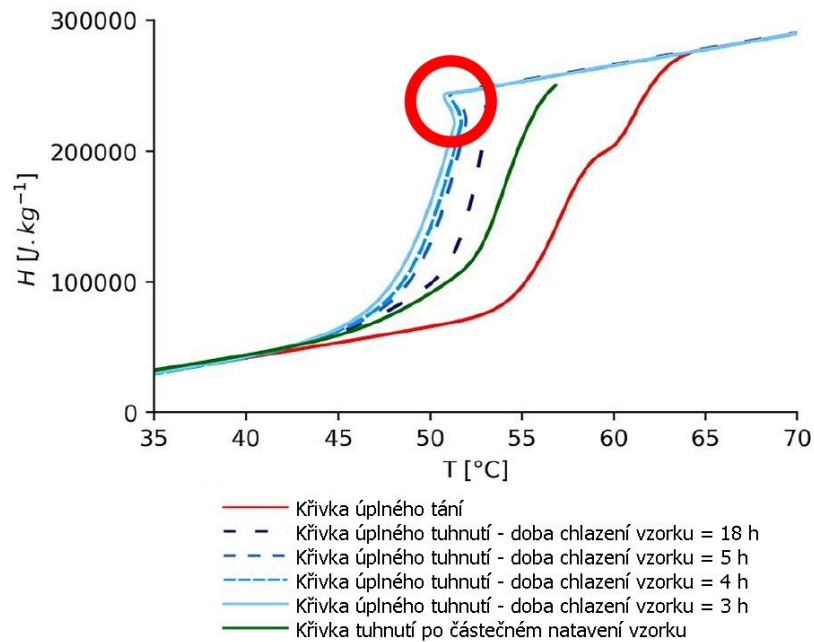
5.4. Cyklický ohřev a ochlazování PCM uvnitř teplotního rozmezí fázové změny

Jak bylo řečeno v úvodu kapitoly 5, na laboratorním akumulátoru nebylo možné provést nová měření, která by se týkala hysterezního chování PCM. Vzhledem k unikátnosti konstrukčního řešení se mi navíc nepovedlo najít relevantní experimentální data z podobného akumulátoru. Měření na typově nejbližší konstrukci uvádí ve své práci [32] Zauner a kolektiv, bohužel i jejich tepelný akumulátor vykazuje podstatné odlišnosti, zejména v podobě umístění několika separačních plechů v příčném směru na tok pracovní kapaliny.

Rozhodl jsem se proto ověřit funkčnost v této práci používaného měřítkového modelu částečné fázové změny pouze na vzorku PCM, nikoli na celém akumulátoru. K tomu využiji data naměřená ve Francii pány Thononem, Fraisseem, Zalewskim a Pailhaem, zveřejněná v únoru roku 2021 v článku [31].

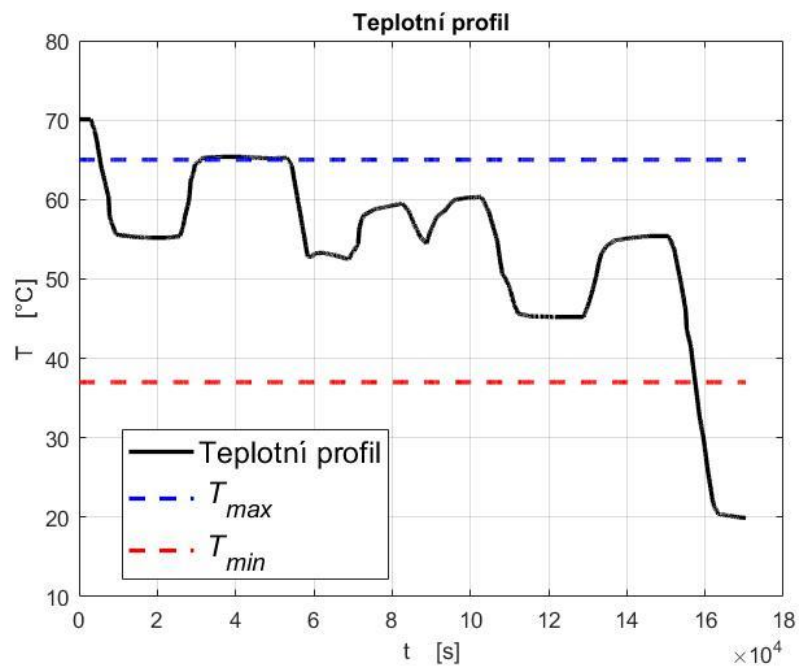
Základem jejich práce je měření chování PCM označeného zkratkou PEG 6000, neboli polyethylen glykol s molární hmotností okolo 6000 g/mol. Tato krystalická látka nepatří mezi běžné PCM, jakými jsou například parafiny či hydráty solí. Teplotní rozmezí fázových změn je velmi široké, tání probíhá mezi 50 a 65 °C, tuhnutí v rozsahu 37 – 54,5 °C.

