

Ing. Vojtěch ZAVŘEL¹⁾
Ing. Martin BARTÁK, Ph.D.²⁾
prof. dr. ir. Jan L. M. HENSEN^{1,2)}

¹⁾ Eindhoven University of
Technology, Building Physics and
Services, Nizozemsko

²⁾ ČVUT v Praze, Fakulta strojní,
Ústav techniky prostředí

Recenzenti:
prof. Ing. František Drkal, CSc.
Ing. Milan Janák, Ph.D.

Simulace chladicího systému datacentra v havarijním stavu



Simulation of a Data Center Cooling System in Emergency Situation

Tématem článku je simulace vnitřního prostředí datacentra při havárii chlazení. Podrobně je studován vliv jednotlivých komponent systému chlazení na výsledný průběh havárie, zvláště pak vliv tepelné kapacity náplně chladicího okruhu. Pro predikci energetických toků a teplot vzduchu v datacentru byl vytvořen komplexní numerický model v simulačním prostředí TRNSYS. Simulační model detailně reprezentuje systém chlazení včetně regulačních prvků a zahrnuje vliv akumulace tepla v konstrukcích místnosti datacentra. Předlohou modelu je reálné datacentrum a k tvorbě modelu byla použita naměřená data ze skutečné havárie. Výsledky simulací ukázaly, že zálohováním vodního okruhu je možné prodloužit havarijní chod centra.

Klíčová slova: datacentrum, havárie, chlazení, energetická simulace, TRNSYS

The paper deals with the simulation of indoor environment in a data center at breakdown of its cooling system. Individual components of the cooling system during the breakdown were studied in detail with respect to their influence on the course of the emergency situation, in particular the influence of the cooling circuit thermal capacity. A complex numerical model was set up in TRNSYS simulation environment to predict energy flows and air temperatures in the data center. The simulation model describes in detail the cooling system including control elements and it takes into account heat accumulation in room constructions. The model represents a real data center and it was calibrated using data from a real emergency situation. The simulation results showed that the backup of water circuit makes possible to extend the operation time of the data center at emergency.

Keywords: data center, emergency situation, cooling, energy simulation, TRNSYS

ÚVOD

Internet se stal nedílnou součástí našich životů. Intenzivní využití internetu a výpočetní techniky, která slouží k přenosu a zpracování dat, dokládá např. počet uživatelů, který v roce 2010 dosáhl dvou miliard, a objem přenesených dat, který za rok 2013 činil 667 miliard gigabytů. Podíl tohoto sektoru na celosvětové spotřebě elektrické energie se odhaduje na 10 % a očekává se jeho pokračující nárůst v budoucnu [1],[2],[3].

Vzhledem k tomu, že uživatelé internetu vyžadují nepřetržitý přístup ke svým aplikacím a ostatním službám, jsou nároky na nepřetržitý provoz výpočetní techniky umístěné v datacentrech velmi přísné. Od provozovatelů datacenter se očekává nepřežitý provoz alespoň 99,67 % roku [4]. Jakékoli přerušení provozu, třeba jen z důvodu údržby, může způsobit značné finanční ztráty. Pro chod datacentra je nezbytné zajistit záložní zdroje energie – UPS (Uninterrupted Power Supply), avšak jejich kapacita je většinou omezená a z technických či ekonomických důvodů ve většině případů není možné zálohovat všechny systémy datacentra a pokrýt tak potřebu elektrické energie všech zařízení. V této situaci je nutné, aby obsluha nebo pokročilý řídicí systém s detekcí a diagnostikou poruch rozhodl, které části datacentra budou zálohovány a jakým způsobem. Důležitým podkladem pro takové rozhodování může být mimo jiné predikce pravděpodobného průběhu havárie systému chlazení.

POPIS PŘÍPADOVÉ STUDIE

Tato studie se zabývá místností datacentra, která je umístěna v podzemí administrativní budovy. Místnost o podlahové ploše 231 m² patří do kategorie menších datacenter. Konstrukce zdí je z běžných cihel pokrytých omítkou. Strop a podlaha jsou železobetonové. Kromě tepelné kapacity

