

Miloš Chvátal¹, Pavel Hospodář², Petr Vrchota³,
Nikola Žižkovský⁴, Martin Doleček⁵, Lukáš Vrátil⁶

Lokomotivní celky

Klíčová slova: *lokomotivní kabina, pomocné pohony, numerické simulace, přestup tepla, proudění, systémová analýza, autonomní sběr dat*

Úvod

Projekt Lokomotivní celky vznikl v důsledku nutnosti zvýšit konkurenceschopnost českých lokomotiv na perspektivních trzích v severských zemích a na dálném východě. Projektu se účastní firma CZ LOKO, a.s. jako příjemce a VZLÚ, a.s. jako další účastník projektu. Příjemce projektu zastřešuje práce v oblasti vývoje a konstrukce lokomotivních kabin a pomocných pohonů, zatímco VZLÚ, a.s. zastřešuje analytické činnosti.

Cílem projektu Lokomotivní celky je vyvinout a modernizovat nové části lokomotivy pro extrémní klimatické podmínky, vyskytující se v severských zemích a na dálném východě. Projekt je rozdělen na lokomotivní kabiny, u kterých je cílem snížení energetické náročnosti a zvýšení komfortu obsluhy a pomocné pohony u kterých je cílem zvýšení spolehlivosti při extrémních klimatických podmínkách. Výstupem projektu jsou/budou funkční vzorky nové kabiny a pomocných pohonů.

Projekt TA03030465/Lokomotivní celky je řešen s finanční podporou TA ČR.

1. Lokomotivní kabina

1.1. Analýza stavu

Práce na lokomotivní kabině byly zahájeny zpracováním podrobné analýzy současného stavu konstrukce věžových kabin pro potřeby tvorby simulačních modelů [1]. Model pro numerické simulace vychází z CAD modelů určených pro výrobu. Ve srovnání se skutečným provedením kabiny je numerický model patřičně zjednodušen

¹ Ing. Miloš Chvátal, PhD. (1982), absolvent VUT Brno FEKT, VZLÚ, a.s.: příprava měření a zpracování dat

² Ing. Pavel Hospodář (1983), absolvent ČVUT v Praze FEL, VZLÚ, a.s.: příprava matematických modelů a systémová analýza

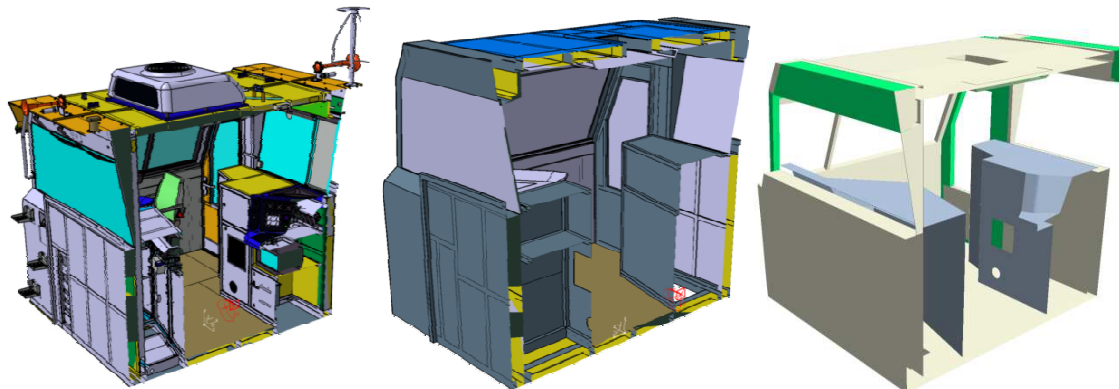
³ Ing. Petr Vrchota, PhD. (1981), absolvent ČVUT v Praze FS, VZLÚ, a.s.: numerické simulace proudění

⁴ Ing. Nikola Žižkovský (1980), absolvent ČVUT v Praze FS, VZLÚ, a.s.: numerické simulace proudění a přestupu tepla

⁵ Martin Doleček (1975), absolvent SPŠS v České Lípě, CZ LOKO, a.s.: vedoucí oddělení mechanické konstrukce

⁶ Lukáš Vrátil (1986), absolvent SPŠ v Jihlavě, obor strojírenství, CZ LOKO, a.s.: konstruktér v oddělení mechanické konstrukce

tak, aby nebyl neúnosně komplexní a zároveň, aby poskytoval dostatečnou představu o proudovém i teplotním poli v celé výpočetní doméně.