Jelikož nejsou od výrobce známy hodnoty efektivní měrné tepelné kapacity pro kompletní fázové změny, použil jsem průběhy entalpie naměřené v této práci pro konkrétní vzorek. Thonon a kolektiv uvádějí několik mírně se odlišujících křivek pro tuhnutí v závislosti na rychlosti procesu, jak lze vidět na Obr. 56. V těch nejstrmějších případech byl naměřen i efekt podchlazení (viz kapitola 1.3), v grafu vyznačen červeným kruhem.



Obr. 56 Křivky tání a tuhnutí pro úplnou fázovou změnu PEG 6000 s vyznačením efektu podchlazení (převzato z [31] a upraveno)

Pro svoji práci použiji poslední zveřejněné měření, při kterém byl vzorek o hmotnosti 285 g při tuhnutí ze 70 °C na 20 °C podroben složitému teplotnímu profilu, viz graf Obr. 57. Modrou přerušovanou čarou je vyznačena horní hranice fázových změn, $T_{max} = 65\text{ °C}$, červeně spodní mez $T_{min} = 37\text{ °C}$.

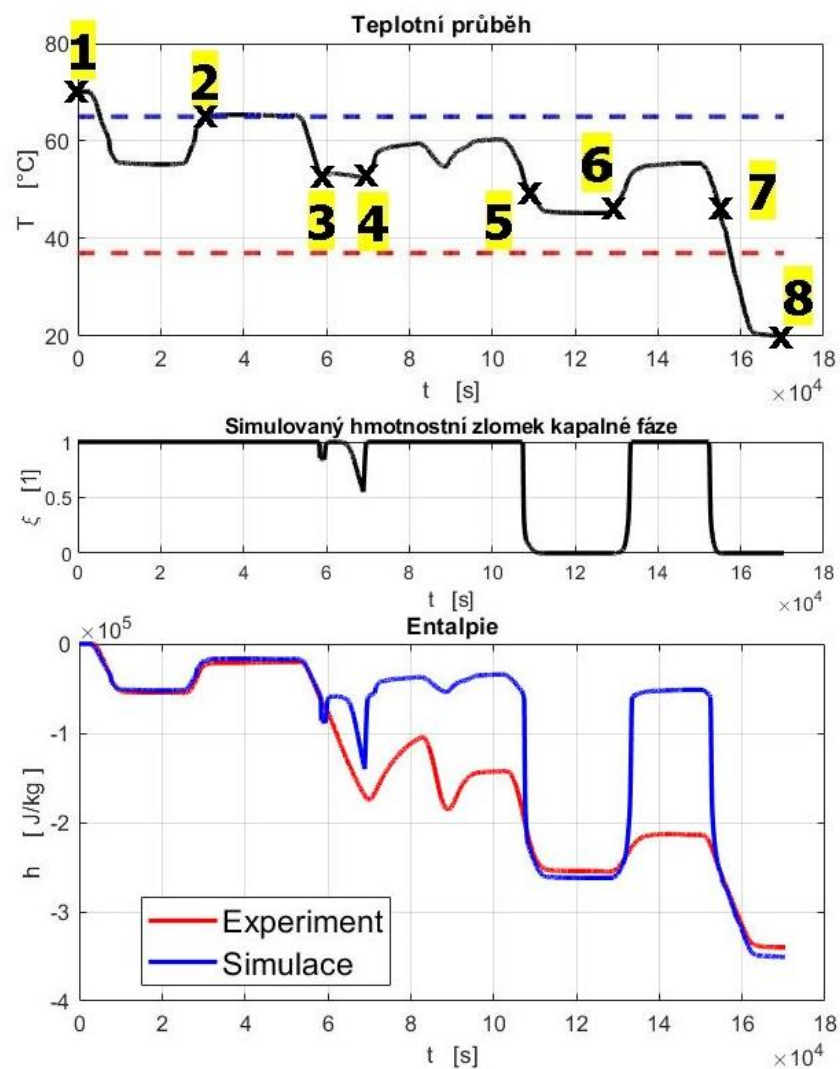


Obr. 57 Průběh teploty PCM při experimentu (vytvořeno dle [31])

Stejnému průběhu byl vystaven i simulační model látky. Vzhledem k dlouhé době (přes 47 hodin) byla jako referenční křivka zvolena ta, jež byla naměřena pro nejdelší, tedy 18hodinové tuhnutí.