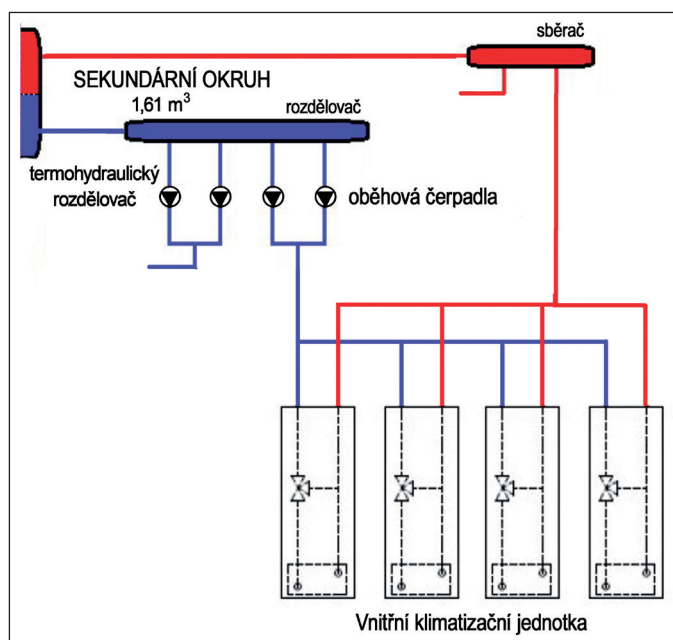
obvodových konstrukcí místnosti je v modelu také uvažována tepelná kapacita vnitřních konstrukcí, např. nosných betonových sloupů, a také kabeláže vedené ve zdvojené podlaze.

Místnost datacentra je vybavena technologickými skříněmi (tzv. racky) pro výpočetní techniku (servery). Technologické skříně jsou uspořádány v osmi řadách. Rozmístění výpočetní techniky a přívod studeného vzduchu zdvojenou podlahou jsou řešeny tak, aby bylo dosaženo tepelného rozdělení prostoru na teplé a studené uličky. Prostor teplých ani studených uliček není oddělen konstrukcí od ostatního prostoru datacentra. Maximální tepelný zisk od výpočetní techniky byl odhadnut na 80 kW. Záložní systém má k dispozici baterie výhradně pro napájení výpočetní techniky, a to pouze pro krátkodobý výpadek proudu. Dieselagregáty pro dlouhodobý výpadek nejsou k dispozici.

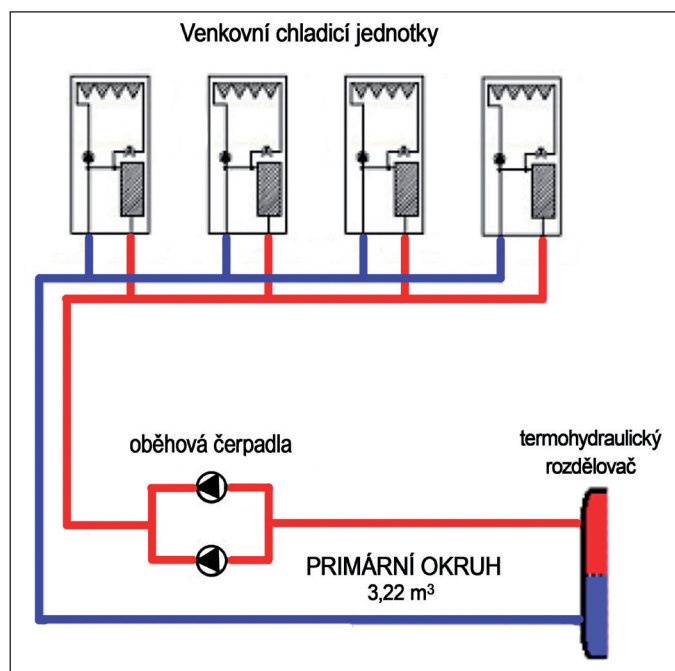
Vzhledem k tomu, že místnost datacentra je umístěna v komplexu ostatních technických místností v prostorách podzemní garáže, okolní teplota vzduchu je relativně stálá v rozmezí 18 až 20 °C během celého roku. Tento předpoklad byl potvrzen měřeními.

Provozní teplota vzduchu uvnitř datacentra je doporučena v rozsahu 18 až 27 °C a relativní vlhkost v rozsahu od 30 do 60 %. Tyto parametry jsou dány provozními požadavky umístěné výpočetní techniky (doporučeno ASHRAE TC 9.9 Committee [5]). Kritická hodnota teploty vnitřního vzduchu je stanovena na 35 °C. Je-li tato teplota překročena, může dojít k omezení výkonu nebo k výpadku výpočetní techniky. V horším případě i k vážným škodám na IT zařízení.