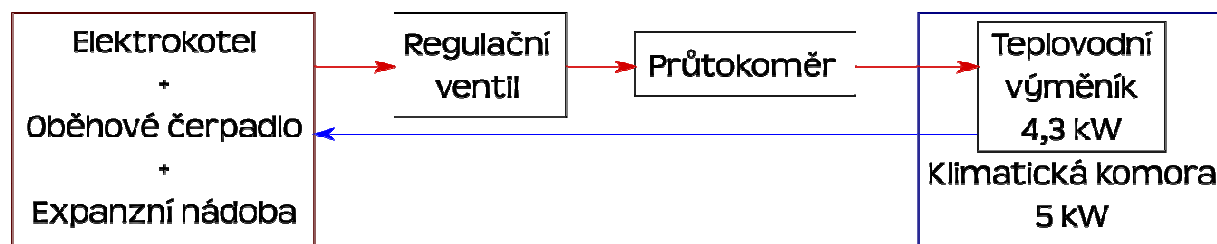
Obr. 1 - Zjednodušení CAD modelu pro numerické simulace (Zdroj: autoři)

Současné věžové/nástavbové lokomotivní kabiny jsou charakteristické společným prostorem řídicích stanovišť lokomotiv. Kabiny jsou zpravidla vybaveny teplovodním topením ve stupíncích, elektrickým topením, klimatizační jednotkou pro chlazení i topení a nezávislým naftovým topením pro ohřev odstavené kabiny. Konstrukce kabiny je příhradová vyplněná izolačním materiálem potažená plechem z vnější strany a HPL laminátem ze strany vnitřní.

Jako první byla realizována analýza lokomotivní kabiny založená na empirických postupech. Tato analýza dala rámcový náhled na celkovou tepelnou ztrátu lokomotivní kabiny při nepříznivých klimatických podmínkách. Při venkovní teplotě $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ je takto stanovená tepelná ztráta prostupem 2942 W a celková tepelná ztráta vychází na 5738 W . Tyto výsledky, umožňují posoudit, zda instalovaný tepelný výkon použitých zdrojů v kabině je dostatečný či nikoliv.

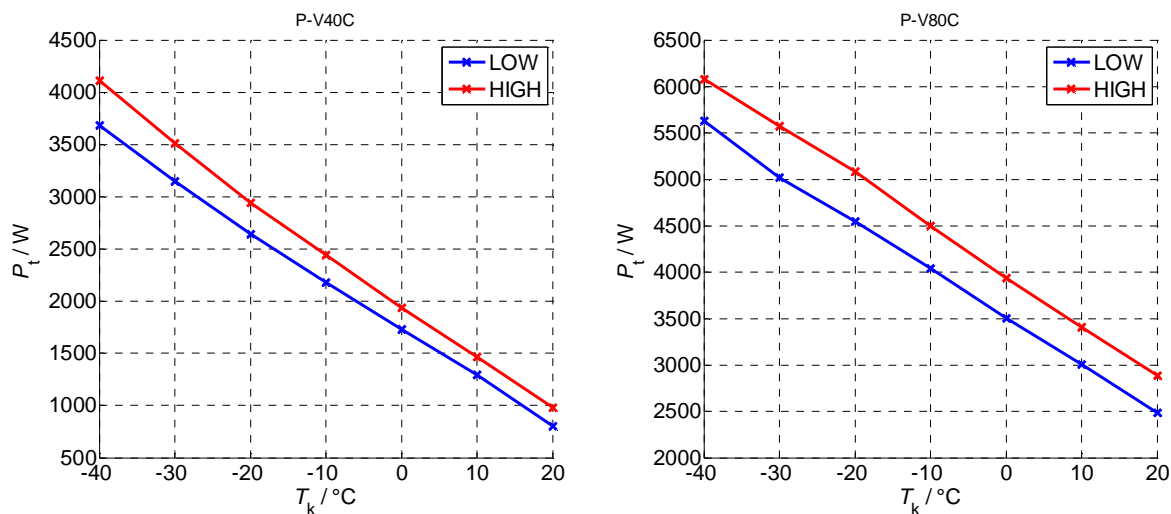
1.2. Měření na kabině a teplovodním topení

Pro potřeby přesnější numerické analýzy bylo provedeno měření skutečných průtoků z jednotlivých distribučních elementů [1], [2]. U teplovodních výměníků bylo realizováno měření nominálního výkonu pro porovnání s výkonem skutečným.