Výstupem modelu je jednak průběh hmotnostního podílu kapalné fáze $\xi_s(t)$, ale hlavně průběh měrné entalpie vzorku $h_s(t)$. Ten lze porovnat s průběhem $h_e(t)$, získaným integrací měrného tepelného toku, který při experimentu proudil do/ze vzorku PCM.

Nejprve byl výsledek experimentu porovnán se simulací nevyužívající model částečné fázové změny. V takovém případě se v celém průběhu pohybujeme po křivce úplného tuhnutí.



Obr. 58 Porovnání experimentu se simulací bez modelu částečné fázové změny

Jak lze vidět na Obr. 58, mezi body 1 a 2 nedojde k poklesu pod 54,5 °C, PCM je tedy stále v plně tekutém stavu a dochází pouze ke sdílení citelného tepla. V bodě 3 se mírný nárůst teploty projeví v simulačním modelu zvýšením entalpie, zatímco na naměřených datech pokračuje pokles. Z toho lze usuzovat, že v experimentálním vzorku došlo k jevu podchlazení, s čímž model nepočítá. Mezi body 4 a 5 se potvrdilo očekávání, že tento model skutečnost kopírovat nebude, jde totiž o teplotní cyklování již po částečném ztuhnutí. V bodě 5 je již celý objem v pevném stavu, průběh entalpie tedy opět začíná odpovídat experimentu. V posledním cyklu (6 – 7) je opět znát absence modelu částečné změny. Z naměřených dat lze usuzovat, že nedojde k úplnému roztavení, které indikuje simulace.

Průměrná odchylka mezi experimentálními a nasimulovanými daty je:

$$s_h = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \left| \frac{h_e(k) - h_s(k)}{h_s(k)} \right| = 100,57 \% \quad (49)$$

kde: $h_e(k)$ je hodnota entalpie v k-tém časovém kroku získaná z experimentu
 $h_s(k)$ je hodnota entalpie v k-tém časovém kroku získaná simulací

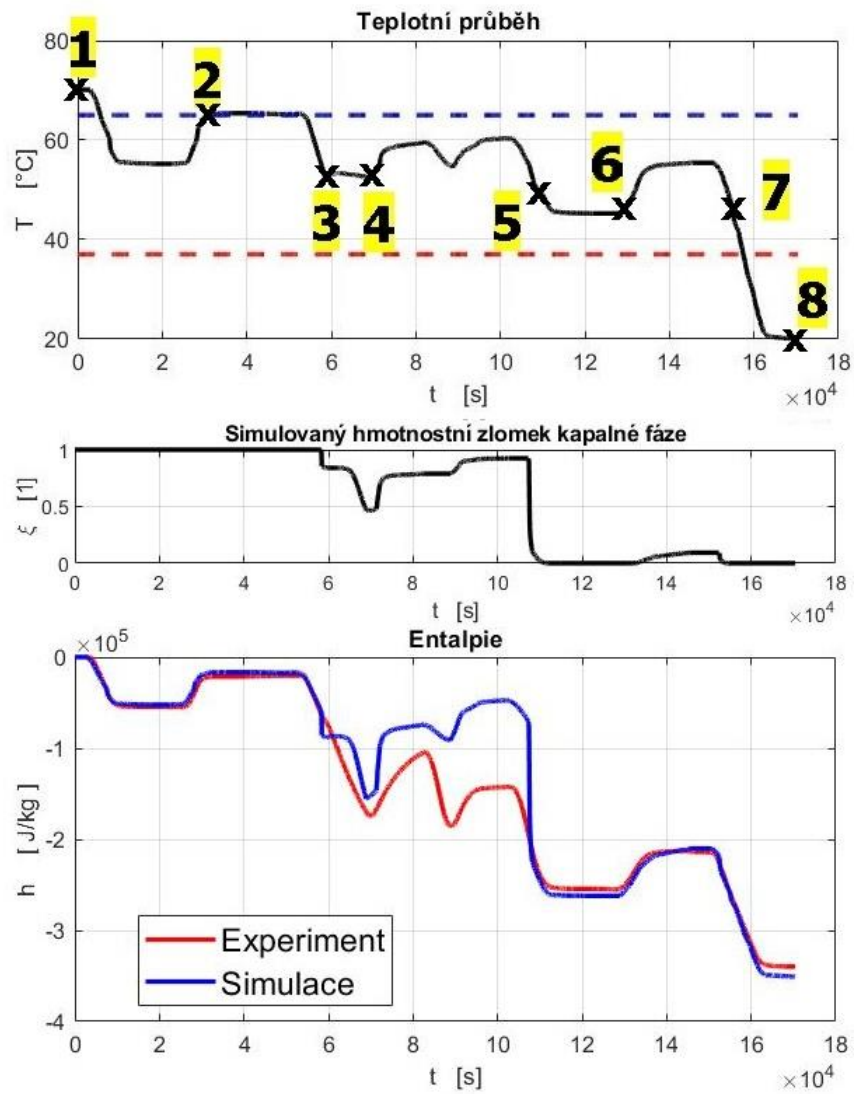
Použitím měřítkové modelu se korelace dat značně vylepší, viz porovnání na Obr. 59. Průměrná odchylka klesne zhruba na třetinu.