Požadované vnitřní podmínky zajišťují čtyři klimatizační jednotky, které jsou umístěny na jedné straně místnosti. Přírodní vzduch je vříván do prostoru dvojité podlahy a dále je přiveden děrovanými dlaždicemi k přední straně IT zařízení do prostoru tzv. studené uličky. Použitý ohřátý vzduch je odváděn z druhé strany technologických



Obr. 1 Vnitřní chladicí okruh



Obr. 2 Vnější chladicí okruh

skříní do prostoru tzv. horké uličky a dále je nasáván pod stropem do horní části klimatizační jednotky. Cirkulační vzduch je upraven v klimatizačních jednotkách na požadovanou kvalitu ve výměníku vzduch-voda, kde je teplo odebráno chladicí vodou. Chladicí voda je dále vedena rozsáhlým distribučním systémem z přízemí až k vzduchem chlazené kompresorové jednotce na střeše. Návrhový teplotní rozdíl vodního okruhu je 7/12 °C. Distribuční systém chladicího systému je rozdělen hydraulickým vyrovnávačem tlaků na vnitřní (obr. 1) a vnější okruh (obr. 2). Pro případ poruchy je každá součást chladicího systému redundantně zálohována identickým kusem.

Celkový objem vody chladicího systému je odhadnutý na základě technické dokumentace (viz tab. 1). Teoretická tepelná kapacita náplně distribučního okruhu a hrubý odhad doby prodloužení provozu τ_{pot} lze spočítat s následujícími předpoklady:

- Potenciální tepelná kapacita je počítána pro maximální rozdíl teploty vody během poruchy. Zde je uvažována jako dolní hodnota průměrná teplota vody při běžném provozu 10 °C a jako horní hodnota kritická teplota 35 °C. Pro prvotní odhad je uvažován ideální přenos tepla ve výměníku.
- Vlastnosti vody jsou: hustota 998 kg·m⁻³, měrná tepelná kapacita 4,18 kJ·kg⁻¹·K⁻¹.
- Tepelná zátěž od IT zařízení je uvažována jako konstantní hodnota. Pro výpočet doby možného prodloužení provozu/chodu je pro nárůst teploty vzduchu v místnosti použita nominální tepelná zátěž 80 kW.

K odhadu potenciální tepelné kapacity náplně chladicího systému se použije kalorimetrická rovnice.

Tab. 1 Počáteční odhad potenciální tepelné kapacity v chladicím okruhu

	V (m ³)	C (kJ·K ⁻¹)	E _{pot} (kWh)	τ_{pot} (h)
vnitřní okruh	1,61	6716	47	0,58
vnější okruh	3,22	13432	93	1,16
celkem	5,52	23027	160	1,99

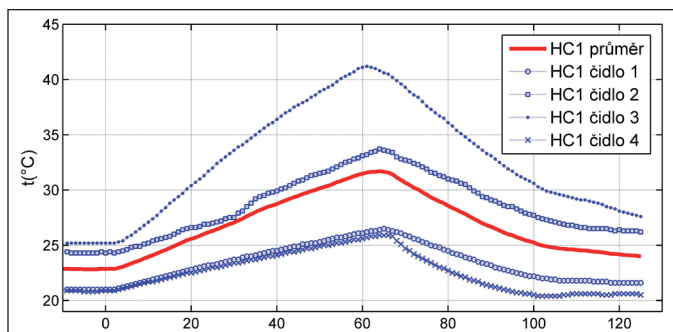
Kalibrační data

Pro kalibraci modelu bylo použito naměřených dat ze skutečné havárie ze srpna 2011. Tehdy došlo k úniku vody do elektroinstalace hlavního i záložního čerpadla vnitřního chladicího okruhu a k výpadku dodávky chladicí vody. IT zařízení byla stále v provozu a došlo k nárůstu teploty uvnitř datacentra. Řídicí systém zaznamenal poruchu a průtok vzduchu ve vnitřních klimatizačních jednotkách byl nastaven na maximum, tak aby bylo dosaženo intenzivní výměny vzduchu. Celá situace byla nahrána monitorovacím zařízením. Obr. 3 ukazuje naměřená data ze 4 senzorů umístěných v prostoru datacentra.