Obr. 2 - Schéma měření v klimatické komoře (Zdroj: autoři)

Skutečný výkon byl proměřen v závislosti na teplotě vody a okolí při pomalém i rychlém běhu ventilátoru teplovodního výměníku. Toto měření bylo realizováno v klimatické komoře s deklarováním výkonem 5 kW s uvedeným rozsahem -20 až $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ve které byl umístěn teplovodní výměník. Z vnějšího zdroje pak byla přivedena voda o teplotách 40 , 60 a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].



Obr. 3 - Závislost tepelného výkonu teplovodního výměníku pro dvě teploty vody v závislosti na teplotě okolí (Zdroj: autoři)

Z naměřených charakteristik je patrné, že s klesajícím rozdílem teplot vody a vzduchu klesá i předaný výkon. Obdobně s rostoucí teplotou okolí klesá tepelná ztráta kabiny, resp. potřebný tepelný výkon.

Pro každé z měření vznikl program pro sběr dat z jednotlivých čidel pro následné zpracování a statistické vyhodnocení.

1.3. CFD analýza – identifikace kritických míst, návrh změn

Numerické simulace proudění v kabině a prostupu tepla stěnou jsou prováděny na zjednodušeném modelu, ve kterém byly použity ekvivalentní součinitele tepelné vodivosti, stanovené na základě charakteristického výseku stěnou. Tuto metodu lze použít na libovolnou stěnu se systematickými tepelnými mosty, což příhradová konstrukce lokomotivní kabiny je [6].

V první numerické simulaci [4] byly aplikovány všechny dostupné tepelné zdroje, což je případ, který by ve skutečnosti nastat neměl. Nicméně i tento výpočet umožnil stanovit tepelnou ztrátu věžové lokomotivní kabiny. Výpočet byl rovněž proveden jak na stlačitelném, tak nestlačitelném modelu. Stlačitelný model využívá dokonalé stlačitelnosti plynu a je obecně vhodný pro všechny rychlosti proudění, zatímco nestlačitelný model je plyn s konstantní hustotou využívaný zejména v případech, kdy je rychlost proudění nízká. Při nízkých rychlostech proudění jsou rozdíly mezi řešením stlačitelného a nestlačitelného plynu minimální, nicméně řešení nestlačitelného modelu je rychlejší. Na základě porovnání tepelných ztrát vypočtených jednotlivými modely a empirickým výpočtem byl pro další výpočty zvolen stlačitelný model pro výpočet přestupu tepla.

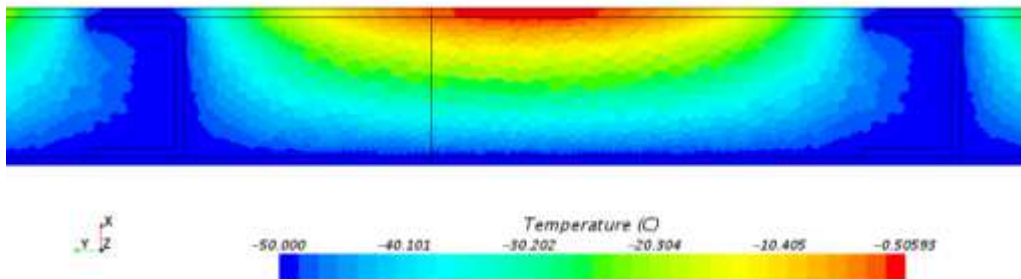
Tepelná ztráta uvažované kabiny vyšla na 6184 W, což je o 7,7 % víc než v případě empirického výpočtu. Z výsledků numerické simulace je patrná nesymetričnost jak rychlostního tak teplotního pole, která je do značné míry dána nesymetrickým uspořádáním kabiny.