$$s_h = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K \left| \frac{h_e(k) - h_s(k)}{h_s(k)} \right| = 33,79 \% \quad (50)$$

Částečné natavení PCM mezi body 6 a 7 je nyní z pohledu entalpie modelováno věrohodně. V bodě 3 je stále patrný rozdíl vzniklý podchlazením, i když již v menší míře. V současné podobě totiž ani Barzův model kompletní fázové změny, ani měřítkový model nejsou schopny podchlazení popsat. Mezi místy 4 a 5 ovšem stále simulace neodpovídají měření. Nárůst entalpie od bodu 4 je modelem nadhodnocen, stejnou měrou je ale posléze zesíleno i vybíjení, takže v bodě 5 už si data opět odpovídají. Na podobný nedostatek upozorňují i autoři článku u vlastního modelu.

Možné vysvětlení je zmíněno v práci [33], věnující se chování PEG 6000 při tání a tuhnutí. Ze studie plyne, že tato látka může při krystalizaci nabývat tří různých forem, které pak do značné míry ovlivňují následné tavení. Je zde potvrzen vliv rychlosti tuhnutí na druh krystalizace, velký vliv má i chemická čistota daného vzorku. Je tedy možné, že v těchto krátkých vnitřních cyklech mezi body 3 a 5 došlo v části objemu ke vzniku jiné krystalické struktury, což mělo za následek jiné tepelné chování vzorku.

Pokud bychom tento úsek nezahrnovali do vypočtené odchylky, získali bychom hodnotu $s_h = 8,87 \%$.



Obr. 59 Porovnání experimentu se měřítkovým modelem

6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo rozšířit funkčnost numerického modelu latentního akumulátoru, jednak o schopnost simulování hysterezního chování při částečných fázových změnách v PCM a jednak o možnost výpočtu případů s nestacionárním průtokem teplotně tekutiny, v tomto případě vody. To umožnilo provést analýzu vybíjení akumulátoru konstantním výkonem a studium vlivu jednotlivých parametrů při hledání optimální geometrie.

V úvodu práce je čtenář seznámen se základními principy chování PCM, možnostmi jejich zapouzdření a s typy konstrukce latentních tepelných akumulátorů.

Následující teoretická část pak poskytuje přehled v odborné literatuře uvedených modelů pro popis úplné a částečné fázové změny. Na základě autory dosažených výsledků a vzhledem k podrobnému popisu a relativní jednoduchosti (především vůči dynamickému modelu) jsem se rozhodl pro využití statického měřítkového modelu ve výpočtovém programu.

Po představení původního numerického modelu akumulátoru vytvořeného doc. Hyhlíkem je popsán postup přepsání měřítkového modelu ze spojitě do potřebné diskrétní podoby, jeho implementace do celkového modelu LHTES a princip vytvořené funkce pro kontrolu změny z ohřevu na chlazení či obráceně. Odlišnou formulací měřítkového modelu byl následně odstraněn vznik nespojitostí při výpočtu střední teploty PCM při uvažování jednobuňkového modelu akumulátoru. Díky optimalizaci kódu byl výpočtový čas programu i přes rozšíření udržen téměř na původní hodnotě.

Provedená úprava programu pro nestacionární průtok vody umožnila simulace vybíjení konstantním výkonem. Při následném vyhodnocování vlivu jednotlivých geometrických parametrů akumulátoru se mi nejprve nepodařilo přesně definovat podmínky simulací, což vedlo ke slepé uličce a zavádějícím výsledkům. Po opravě formulace již výsledky vykazují jasný trend odpovídající počátečním hypotézám. Jelikož se vlastnosti akumulátoru zlepšují se snižujícím se průměrem pouzder na PCM, což je v nepřímé úměře s výrobní cenou, bude při návrzích akumulátorů nutné právě využití simulací pro nalezení optima. Kromě tepelných parametrů je v této práci brán ohled i na potřebné průtoky vody. V další části této kapitoly je ukázáno, že alternování mezi počtem a délkou trubek nemá na chování akumulátoru vliv. Potřebný objem PCM je tak pro nalezený optimální průměr pouzder možné rozložit v podstatě libovolně. Jelikož se vliv maximálního průtoku vody akumulátorem na rychlost dovybíjení zbytkového tepla ukázal jako minimální, lze tento parametr nastavit na minimální přípustnou hodnotu, určenou na základě tolerovaného výkonu jako $\dot{m}_{voda,max} = \dot{m}_{voda}(t_{ef})$.