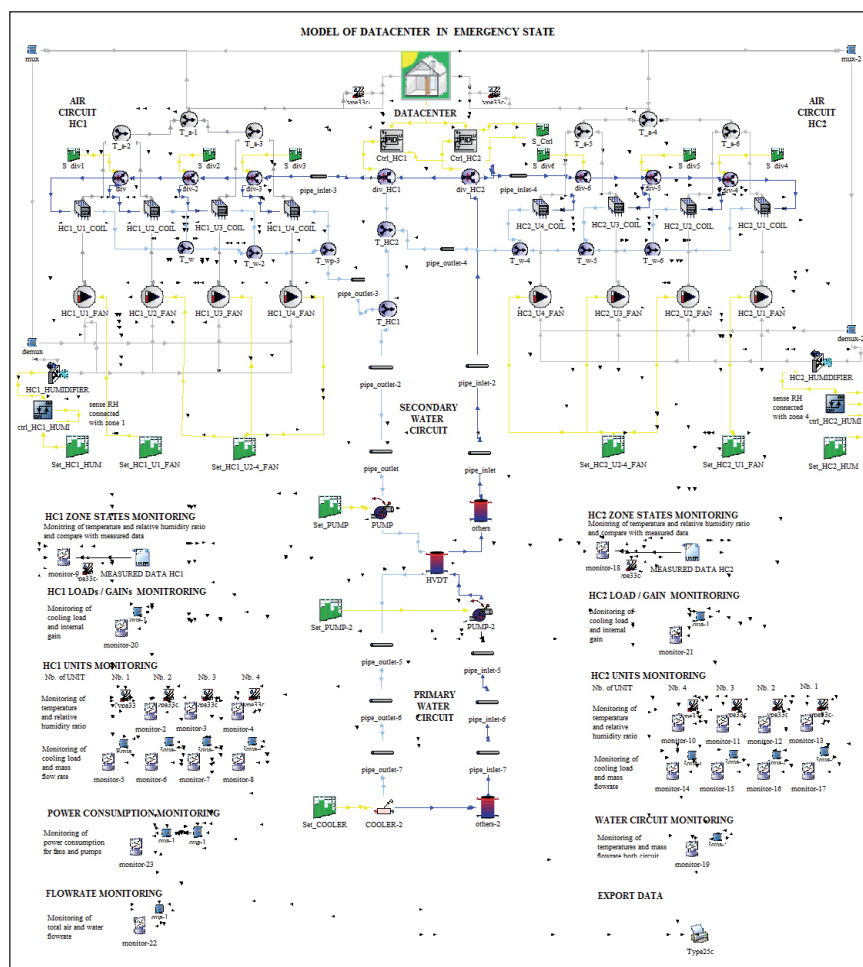
V důsledku nerovnoměrného umístění tepelné zátěže napříč místnostmi se hodnota naměřených teplot v místnosti liší v závislosti na místě měření. Vzhledem k tomu, že použitá metoda numerického modelování neumožňuje detailní simulaci teplotního pole, je zóna reprezentována jediným teplotním bodem. Pro kalibraci byla použita průměrná teplota vzduchu v místnosti.

POPIS NUMERICKÉHO MODELU

Pro vyhodnocení tepelného chování datacentra při havarijní situaci byl vytvořen komplexní numerický model v programu TRNSYS. Uživatelské rozhraní TRNSYS dovoluje propojení jednotlivých komponent (nazývaných *Type*), jako jsou ventilátor, čerpadlo, výměník tepla nebo regulátor (tyto komponenty jsou dostupné v knihovně programu). Kombinací všech těchto komponent umožňuje TRNSYS vytvořit dynamický model místnosti datacentra a chlazení. V následujícím textu budou popsány



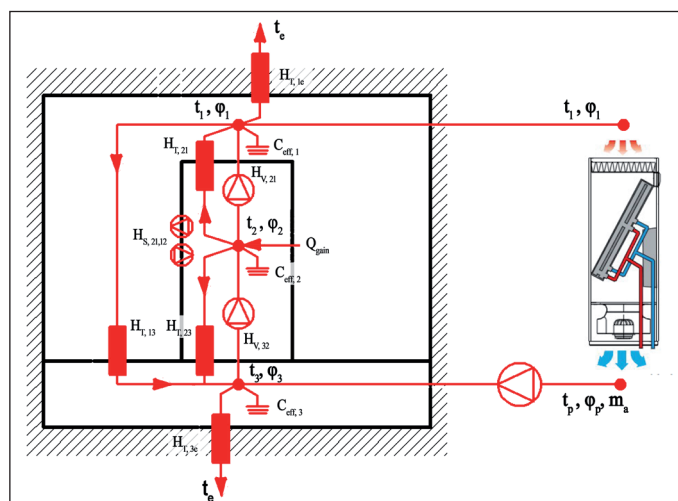
Obr. 3 Kalibrační data



Obr. 4 Sítové schéma numerického modelu v softwaru TRNSYS

nej důležitější části modelu. U jednotlivých komponent je uveden přesný název (type), aby bylo možno dohledat jejich podrobný matematický popis v manuálu programu TRNSYS [6].