Jednou z možností jak zlepšit symetričnost proudění v kabině je úprava nestavitelných distribučních elementů. V tomto případě se jedná o úpravu distribučních elementů u nezávislého naftového topení a o úpravu mřížky elektrického topení umístěného v jedné ze skříněk v kabině.

Další numerické simulace byly provedeny v konkrétní konfiguraci topných těles a izolačních hmot. Byly uvažovány dvě varianty izolačních materiálů a dva režimy vytápění. Cílem těchto výpočtů bylo ověření vlivu navržených změn spočívajících v rozptylu proudu do prostoru kabiny [7].

1.4. Změna skladby stěny

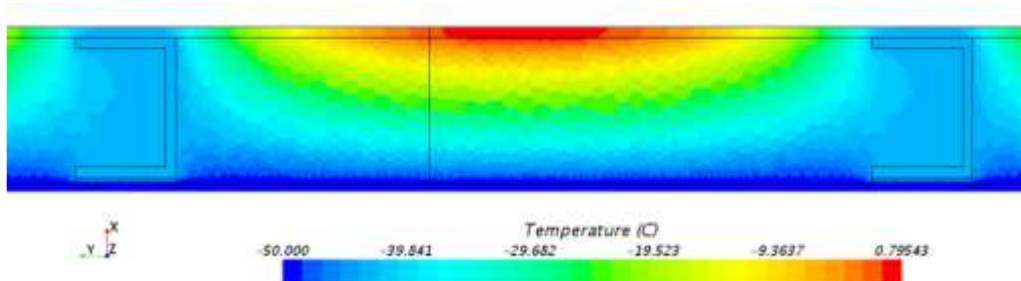
V 2D simulacích prostupu tepla stěnou byl, na modelu systematického výseku, demonstrován vliv umístění izolačního materiálu pod vnitřní, resp. vnější plášť, tak aby byly izolovány tepelné mosty v příhradové konstrukci.



Obr. 4 - Rozložení teplot u výchozí skladby stěny (Zdroj: autoři)

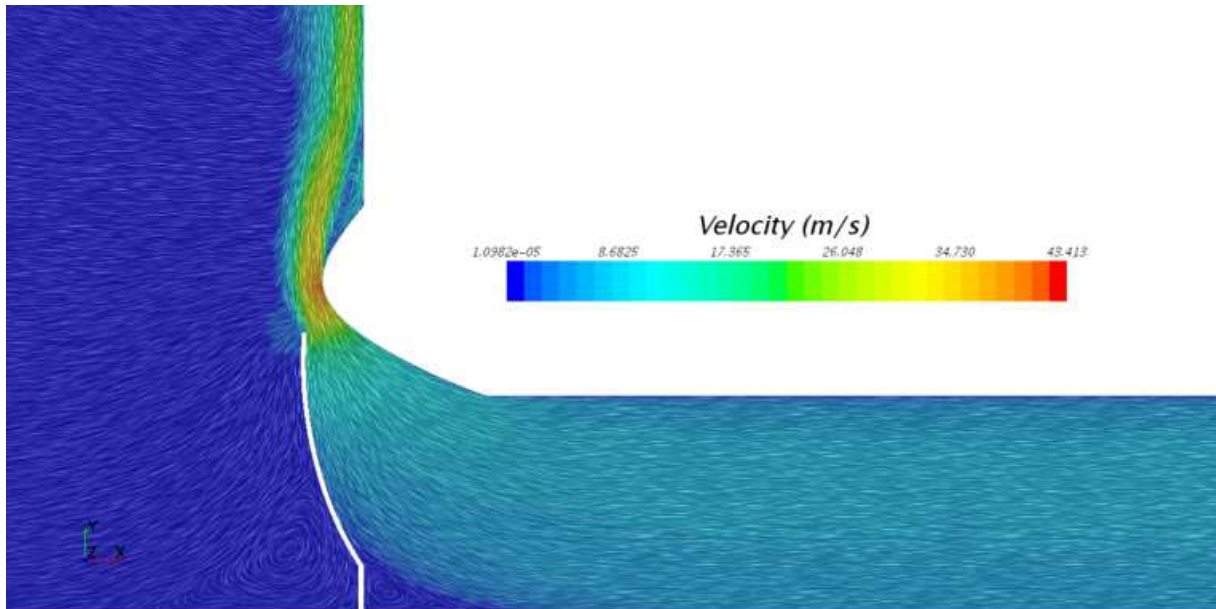
Simulace byla realizována se dvěma rozdílnými okrajovými podmínkami. Na vnější stěně byla aplikována teplota okolí, zatímco na vnitřní stěně jednotkový výkon. Z rozdílu teplot na vnější a vnitřní stěně byl následně stanoven průměrný součinitel tepelné vodivosti λ . Vliv mezní vrstvy byl v tomto případě zanedbán, neboť se jednalo o posouzení vlastností konstrukce.