Možnost ověření výsledků ze simulací byla značně ovlivněna nefunkčním laboratorním akumulátorem a jeho následnou demontáží a přestavbou na jiný typ. Nicméně mi byla poskytnuta naměřená data z loňského roku, díky kterým bylo možné porovnat simulační model na dvou rozdílných úlohách. Tou první bylo monotónní vybíjení akumulátoru při konstantním průtoku vody a druhou, z hlediska mé práce důležitější, bylo vybíjení konstantním výkonem. Při ní vykazují naměřený a simulovaný průběh výkonu podobný trend, až na okamžik před dosažením maximálního průtoku. Příčina odchylky bohužel není známa, nicméně i při uvažování chyb senzorů se zdá, že simulační model podceňuje množství uložené energie v akumulátoru.

V poslední části jsou pro evaluaci měřítkového modelu použita data z měření od zahraničních autorů. Při použití modelu na složitý teplotní profil u krystalické látky PEG 6000 došlo ke snížení odchylky průběhů entalpie na třetinu oproti programu nevyužívajícímu model částečné fázové změny. Pro zpřesnění simulace by bylo nutné doplnit modely o schopnost popsat efekt podchlazení.

Jelikož konfrontace výsledků simulací s experimentem byla v této práci spíše okrajovou záležitostí, navíc zatíženou nedostatkem dostupných dat, vidím tuto oblast jako další logický krok ve vývoji výpočetního modelu. Z prvních náznaků je patrné, že jak měřítkový model, tak model akumulátoru jsou zatím schopny poskytnout spíše dobrý odhad nežli přesné hodnoty použitelné v praxi. Provedení více experimentů s konkrétním zaměřením by mohlo naznačit oblasti nedostatků obou modelů. Nicméně i tak se podařilo zejména ze simulací konfigurací akumulátoru zjistit zajímavé poznatky použitelné při konstrukci reálného zařízení.