Obr. 4 ukazuje složitost modelu, který zahrnuje detailní reprezentaci výměníku tepla vnitřních klimatizačních jednotek, model ventilátorů, řízení (PI regulátor) průtoku vody ve vnitřní klimatizační jednotce a také model zvlhčovače s dvoupohotovou (on/off) regulací. Dále byly modelovány vnitřní a vnější vodní okruhy, transportní zpoždění chladiva a jeho fyzikální vlastnosti. V neposlední řadě je třeba zmínit model samotné



Obr. 5 Schéma modelu místnosti

místnosti datacentra, kde bylo použito komponenty vícezónové budovy (Type 56). Veškeré proměnné mohou být také monitorovány v průběhu simulace jako ve skutečném zařízení.

Zjednodušený model místnosti datacentra

V podprogramu TRNbuild byl vytvořen zjednodušený 3-zónový model místnosti, který je propojen s hlavním programem TRNSYS pomocí komponenty Type 56. Obr. 5 ukazuje schematický popis modelu, kde jsou definovány tři zóny: zóna dvojitě podlahy, zóna technologické skříně, kde je definována tepelná zátěž od výpočetní techniky, a zóna prostoru datacentra. Zóny na sebe vzájemně tepelně působí a jsou ovlivňovány okolním prostředím, ale především modelem chladicího systému. Způsob přenosu tepla je v obrázku značen různými symboly. Obdélníkový symbol označuje vedení tepla, symbol ventilátoru označuje přenos tepla prouděním (konvekci). Dále je pro každou zónu stanovena efektivní tepelná kapacita (symbol uzemnění). Je třeba zmínit, že stanovení tepelné kapacity má významný vliv na dynamiku průběhu teplot v zónách.

Detailní model výměníku

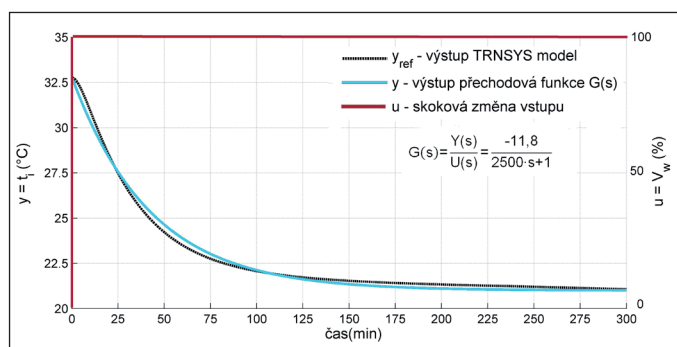
Detailní parametry konkrétního typu vnitřní klimatizační jednotky byly zjištěny v předchozí studii [7]. Předchozí detailní analýza klimatizační jednotky umožňuje použití Braunovy výpočtové metody NTU (Type 52) pro detailní model výměníku [8]. Tab. 2 ukazuje všechny parametry, které jsou nutné pro detailní výpočet.

Tab. 2 Parametry výměníku tepla vnitřní chladicí jednotky

Parametr	Hodnota	Jednotka
vnější průměr trubek	12	mm
vnitřní průměr trubek	10	mm
tepelná vodivost materiálu trubek	380	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
tloušťka lamely (žebra)	0,1	mm
rozteč lamel	1,5	mm
počet lamel	1438	—
tepelná vodivost materiálu lamel	200	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
rozteč trubek	36	mm

PI regulace

Požadované teploty vzduchu v místnosti je dosaženo variabilním průtokem vody ve výměníku voda-vzduch vnitřní chladicí jednotky. Jedná se tedy o kvantitativní řízení a v modelu je třeba použít plynulou regulaci trojcestného ventilu pro obtok výměníku. Průtok vzduchu se uvažuje konstantní. V numerickém modelu je použit PI regulátor (Type 23). Hodnoty nastavení parametrů jako zesílení a integrační časovou konstantu lze odvodit z náhradního modelu systému, v tomto případě ve tvaru přechodové funkce. Náhradní systém prvního řádu je odvozen z komplexního modelu datacentra, konkrétně odezvy výstupní veličiny y (teploty vnitřního vzduchu) na skokovou změnu (0 – 100%) vstupní veličiny u (průtoku vody výměníkem). Příslušný systém prvního řádu ve tvaru přechodové funkce $G(s)$ je graficky zná-



Obr. 6 Odezva teploty přiváděného vzduchu na skokovou změnu průtoku chladicí vody

Tab. 3 Rozdíly ve fyzikálních vlastnostech při teplotě 10 °C

Typ chladicí směsi	ρ (kg·m ⁻³)	c (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
voda	999,7	4,20	0,58
voda + glykol	1050,4	3,65	0,62

zorněn na obr. 6, kde je možné porovnat odezvu komplexního modelu vytvořeného v programu TRNSYS a náhradního modelu vyjádřeného přechodovou funkcí. Z porovnání je patrné, že přechodová funkce charakterizuje systém s dostatečnou přesností a může být odečtena jeho citlivost -11,8 a časová konstanta 2500 vteřin. Pro výpočet potřebných parametrů PI regulátoru z přechodové funkce byla použita metoda podle [9]. Konečné parametry regulátoru byly stanoveny pro zesílení 0,48 a integrační časovou konstantu 1250 vteřin.