V případě umístění izolačního materiálu pod vnitřním potahem, resp. vnějším potahem, je součinitel tepelné vodivosti o 6,8 %, resp. 9,4 % menší, než v případě neizolovaných tepelných mostů příhradové konstrukce [7].



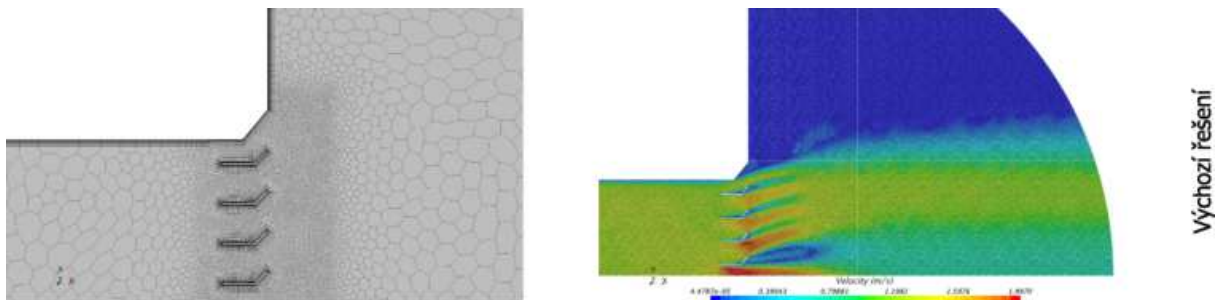
Obr. 5 - Rozložení teplot v konstrukci s izolací na vnější stěně (Zdroj: autoři)

Na základě definice změn z CZ LOKO bylo provedeno ověření navržených úprav, které spočívaly v instalaci anemostatu na výstupu z nezávislého naftového topení a instalaci rozváděcí mřížky elektrického topení [8]. Ověření bylo provedeno na izolovaných 2D případech. V případě anemostatu se jednalo o rotačně symetrickou úlohu, zatímco v případě rozváděcí mřížky se jednalo o rovinný případ.

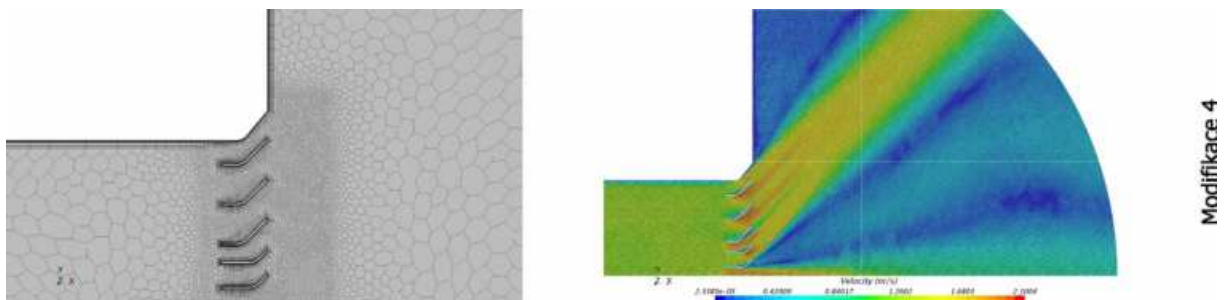


Obr. 6 - Ověření účinku anemostatu (Zdroj: autoři)

Při kontrole vlivu mřížky bylo zjištěno, že její účinek nesplňuje očekávání a tak byl její tvar několikrát modifikován do konečné podoby.