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Zjednodušený graf porovnávající ukládání tepla do vody a do PCM [5]..... | 13 |
| Obr. 2 Schéma akumulátoru s válcovými pouzdry | 15 |
| Obr. 3 Inverzní konstrukce trubkového akumulátoru | 15 |
| Obr. 4 Akumulátor využívající rozdílných hustot [9]..... | 16 |
| Obr. 5 Akumulátor s mikro-zapouzdřeným PCM [9]..... | 16 |
| Obr. 6 Porovnání fázového přechodu u vody a PCM RT64HC | 17 |
| Obr. 7 Lineární model..... | 19 |
| Obr. 8 Vollerův model | 20 |
| Obr. 9 Polynomický model – průběhy entalpií..... | 21 |
| Obr. 10 Polynomický model – efektivní měrná tepelná kapacita..... | 21 |
| Obr. 11 RT35HC - naměřené hodnoty cp [15]..... | 22 |
| Obr. 12 Modelovaný průběh $\xi(T)$ a cpT pro RT64HC | 24 |
| Obr. 13 Úsečkový model [11]..... | 25 |
| Obr. 14 Úsečkový model v grafu $h(T)$ [21] | 26 |
| Obr. 15 Použití úsečkového modelu na RT64HC..... | 26 |
| Obr. 16 Měřítkový model [11]..... | 27 |
| Obr. 17 Použití měřítkového modelu na RT64HC | 28 |
| Obr. 18 Porovnání modelů částečné fázové změny [22] | 28 |
| Obr. 19 Porovnání měřítkového (vlevo) a dynamického (vpravo) modelu [20] | 30 |
| Obr. 20 Schéma hlavní části akumulátoru | 31 |
| Obr. 21 Naskládané tyče s PCM v experimentálním zařízení [23] | 32 |
| Obr. 22 Režimy nabíjení (vlevo) a vybíjení (vpravo)..... | 33 |
| Obr. 23 Schéma průtoku vody modelem | 34 |
| Obr. 24 Naznačení výpočtové sítě modelu | 35 |
| Obr. 25 Schématické znázornění myšlenky zjednodušení modelu..... | 37 |
| Obr. 26 Přehled výsledků původního modelu pro vzorovou úlohu | 39 |
| Obr. 27 Grafické znázornění principu funkce kontrola T_z | 42 |
| Obr. 28 Porovnání řešení vzorové úlohy a) původním modelem (zeleně), b) upraveným modelem (černě) | 43 |
| Obr. 29 Přehled výsledků upraveného modelu pro modifikovanou vzorovou úlohu | 44 |
| Obr. 30 Porovnání entalpií..... | 45 |
| Obr. 31 Střední teplota – upravený měřítkový model | 46 |
| Obr. 32 Porovnání měrné entalpie získané a) integrací (černě), b) ze střední teploty (zeleně)..... | 47 |
| Obr. 33 Porovnání ξ_0 získaného a) integrací (černě), b) ze střední teploty (zeleně) | 48 |
| Obr. 34 Porovnání výpočtových časů | 49 |
| Obr. 35 Vliv průtoku vody na výkon akumulátoru..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Obr. 36 Ukázka tolerančního rozsahu pro $Q_{pož} = 80 \text{ kW}$ a $\sigma = 0,95$ | 54 |
| Obr. 37 Ukázka efektivního pásma..... | 54 |
| Obr. 38 Vyznačení rozměrů akumulátoru..... | 56 |
| Obr. 39 Vyznačení délkových rozměrů akumulátoru..... | 58 |
| Obr. 40 Konstantní výška nádrží – porovnání | 59 |
| Obr. 41 Konstantní výška nádrží – podíl objemu PCM..... | 60 |
| Obr. 42 Porovnání geometrií akumulátoru pro průměry trubek $d = 10$, $d = 20$ a $d = 30$ mm (zleva doprava) | 61 |
| Obr. 43 Porovnání geometrií akumulátoru pro průměry trubek $d = 10$, $d = 20$ a $d = 30$ mm (zleva doprava) | 62 |
| Obr. 44 Konstantní objem akumulátoru - porovnání | 63 |
| Obr. 45 Porovnání průběhů průtoků vody | 64 |
| Obr. 46 Průměrný průtok vody | 65 |
| Obr. 47 Průběh průtoku pro vybrané hodnoty maximálního průtoku vody..... | 68 |
| Obr. 48 Průběh výkonu pro vybrané hodnoty maximálního průtoku vody | 69 |
| Obr. 49 Kaskádovité dovybíjení | 70 |
| Obr. 50 Schéma experimentálního akumulátoru [29]..... | 72 |
| Obr. 51 Pohled na průtokoměr a teplotní čidla na vstupu do akumulátoru [29]..... | 73 |
| Obr. 52 Průběhy průtoků při porovnání vybíjení konstantním průtokem..... | 74 |
| Obr. 53 Průběhy výkonů při porovnání vybíjení konstantním průtokem | 74 |
| Obr. 54 Průběhy průtoků při porovnání vybíjení konstantním výkonem | 76 |
| Obr. 55 Průběhy výkonů při porovnání vybíjení konstantním výkonem | 76 |
| Obr. 56 Křivky tání a tuhnutí pro úplnou fázovou změnu PEG 6000 s vyznačením efektu podchlazení (převzato z [31] a upraveno)..... | 79 |
| Obr. 57 Průběh teploty PCM při experimentu (vytvořeno dle [31]) | 79 |
| Obr. 58 Porovnání experimentu se simulací bez modelu částečné fázové změny | 80 |
| Obr. 59 Porovnání experimentu se měřítkovým modelem | 82 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Příklady pouzder (převzato z [13] a upraveno) | 14 |
| Tab. 2 Přehled vypočtených parametrů pro tání | 23 |
| Tab. 3 Přehled vypočtených parametrů pro tuhnutí..... | 23 |
| Tab. 4 Porovnání rozdílu entalpií | 24 |
| Tab. 5 Výběr z kódu pro iterační určení teplotního pole | 40 |
| Tab. 6 Funkce kontrolaTz | 41 |
| Tab. 7 Porovnání výpočtových časů | 49 |
| Tab. 8 Konstantní výška nádrží (N=1000) – geometrie..... | 58 |
| Tab. 9 Konstantní výška nádrží (N=1000) – hodnoty parametrů (v šedém poli nejlepší dosažené hodnoty) | 58 |
| Tab. 10 Konstantní objem akumulátoru (N=1000) - geometrie | 61 |
| Tab. 11 Konstantní výška nádrží (N=1000) – hodnoty parametrů (v šedém poli nejlepší dosažené hodnoty) | 62 |
| Tab. 12 Konstantní objem akumulátoru (d = 20 mm) - geometrie | 66 |
| Tab. 13 Konstantní objem akumulátoru a pevné d – porovnání..... | 66 |
| Tab. 14 Konstantní objem akumulátoru (d = 20 mm) - hodnoty parametrů..... | 67 |
| Tab. 15 Porovnání dovybíjecích časů | 69 |