Dopravní zpoždění

Jak již bylo řečeno, numerický model je vytvořen především pro předpověď možnosti využití tepelné kapacity chladicí kapaliny. Proto je simulace dopravního zpoždění chladiva z důvodů délky distribuční sítě zásadní pro posouzení průběhu havárie za předpokladu využití tepelné kapacity vodního okruhu. Pro popis tohoto děje model obsahuje řadu komponent potrubí (Type 37), které počítají nejen dopravní zpoždění, ale také tepelné ztráty prostupem tepla do okolního prostředí. Specifikace distribuční sítě byla stanovena na základě technické dokumentace.

V hrubém odhadu potenciální kapacity náplně uvedeném výše v tab. 1 je uvažováno, že chladicí kapalinou je čistá voda. Z technické dokumentace je zřejmé, že chladicí kapalina je směs vody a nemrznoucí směsi (glykol) v poměru 3:1. Fyzikální vlastnosti chladiva se tedy budou mírně lišit od prvotního předpokladu. K výpočtu upravených fyzikálních vlast-

ností je použito parametrické rovnice uvedené v literatuře [10]. Porovnání fyzikálních vlastností čisté vody a směsi jsou v tab. 3.

V modelu jsou použity další komponenty, např. pro ventilátory, čerpadla či zvlhčovače s regulátory on/off. Pro venkovní kompresorovou jednotku byl použit zjednodušený model Type 92, protože ve studii není uvažován její chod v havarijní situaci a nemá tak na výsledky žádný vliv.

VÝSLEDKY

Hlavní výsledek studie chladicího systému v havarijním stavu ukazuje obr. 7. Byly zkoumány čtyři různé krizové situace. Sledována byla především doba prodloužení chodu datacentra při zachování cirkulace chladicí vody v jednotlivých okruzích a využití zbytkového tepelného potenciálu. Pro každou krizovou situaci jsou v grafu zobrazeny průběhy pro zónu uvnitř technologických skříní (přerušovaná čára) a pro zónu prostoru datacentra. Při výpočtu je uvažována konstantní tepelná zátěž od IT zařízení.

Scénář 1 (oranžová křivka) ukazuje úplné selhání chladicího systému. V této situaci lze sledovat značné rozdíly v průběhu teplot vzduchu v zónách. Zatímco v zóně prostoru datacentra teplota roste pomalu z důvodu akumulace tepla ve vnitřních konstrukcích, teplota v zóně technologických skříní roste strmě. Tato skoková změna může být velmi nebezpečná a může způsobit škody na IT zařízeních.

Scénář 2 (červená křivka) popisuje selhání střešní chladicí jednotky a distribučního systému. V tomto případě vnitřní klimatizační jednotka zajišťuje pouze intenzivní výměnu vzduchu bez chlazení. Podmínky scénáře 2 se shodují s podmínkami skutečné havárie a průběhy jsou srovnatelné. Naměřená data byla použita jako reference při kalibraci modelu. Porovnání simulovaného průběhu a referenčního průběhu je patrné z obr. 7.

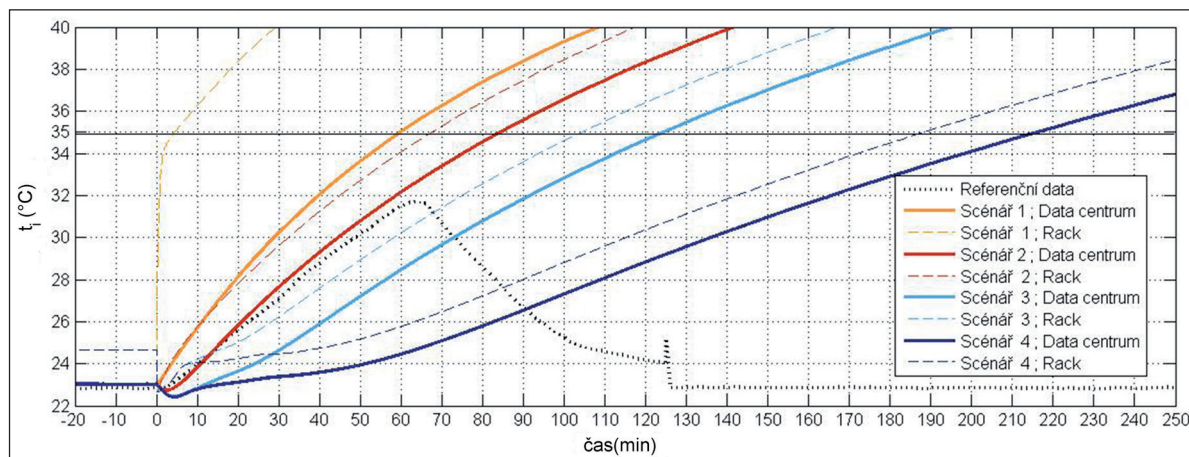
Scénář 3 (světle modrá křivka) je situace při selhání střešní chladicí a vnějšího distribučního okruhu systému. V tomto případě je zálohována vnitřní klimatizační jednotka a čerpadlo vnitřního distribučního okruhu.