Obr. 7 - Výchozí varianta rozváděcí mřížky elektrického topení (Zdroj: autoři)



Obr. 8 - Konečná varianta rozváděcí mřížky elektrického topení (Zdroj: autoři)

1.5. Konstrukční práce – úprava kabiny

V případě extrémních klimatických podmínek, při odstavené lokomotivní kabině, není nutné navyšovat výkon nezávislého naftového topení, protože na základě dlouholetých zkušeností s konstrukcí a provozem kolejových vozidel není reálně dlouhodobě toto zařízení používat a tím dosáhnout požadovaného teoretického mikroklimatu při odstavené kabině.

Na základě výsledků výpočtů [9] je použití pevného distribučního elementu přínosným prvkem pro zajištění komfortní teploty v odstavené kabině, proto tento prvek je použit v konstrukci kabiny.

Dosazení pevného distribučního elementu (rozdávěcí mřížky elektrického topení) sice nemá vliv na symetričnost proudového, resp. teplotního pole avšak již nedochází k lokálnímu ohřevu míst před tímto zdrojem tepla.

Distribuční element byl dále zpracován do užitého vzoru pod číslem přihlášky 2015-30931.

Tento prvek však nebude osazen, protože bylo přistoupeno k dosazení výkonnějších elektrických topení do stupínků, kde je zajištěno rovnoměrnější proudění a rychlejší ohřátí vzduchu uvnitř kabiny.

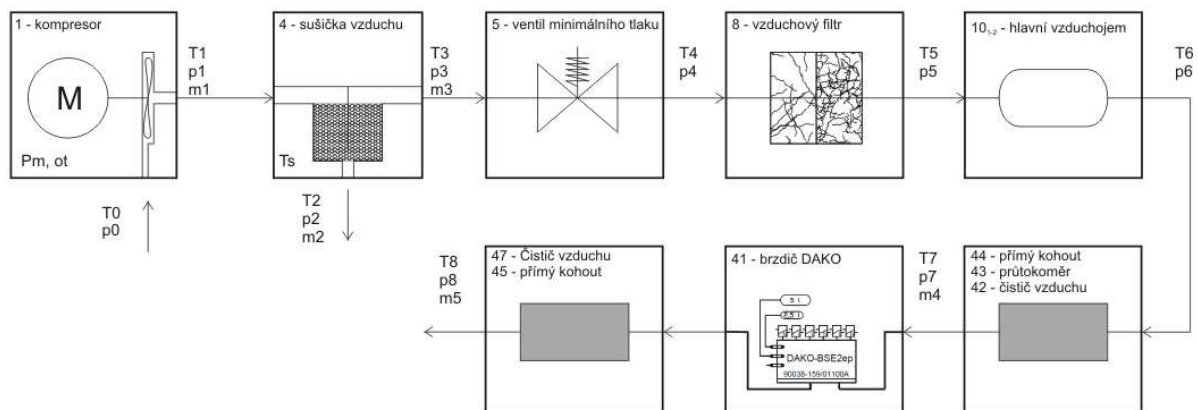
Řešení tepelných mostů změnou konstrukce se jeví jako neefektivní vynaložení prostředků vzhledem k možným úsporám v řádu několika procent. Změna konstrukce by patrně měla minimální vliv na rychlost ohřevu kabin, proto toto není řešeno v konstrukci kabiny.

Rám lokomotivní kabiny byl na základě výpočtů upraven v oblasti uložení úpravou nosného plechu silentbloku, doplněním vyztužujících žebor v oblasti uchycení sedadla strojvedoucího a doplněním žebra v místě ohbí rohového čelního sloupku.

2. Pomocné pohony

Úprava systému pohonných pohonů souvisí se zvýšením spolehlivosti systému v náročných provozních podmínkách. Cílem je pomocí matematického modelu popsat stav vzduchu v celém systému brzdění a identifikovat v něm kritická místa. Dalším z cílů je vytvořit model popisující průběh odbrzdování vlakové soupravy.

Pro potřeby sestavní matematického modelu bylo vytvořeno náhradní schéma tak, aby se snížil počet prvků, které se budou simulovat, ale zároveň aby se v maximální možné míře zachovala funkčnost. Výsledné náhradní schéma je zobrazeno na následujícím obrázku.



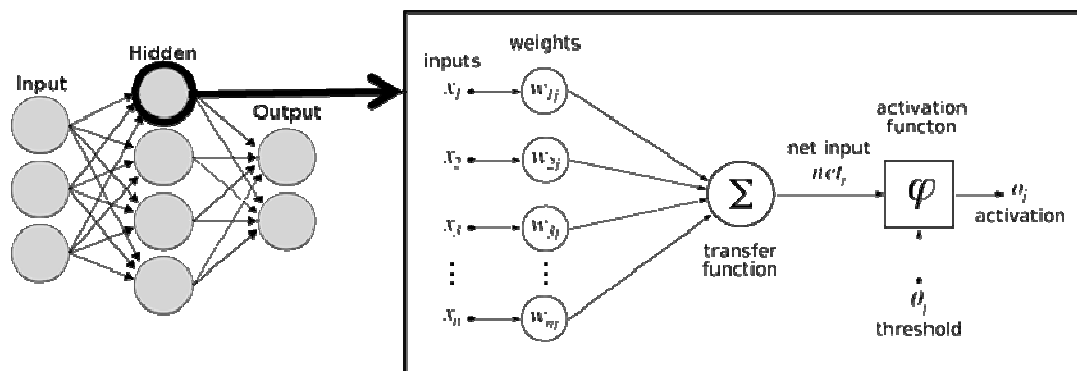
Obr. 9 - Schéma měření pro potřeby vytvoření matematického popisu systému
(Zdroj: autoři)

Měření vybraných veličin zajišťuje autonomní ústředna pro sběr dat instalovaná na instrumentované lokomotivě řady 744 [10]. Sběr dat je zaměřen zejména na teploty, tlaky a průtoky. Data jsou průběžně zaznamenávána na paměťové karty. Následné vyhodnocení probíhá v simulačním prostředí programu Matlab. Sběr dat probíhá průběžně a nová data slouží ke zpřesnění matematických modelů.

Jedním ze způsobů popisu systému je analytický popis fyzikálních rovnic a následné doplnění o naměřené charakteristiky (*gray box model*). Tento přístup je v tomto případě nevhodný ze dvou důvodů. Jednak nejsou k dispozici charakteristiky jednotlivých komponent a jednak je model stlačeného vzduchu komplikovaný. Časová náročnost simulace tohoto typu modelu je velmi náročná, termodynamické rovnice nelze většinou explicitně vyjádřit. Řešení takového modelu sestává z několika smyček, které postupně minimalizují definovanou ztrátovou funkci.

Jako další možnost se nabízí použití nějakou z interpolačních metod. Simulace takového modelu je velmi rychlá. Již nyní je ale jasné, že bodů pro proložení nebude mnoho, respektive nebudou v dostatečném rozsahu hodnot. To může způsobit (a pravděpodobně by to tak bylo) zvlnění proložené hyperplochy na okrajích návrhového prostoru. To je typická vlastnost interpolace a z tohoto důvodu je nevhodná.

Poslední variantou je použití neuronové sítě. Tato metoda je inspirována přírodními procesy. Skládá se z neuronů (levá část následujícího obrázku), které mohou tvořit i několik vrstev. Schéma jednoho neuronu je zobrazeno v pravé části následujícího obrázku. Jednotlivé vstupy jsou násobeny vstupními váhami (tzv. synaptické váhy) a sečteny, dále se nachází aktivační funkce a poslední konstanta je prahová hodnota.



Obr. 10 - Schéma neuronové sítě (Zdroj: autoři)

Jako aktivační funkce je klasicky používána některá goniometrická funkce (např. hyperbolický tangens), v tomto případě je použita radiálně bázová funkce (RBF). Ta má následující tvar:

$$\varphi(x) = e^{-\|x-\mu\|^2 \cdot \theta}$$

Počtem neuronů ve vstupní vrstvě se přímo určí počet aktivačních funkcí. Středů aktivační funkce μ se určí pomocí tzv. clusteringu. Váhy neuronové sítě se řeší pomocí nelineárních nejmenších čtverců za použití gradientních metod. Pro řešení této problematiky je použit Neural Network toolbox programu Matlab [11].

V současné době probíhají práce na testování modelu a dochází ke zpřesňování nově naměřenými daty. Na výsledném modelu budou probíhat simulace s cílem zjistit kritická místa z hlediska zamrznutí systému a jejich případných modifikací. Ve výsledné fázi je počítáno s modelováním plnění brzdového systému lokomotivy a odbrzdění připojených vagónů tak, aby vytvořený model co nejvěrohodněji popsal dynamický proces. Na základě této simulace bude uživatel schopen odhadnout dobu minimálně nutnou pro odbrzdění.

Závěr

V rámci projektu byla postavena a ověřena kabina s modifikovaným distribučním elementem. Symetričnost proudového a teplotního pole nemohla být během experimentu ověřena, neboť docházelo navzdory zimnímu období k ohřevu od slunce. Jediný zatím ověřený přínos tak spočívá ve zkrácení doby ohřevu vzduchu v kontrolovaných bodech.

V případě pomocných pohonů je doposud realizován dlouhodobý sběr dat a jejich analýza. Na získaných datech je postupně konstruován matematický model sloužící k numerické simulaci bloku pomocných pohonů.

Poděkování

Projekt TA03030465/Lokomotivní celky je řešen s finanční podporou TA ČR.

Přístup k výpočetním a úložným zdrojům zapojených do Národní Gridové Infrastruktury Metacentrum, poskytované v rámci projektu „Velké infrastruktury pro výzkum, experimentální vývoj a inovace“ (LM2010005), byl pro řešení projektu velkým přínosem.

Literatura

- [1] ŽIŽKOVSKÝ, Nikola. VZLÚ, a.s. *Analýza lokomotivní kabiny*. Praha, 2013, 17 s. R-5695.
- [2] CHVÁTAL, Miloš. VZLÚ, a.s. *Měření aktivních zdrojů proudění v instrumentované lokomotivní kabině*. Praha, 2013, 17 s. R-5918.
- [3] CHVÁTAL, Miloš. VZLÚ, a.s. *Měření teplotní závislosti tepelného výkonu teplovodního topení Kalori Compact S*. Praha, 2013, 16 s. R-5919.
- [4] ŽIŽKOVSKÝ, Nikola. VZLÚ, a.s. *Výpočetní analýza lokomotivní kabiny*. Praha, 2013, 30 s. R-5871.
- [5] ŽIŽKOVSKÝ, Nikola. VZLÚ, a.s. *Identifikace kritických míst lokomotivní kabiny*. Praha, 2014, 25 s. R-6023.
- [6] SVOBODA, Zbyněk. FSV ČVUT V PRAZE. *Součinitel prostupu tepla* [online]. 2014, 21 s. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=4770
- [7] ŽIŽKOVSKÝ, Nikola. VZLÚ, a.s. *Návrh změn lokomotivní kabiny*. Praha, 2014, 18 s. R-6037.
- [8] ŽIŽKOVSKÝ, Nikola. VZLÚ, a.s. *Ověření změn lokomotivní kabiny*. Praha, 2014, 28 s. R-6041.
- [9] DOLEČEK, Martin, Lukáš VRÁTIL. CZ LOKO, a.s. *Vyhodnocení výsledků numerických simulací*. Jihlava 2014, 5 s. 4-8080-060.
- [10] CHVÁTAL, Miloš. VZLÚ, a.s. *Referenční měření stávajícího stavu bloku pomocných pohonů*. Praha, 2014, 28 s. R-6204.
- [11] Neural Network Toolbox: Create, train, and simulate neural networks. *Neural Network Toolbox - MATLAB* [online]. The MathWorks, Inc, 2015 [cit. 2015-06-22]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/neural-network/>

Praha, srpen 2015

Lektorovali: Ing. Zdeněk Malkovský
VÚKV a.s.

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
UPa DFJP