Seznam použité literatury

- [1] AGYENIM, Francis, Neil HEWITT, Philip EAMES a Mervyn SMYTH. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, s. 615-628. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.10.015
- [2] KRAUSE, Luboš. *Akumulace tepelné energie v PCM*. Liberec, 2017. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
- [3] MAREČEK, Tomáš. *Akumulace tepelné energie skupenskou změnou látek*. Brno, 2015. Bakalářská práce. FEKT VUT v Brně, Vedoucí práce Ing. Lukáš Radil, Ph.D.
- [4] ZAVORALOVÁ, Pavla. PCM ve stavebnictví Díl 1: Základní charakteristiky PCM. *Tzbinfo* [online]. 2011 [cit. 2020-5-10]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/izolace-strechy-fasady/7360-pcm-ve-stavebnictvi-dil-1-zakladni-charakteristiky-pcm>
- [5] Trendy v solární tepelné technice (V) - Zásobníky tepla. *TZB Info* [online]. 2n. 1., 2005 [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/2799-trendy-v-solarni-tepelne-technice-v-zasobniky-tepla>
- [6] BARZ, Tilman a Andreas SOMMER. Modeling hysteresis in the phase transition of industrial-grade solid/liquid PCM for thermal energy storages. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, s. 701-713. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.032
- [7] SHARMA, Atul, V.V. TYAGI, C.R. CHEN a D. BUDDHI. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, s. 318-345. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2007.10.005
- [8] KENISARIN, M a K MAHKAMOV. Solar energy storage using phase change materials☆. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007, s. 1913-1965. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2006.05.005
- [9] MEHLING, Harald a Luisa F. CABEZA. *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*. Berlin: Springer, [2008]. Heat and mass transfer. ISBN 978-3-540-68556-2.
- [10] Phase Change Material (PCM) Selection. *Advanced cooling technologies* [online]. Pensylvánie, USA, 2021 [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://www.1-act.com/products/pcm-heat-sinks/pcmselection/>
- [11] BARZ, Tilman, Johann EMHOFER, Klemens MARX, Gabriel ZSEMBINSZKI a Luisa F. CABEZA. Phenomenological modelling of phase transitions with hysteresis in solid/liquid PCM. In: *Journal of Building Performance Simulation*. 2019, s. 770-788. ISSN 1940-1493. Dostupné z: doi:10.1080/19401493.2019.1657953
- [12] SALUNKHE, Pramod B. a Prashant S. SHEMBEKAR. A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, s. 5603-5616. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.05.037
- [13] ELAREM, Raja, Talal ALQAHTANI, Sofiene MELLOULI, Faouzi ASKRI, Abhilash EDACHERIAN, Tirth VINEET, Irfan Anjum BADRUDDIN a Jemni

- ABDELMAJID. A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units. In: *Energy Storage*. 2021. ISSN 2578-4862. Dostupné z: doi:10.1002/est2.127
- [14] DELGADO, Mónica, Ana LÁZARO, Javier MAZO, José María MARÍN a Belén ZALBA. Experimental analysis of a microencapsulated PCM slurry as thermal storage system and as heat transfer fluid in laminar flow. In: *Applied Thermal Engineering*. 2012, s. 370-377. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.10.050
- [15] RUBITHERM [online]. Berlin: Rubitherm Technologies, 2021 [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: <https://www.rubitherm.eu/en/>
- [16] THONON, Maxime, Gilles FRAISSE, Laurent ZALEWSKI a Mickael PAILHA. Towards a better analytical modelling of the thermodynamic behaviour of phase change materials. In: *Journal of Energy Storage*. 2020. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2020.101826
- [17] GOWREESUNKER, B.L., S.A. TASSOU a M. KOLOKOTRONI. Improved simulation of phase change processes in applications where conduction is the dominant heat transfer mode. In: *Energy and Buildings*. 2012, s. 353-359. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.008
- [18] VOLLER, V.R. Development and application of a heat balance integral method for analysis of metallurgical solidification. In: *Applied Mathematical Modelling*. 1989, s. 3-11. ISSN 0307904X. Dostupné z: doi:10.1016/0307-904X(89)90191-1
- [19] UZAN, Avihai Yosef, Yoram KOZAK, Yosef KORIN, Itay HARARY, Harald MEHLING a Gennady ZISKIND. A novel multi-dimensional model for solidification process with supercooling. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017, s. 91-102. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.046
- [20] BARZ, Tilman a Andreas SOMMER. Modeling hysteresis in the phase transition of industrial-grade solid/liquid PCM for thermal energy storages. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018, s. 701-713. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.032
- [21] BONY, Jacques a Stéphane CITHERLET. Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change materials. In: *Energy and Buildings*. 2007, s. 1065-1072. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2006.10.017
- [22] KLIMEŠ, Lubomír, Pavel CHARVÁT, Mahmood MASTANI JOYBARI, Martin ZÁLEŠÁK, Fariborz HAGHIGHAT, Karthik PANCHABIKESAN, Mohamed EL MANKIBI a Yanping YUAN. Computer modelling and experimental investigation of phase change hysteresis of PCMs: The state-of-the-art review. In: *Applied Energy*. 2020. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.114572
- [23] SCHMIRLER, Michal, Jakub DEVERA a Adam BLÁHA. *Zkoušky kapacity a rychlosti cyklu akumulárních látek: Technická zpráva LA-02-VI-09*. Praha, 2020.
- [24] FANG, Yuhang, Jianlei NIU a Shiming DENG. Numerical analysis for maximizing effective energy storage capacity of thermal energy storage systems by enhancing heat transfer in PCM. In: *Energy and Buildings*. 2018, s. 10-18. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2017.12.006
- [25] FANG, Yuhang, Jianlei NIU a Shiming DENG. An analytical technique for the optimal designs of tube-in-tank thermal energy storage systems using PCM. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, s. 849-859. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.138
- [26] LIANG, Haobin, Jianlei NIU a Yixiang GAN. Performance optimization for shell-and-tube PCM thermal energy storage. In: *Journal of Energy Storage*. 2020. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2020.101421