Scénář 4 (tmavě modrá křivka) ukazuje průběh při využití tepelné kapacity celého distribučního systému. Jedná se tedy pouze o výpadek střešní kompresorové jednotky.

Výsledky simulace jsou dále ukázány v tab. 4. K porovnání výsledků byl stanoven časový interval prodloužení doby provozu při havárii τ_p , a to jako doba od začátku havárie do chvíle, kdy teplota v zóně prostoru datacentra dosáhne 35 °C. V tabulce jsou také uvedeny hodnoty maximálního výkonu potřebného pro zajištění chodu jednotlivých komponent a předpokládaná spotřeba elektrické energie v průběhu havárie. Posled-

ním údajem je teplo odebrané tepelnou kapacitou vodního okruhu za dobu havárie odečtené z detailního modelu výměníku vnitřní klimatizační jednotky.

Obr. 8 znázorňuje tepelný tok výměníkem v průběhu času pro scénáře 3 a 4 (modré čáry),



Obr. 7 Předpověď teploty vzduchu v datacentru při havárii chladicího systému

Tab. 4 Porovnání scénářů havárie

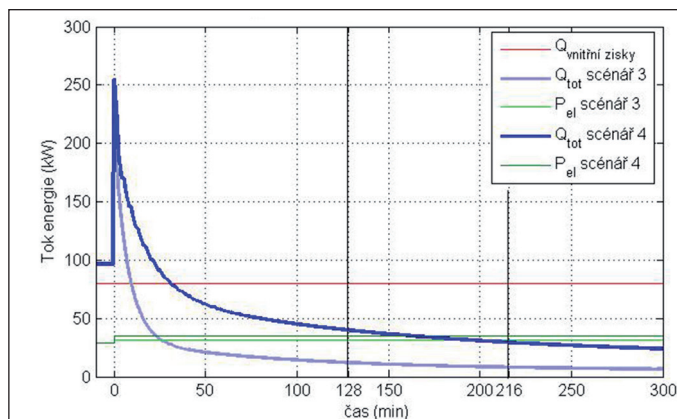
	Scénář 2	Scénář 3	Scénář 4
τ_p (min)	84	128	216
P_{el} (kW)	29	32	35
E_{el} (kWh)	40	67	127
E_{term} (kWh)	–	65	204

vnitřní zisky od IT zařízení (červená čára) a spotřebu elektrické energie chladicího systému pro scénáře 3 a 4 (zelené čáry). Ačkoliv předpoklad konstantní tepelné zátěže od IT zařízení není příliš realistický, tento stav může být interpretován jako nejhorší možná situace, kdy po dobu havárie trvá maximální využití datacentra. Na druhé straně je konstantní spotřeba elektrické energie záložního chladicího systému velmi pravděpodobná s ohledem na běžnou praxi, kdy zálohované součásti chladicího systému jsou ve většině případů nastaveny na plný výkon (např. ventilátory vnitřní klimatizační jednotky). Skok v regulačním zásahu je patrný na počátku havárie v průběhu tepelného toku výměníkem (modré křivky).

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Numerický model založený na případové studii a kalibrovaný pomocí naměřených dat z reálné havarijní situace ukázal významný vliv využití tepelné kapacity chladicí kapaliny během nouzového stavu v datových centrech. Tento vliv je dokonce větší, než bylo původní očekávání. Důvodem pro tento rozdíl je pravděpodobně tepelná kapacita stavebních konstrukcí, která také napomáhá k udržení teploty vnitřního vzduchu v doporučeném rozsahu. Pro cílovou skupinu malých a středních datových center s chlazením na bázi vody, která jsou většinou součástí kancelářských budov s delšími distribučními systémy, lze doporučit zálohovat čerpadla distribučního systému. Dále lze doporučit instalaci nádrže vody do distribučního systému, pro navýšení celkového objemu a tím i tepelné kapacity distribuční sítě.