- [27] REZAEI, Ehsan, Maurizio BARBATO, Alberto ORTONA a Sophia HAUSSENER. Design and optimization of a high-temperature latent heat storage unit. In: *Applied Energy*. 2020. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2019.114330
- [28] RAUL, Appasaheb, Mohit JAIN, Swapnil GAIKWAD a Sandip K. SAHA. Modelling and experimental study of latent heat thermal energy storage with encapsulated PCMs for solar thermal applications. In: *Applied Thermal Engineering*. 2018, s. 415-428. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.07.123
- [29] SCHMIRLER, Michal, Jakub DEVERA a Adam BLÁHA. *Zkušební zařízení pro měření parametrů akumulčních látek v laboratorním prostředí: Technická zpráva LA-02-VI-04*. Praha, 2020.
- [30] ODPOROVÉ TEPLoměRY. *Rawet s.r.o.* [online]. Blansko: Rawet, 2021 [cit. 2021-7-22]. Dostupné z: <https://www.rawet.cz/stahnout/-999?name=rtd-pdf>
- [31] THONON, Maxime, Gilles FRAISSE, Laurent ZALEWSKI a Mickael PAILHA. Analytical modelling of PCM supercooling including recalescence for complete and partial heating/cooling cycles. In: *Applied Thermal Engineering*. 2021. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.116751
- [32] ZAUNER, Christoph, Florian HENGSTBERGER, Benjamin MÖRZINGER, Rene HOFMANN a Heimo WALTER. Experimental characterization and simulation of a hybrid sensible-latent heat storage. In: *Applied Energy*. 2017, s. 506-519. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.079
- [33] VERHEYEN, S, P AUGUSTIJNS, R KINGET a G VAN DEN MOOTER. Melting behavior of pure polyethylene glycol 6000 and polyethylene glycol 6000 in solid dispersions containing diazepam or temazepam: a DSC study. In: *Thermochimica Acta*. 2001, s. 153-164. ISSN 00406031. Dostupné z: doi:10.1016/S0040-6031(01)00666-9

Seznam příloh

Příloha 1: Modely úplné fázové změny

- Model_linear.m
- Model_Voller.m
- Model_Polynom.m
- Model_Gauss.m
- Identifikované parametry PCM použitých v této práci:
 - RT35HC, RT64HC, SP31, PEG 6000

Příloha 2: Modely částečné fázové změny

- Model_useckovy.m
- Model_meritkovy.m
- Identifikované parametry PCM použitých v této práci:
 - RT35HC, RT64HC, SP31, PEG 6000
- vstupniSignal.m (zadaný teplotní průběh)

Příloha 3: Model akumulátoru s implementovaným měřítkovým modelem a úpravou na nestacionární průtok vody

- Main_script.m
- MODELvlastnost.m
- PCMVlastnost.m
- OPaPP.m
- TDMAsolver.m

Příloha 4: Model akumulátoru s implementovaným měřítkovým modelem a úpravou pro vybíjení konstantním výkonem

- Main_script.m
- MODELvlastnost.m
- PCMVlastnost.m
- OPaPP.m
- TDMAsolver.m

Příloha 5: Měření na laboratorním akumulátoru

- Rub_RT35_vyb_09_15_12_25.csv
- Rub_RT35_vyb_10_30_15_28.csv