Pro studovaný případ je prodloužení doby provozu přibližně 2 hodiny při zálohování vnitřního vodního okruhu s celkovým objemem 1,6 m³. Při zálohování celého distribučního systému s objemem 5,5 m³ může být doba provozu v nouzové situaci prodloužena o více než 3 hodiny. Záloha distribučního systému poskytuje provozovateli více času k odstranění závad, například při selhání střešních chladicích jednotek. Při krátkodobém výpadku proudu je možné využít tepelné kapacity chladicí vody jako alternativního záložního zdroje energie, a to s minimálními přidanými nároky na baterie systému UPS. Potřeba elektrické



Obr. 8 Předpověď průběhu energetických toků pro scénář č. 3 a 4

energie čerpadel distribučního systému je totiž relativně malá v porovnání s nároky na zálohování vnitřní klimatizační jednotky.

Podrobné údaje o využití výpočetní techniky umístěné v datacentru nebyly k dispozici a tepelná zátěž byla stanovena na základě štítkových hodnot s uvažováním konstantní tepelné zátěže po celou dobu havárie. Nicméně tato hodnota tepelné zátěže představuje nejhorší případ, kdy je datové centrum plně využito. V případě havárie při nižším využití datacentra lze očekávat i větší vliv tepelné kapacity chladicího okruhu a tedy i možnost delší doby provozu v průběhu havárie.

Určité omezení této studie spočívá v nižší úrovni detailů třízónového modelu místnosti, kde není dostatečně reprezentováno nehomogenní teplotní pole v prostoru datacentra.

ZÁVĚR

Dynamické chování datacentra a ostatních potřebných systémů je víceoborový problém, kde většina konvenčních přístupů selhává a jako alternativa se nabízí využití pokročilých simulačních metod (například program TRNSYS). V programech pro simulaci budov je již většinou zahrnuta také široká nabídka komponent vytápění, větrání, chlazení nebo regulace. Kombinováním jednotlivých komponent lze vytvořit komplexní model.

Obecně tedy platí, že model energetické simulace budov je možné použít pro datová centra a simulace s takovým modelem poskytuje podrobné informace o chování při provozu datového centra v průběhu času a může předpovědět různé provozní či havarijní stavy. Při energetické simulaci budovy lze provádět mnoho typů analýz, které není možné provést konvenčními metodami. Tvorba numerických modelů s využitím pokročilých simulačních metod je časově náročná, nicméně takový model nemusí být použit pouze pro účely návrhu, ale také může být využit jako výchozí informace (a případně součást systému) pro pokročilé řízení v datacentrech. I tato studie dále poslouží jako podklad pro vývoj algoritmu pro automatický zásah v nouzové situaci, který bude součástí nově vyvíjené dohlížecí řídicí platformy GENiC.

Kontakt na autora: v.zavrel@tue.nl

Poděkování: Studie je součástí projektu GENiC (č. 608826) financovaného v rámci 7. RP EU. Další informace o projektu GENiC jsou dostupné na <http://projectgenic.eu/>.

Použité zdroje:

- [1] INTERNET SYSTEMS CONSORTIUM. *Internet host count history* [online]. Dostupné z: <https://www.isc.org/services/survey/>
- [2] CISCO SYSTEMS. *V roce 2016 proteče internetem čtyřikrát více dat než dnes* [online]. Dostupné z: <http://www.cisco.com/web/CZ/about/news/2012/2012061.html>
- [3] KOOMEY, J. *How Green Is the Internet?* [online]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/jgkoomey/koomey-on>
- [4] UPTIME INSTITUTE. *Uptime Institute – Tier Certification* [online]. Dostupné z: <http://www.uptimeinstitute.com>
- [5] ASHRAE. *Thermal guidelines for data processing environments – expanded data center classes and usage guidance*. Atlanta, 2011.
- [6] THE SOLAR ENERGY LABORATORY, TRNSYS 16 Manual, 2007.
- [7] ŠESTÁK, P. *Chlazení technologického centra v havarijní situaci*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze.
- [8] BRAUN J. E. *Methodologies for the Design and Control Chilled Water Systems*. University of Wisconsin, Madison, 1988.
- [9] KLÁN P. Moderní metody nastavení PID regulátoru. AUTOMA. 2000, sv. 9, s. 1–4.
- [10] CONDE M. *Thermo Physical Properties of Brines*. Zürich, 2011.
- [11] ZAVŘEL V. *Model pro simulaci havárie chlazení*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze.