

Marcin SOKÓŁ*
Robert SMYK**

WYBRANE PROBLEMY BADAWCZE Z ZAKRESU MODELOWANIA PRZEPŁYWÓW POWIETRZA, ROZKŁADÓW TEMPERATUR ORAZ PRZESTRZENNEGO PLANOWANIA CENTRÓW DANYCH

W pracy opisano wybrane problemy z zakresu modelowania przepływów powietrza, rozkładów temperatur oraz przestrzennego planowania serwerowni centrów danych. Dodatkowo, omówiono szczegółowo wybrane kierunki badań związane z szeroko pojętą problematyką obniżania kosztów zużycia energii w nowoczesnych serwerowniach poprzez odpowiednie zarządzanie przepływem ciepła w tego typu obiektach. Przedstawiono także trendy rozwojowe w zakresie ewolucji tego typu systemów. W pracy przedstawiono ponadto wybrane wyniki prac badawczo-rozwojowych, badań symulacyjnych oraz studiów literaturowych będących rezultatem projektu nr POIG.01.04.00-22-063/13 pn.: „*Opracowanie aktywnego systemu zarządzania przepływem ciepła*” zrealizowanego przez zespół Laboratorium Przetwarzania Obrazu i Dźwięku Sp. z o.o.

SŁOWA KLUCZOWE: centra danych, modelowanie przepływów, planowanie przestrzenne, rozkład temperatur

1. WSTĘP

Centrum danych z reguły definiowane jest w literaturze jako obiekt, zawierający skoncentrowaną ilość sprzętu do wykonywania jednej lub większej liczby następujących funkcji: przechowywanie, zarządzanie, przetwarzanie oraz wymiana danych cyfrowych i informacji [1–10] (z zastrzeżeniem, że taka definicja centrum danych nie ma zastosowania do przestrzeni, w których znajdują się komputery biurowe, jak również do małych pomieszczeń z serwerami). Ponieważ temperatura urządzeń informatycznych musi być sterowana (m.in. z uwagi na konieczność niezawodnego działania urządzeń oraz aby zapobiegać przedwczesnym ich uszkodzeniom), zużycie energii obejmuje zarówno rzeczywiste zużycie energii elektrycznej przez serwery, jak i moc potrzebną do działania układu chłodzącego [6, 11–15]. Usunięcie ciepła generowanego przez urządzenia informatyczne jest zwykle osiągnięte przez obieg powietrza chłodzącego

* Laboratorium Przetwarzania Obrazu i Dźwięku Sp. z o.o., Gdańsk.

** Politechnika Gdańska.

w centrum danych [16–25]. Powietrze ogrzane w tym procesie jest usuwane z pomieszczenia i często ponownie chłodzone w celu wykorzystania w serwerowni [6]. Wyniki badań przeprowadzone w ramach projektu POIG.01.04.00-22-063/13 pokazały, że energia wydatkowana w ten sposób jest porównywalna, a czasami nawet większa, niż energia potrzebna do zasilania urządzeń IT. W ramach projektu POIG.01.04.00-22-063/13 prawie całość wysiłku badawczego została skoncentrowana na części eksploatacyjnej. Patrząc na cały układ centrum danych w Gdańskim Parku Naukowo-Technologicznym, energia elektryczna wykorzystywana przez urządzenia chłodzące stanowi ponad połowę całkowitego zużycia energii centrum danych. Funkcjonowanie centrum danych wymaga dużej koncentracji urządzeń, w tym energochłonnych urządzeń komputerowych, urządzeń chłodzących oraz infrastruktury elektrycznej, która jest w stanie poradzić sobie z wysokim poziomem zużycia energii przy zachowaniu wysokiej niezawodności.

Zarządzanie problemami termicznymi centrów danych jest przedmiotem intensywnych badań od wielu lat. Na przestrzeni lat, poświęcono wiele pracy na opracowanie modeli matematycznych realizujących funkcje predykcji prędkości oraz rozkładu tzw. pól temperaturowych w serwerowniach centrów danych. Najczęściej, stosowaną w przeszłości metodą chłodzenia centrów danych było stosowanie podpodłogowego chłodzenia z funkcjami powrotu ciepłego powietrza poprzez sufit. Można by zakładać, iż będzie to efektywna metoda chłodzenia, bowiem ciepłe powietrze jest mniej gęste niż relatywnie chłodniejsze powietrze i w związku z tym unosi się do góry w sposób naturalny. W tym też kontekście pierwotnie wydawało się logiczne, aby umieścić wywietrzniki powrotne na suficie, zapewniając dostawę chłodnego powietrza na poziomie podłogi. Przeprowadzone przez zespół laboratorium Przetwarzania Obrazu i Dźwięku badania, w ramach projektu pn.: „*Opracowanie aktywnego systemu zarządzania przepływem ciepła w centrach danych*” (projekt nr: POIG.01.04.00-22-063/13) potwierdziły jednoznacznie, że strategia tzw. podpodłogowej komory stwarza wiele różnorodnych problemów i jest to koncepcja przestarzała. Jednym z głównych problemów jest zapewnienie, żeby każda płytką podłogową otrzymała żądany przepływ powietrza. Bardzo dużo obliczeń (szczególnie we wcześniejszych modelach numerycznych) zajmowało się tym właśnie problemem. Innymi słowy, tego typu analizy dotyczyły badania wpływu zmiennych takich jak np.: wysokość przestrzeni powietrznej pod podłogą, otwarta powierzchnia perforowanych płytek podłogowych, przeszkody pod podłogą oraz ścianki działowe przestrzeni powietrznej na rozprowadzanie przepływu powietrza przez płytki podłogowe. Co ciekawe, analizy obliczeniowe przestrzeni powietrznej pod podłogą okazały się początkiem bardziej nowoczesnych i złożonych analiz obliczeniowych poświęconych centrom danych. Inną analizą obliczeniową, prowadzoną w ramach projektu POIG.01.04.00-22-063/13 był wybór parametrów eksploata-

cyjnych oraz planów zagospodarowania przestrzennego centrów danych. Badania te były poświęcone znalezieniu optymalnych wymiarów centrów danych, rozmieszczenia szaf, umieszczenia jednostek CRAC, temperatury dostarczanego zimnego powietrza oraz prędkości przepływu. Jedną z pierwszych takich analiz dokonano poprzez analizę CFD (*ang. Computational Fluid Dynamics*) badając rozmieszczenie tzw. gorących i zimnych korytarzy w centrach danych. Jednym z kluczowych odkryć było to, iż w centrach danych recyrkulację¹ można wywołać przez niższe szafy zasysające zimne powietrze z płytek podłogowych (podobne wyniki uzyskali autorzy pracy [20]). Przeprowadzono też inne badania CFD analizując różne scenariusze projektowe takie jak wprowadzanie zimnego powietrza w ciepłych obszarach jako próbę zwalczania recyrkulacji, stawiając przemiennie wysokie i niskie szafy oraz usuwając przelegujące szafy [20, 24]. Logiczną koncepcją w stosunku do recyrkulacji jest stworzenie barier fizycznych zapobiegających mieszaniu się powietrza z zimnych i ciepłych obszarów/korytarzy. W tym miejscu warto podkreślić, że w celu oceny strategii chłodzenia w centrach danych z reguły stosuje się dwa różne typy obliczeń mechaniki płynów (CFD): tzw. tradycyjne CFD oraz zredukowane CFD. Obliczenia CFD koncentrują się na przewidywaniu prędkości oraz pól temperatury w pomieszczeniu serwerowni i nie modelują przepływów w górę pomieszczenia. Graniczne warunki dla obliczeń CFD to wlot do pomieszczenia i kratki wylotowe [15–25].

Inna grupa problemów dotyczących projektowania centrów danych, których rozwiązanie postawili sobie za cel wykonawcy projektu POIG.01.04.00-22-063/13 jest optymalne umiejscowienie kratki nawiewu i wywiewu. Choć wydaje się logiczne, aby przestrzeń nawiewu zimnego powietrza była umieszczona pod podłogą, a wywiew znajdował się w suficie, to wiele analiz CFD próbowało określić ilościowo optimum takiego ustawienia. W ramach przedmiotowego projektu przebadano różne scenariusze, które obejmowały podpodłogowy nawiew i sufitowy wywiew, sufitowy nawiew i poziomy wywiew, sufitowy nawiew i podpodłogowy wywiew i na koniec sufitowy nawiew i poziomy wywiew. Te badania CFD potwierdziły jednoznacznie, że podpodłogowy nawiew i sufitowy wywiew minimalizuje średnie i maksymalne temperatury wlotu do szaf i stanowi optymalne ustawienie nawiewu i wywiewu. W toku przeprowadzonych badań wykazano także, że najgorszym ustawieniem z najwyższymi średnimi temperaturami na wlocie do serwera i maksymalnymi temperaturami jest nawiew sufitowy i wywiew podpodłogowy.

¹ Recyrkulacja następuje, gdy ciepłe powietrze, które przeszło już przez serwery powraca wokół szafy i przepływa do zimnego przejścia w centrum danych [19–25]. Może to powodować gromadzenie się ciepłego powietrza przy wlotach do serwerów, co jest sytuacją odwrotną w stosunku do pożądaną.

2. PREDYKCJA ROZKŁADU PÓL TEMPERATUROWYCH Z WYKORZYSTANIEM MODELI W POSTACI ZREDUKOWANEJ ORAZ OCENA EKSPERYMENTALNYCH USTAWIEŃ W RZECZYWISTYM CENTRUM DANYCH

Bezpośrednim celem stosowania modeli w postaci zredukowanej jest uzyskanie stosunkowo dokładnego (przewidywanego) rozkładu pól temperaturowych szybciej niż przy użyciu konwencjonalnych CFD. Niektórzy autorzy prac badawczych próbują równocześnie wykorzystać tzw. teorię potencjalnego przepływu, aby uzyskać modele w postaci zredukowanej. W pracach tych wykorzystuje się fizyczny model, oparty o teorię potencjalnego przepływu, w połączeniu z danymi z sieci czujników [10–18]. W związku ze zmniejszoną złożonością, powstały m.in. modele właściwe dla stosowania operacyjnego w czasie rzeczywistym. Przeprowadzone badania, pomiary i analizy pokazały, że takie modele posiadają znacznie uproszczoną strukturę i zmniejszoną złożoność obliczeniową w stosunku do modeli opartych na równaniach Naviera-Stokesa dla przepływu cieczy. Przeprowadzone eksperymenty pokazały jednoznacznie, że modele w postaci zredukowanej są w stanie dostarczyć użytecznych informacji do stosowania przy zarządzaniu energią w centrach danych. Szczegóły analityczne tego modelu wykraczają już jednak poza ramy niniejszej pracy i objęte są tajemnicą przedsiębiorstwa.

Tworzenie rozkładów prędkości i temperatury powietrza w centrach danych jest procesem bardzo złożonym pod względem obliczeniowym. Od wielu lat badacze przeprowadzają wiele eksperymentów zarówno usiłując uzyskać wiedzę na temat zjawisk fizycznych towarzyszących funkcjonowaniu centrów danych, jak i znaleźć uzasadnienie dla swoich analiz liczbowych. W ramach projektu przeprowadzono m.in. prace polegające na kontrolowaniu urządzeń chłodzących i analizowaniu różnych ich ustawień pod kątem ich wpływu na tzw. temperatury wlotu serwerów. Stwierdzono, że ponieważ temperatury nawiewu zmieniały się liniowo wraz z temperaturą nawiewu z urządzeń CRAC.

Przepływy turbulентne są ze swojej natury przepływami nieustalonymi i dokładna ich symulacja wymaga ogromnych mocy obliczeniowych – potwierdziły to przeprowadzone w ramach przedmiotowego projektu eksperymenty w małym centrum danych składającym się zaledwie z jednej szafy i jednego układu CRAC. Jednakże najpowszechniejszym podejściem inżynierskim jest próba rozwiązania uśrednionych w czasie równań Naviera-Stokesa (tzw. równań RANS, *ang. Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Ponieważ równania Naviera-Stokesa są nieliniowe, każdy proces uśredniania generuje dodatkowe niewiadome, które trzeba w jakiś sposób „powiązać” w wielkościach średnich (mówimy o tzw. problemie domknięcia) - właśnie na tym etapie pojawia się tzw. modelowanie turbulencji [26]. W toku realizacji projektu stwierdzono, że ograni-

czenia tego modelowania stanowią przeszkodę w mieszaniu przy wykorzystaniu modelu numerycznego. To prowadzi do istotnego wniosku, będącego jednym z wyników realizacji projektu POIG.01.04.00-22-063/13: tworząc model obliczeniowy przepływu powietrza w centrum danych, należy wybrać model z przepływem turbulentnym. W literaturze przedmiotu można znaleźć informacje, że były prowadzone badania w zakresie porównania wyników CFD wygenerowanych dla wielu różnych modeli turbulentnych i dla różnych eksperymentalnych planów centrów danych [1-26]. W ogólności, wyniki te pokazały, że tzw. model zero-równaniowy i modele turbulentne (np. Spalarta-Allmarasa) miały najmniej błęd w porównaniu z eksperymentami. Model zero-równaniowy wymagał 20% nakładu obliczeniowego modelu turbulentnego Spalarta-Allmarasa.

3. WYBRANE ASPEKTY PLANOWANIA CENTRÓW DANYCH

Argumenty przemawiające za budową tzw. ekologicznych centrów danych najlepiej ilustrują dwa następujące cele odnośnie kierowania stanem termicznym centrum danych [1–5]:

- pierwszym celem jest utrzymanie temperatur w centrum danych, tak aby urządzenia IT pracowały poniżej granic znamionowej temperatury eksploatacyjnej,
- drugim celem jest zapewnienie potrzebnego chłodzenia tak skutecznie, jak to możliwe, aby zminimalizować zużycie energii i w efekcie związane z tym koszty eksploatacyjne oraz potencjalne konsekwencje dla środowiska.

Z poprawą sprawności energetycznej związana jest poprawa zdolności chłodzenia, która wynika z dokładnego przewidywania stanu przepływów termicznych w centrum danych. Lepsze wykorzystanie mocy produkcyjnej może spowodować zmniejszenie kosztów, ponieważ potrzebna jest mniejsza infrastruktura aby zlikwidować dane obciążenie cieplne. Ponadto, lepsze wykorzystanie mocy obliczeniowych serwerów może zwiększyć potencjał zastosowania alternatywnych źródeł chłodzenia. Faktem jest, że racjonalne przewidywanie przepływów i temperatury [6]:

1. Umożliwia projektantom budowanie centrów danych, które zapewnią odpowiednie chłodzenie urządzeń IT wtedy i tam, gdzie jest to potrzebne.
2. Jest istotne dla celów tzw. aktywnej eksploatacji, co umożliwia zarządcom centrów danych kontrolowanie urządzeń chłodzących, aby efektywnie zaadaptować się do dynamicznie zmieniających się obciążeń IT oraz/lub awarii urządzeń chłodzących.

Podczas projektowania centrów danych nakłady kapitałowe oraz poświęcony czas konieczny do przeprowadzenia tzw. analiz CFD, w zasadzie nie mają wielkiego znaczenia w porównaniu z całością projektu oraz budowy centrum danych. Zdecydowanie dużo taniej i szybciej można wykonać analizę CFD niż samą budowę centrum danych stosując metodę prób i błędów. Jednakże nadal

korzystnym jest posiadanie szybszych, mniej kosztownych obliczeniowo metod przewidywania temperatur w centrum danych. Ogólnie można to osiągnąć kosztem dokładności, ale jest to mimo wszystko uważane za korzystne z następujących powodów [5-6, 25]:

- Badanie parametrów projektowych centrów danych byłoby uzasadnione dzięki szybszym możliwościom predykcji.
- Często w analizach CFD zbieżność można przyspieszyć, jeżeli warunki początkowe są bliższe rozwiązaniu ostatecznemu.
- Uproszczone modele mogą być stosowane w automatycznych sterownikach pracujących w czasie rzeczywistym, które optymalizują chłodzenie w centrum danych.

Niestety, nie każde centrum danych może być wystarczająco dobrze wyposażone, aby określić dokładne warunki brzegowe. Jeżeli nie są one odpowiednio wyposażone, wtedy skuteczność analizy CFD ulega zmniejszeniu. Jeżeli dokładność pełnej analizy CFD jest porównywalna z uproszczoną analizą lub jeżeli uproszczoną analizę uznaje się za wystarczająco dokładną, wówczas uproszczony model może być bardziej pożądanym w związku z dużo szybszym czasem obliczeniowym [18–23].

4. WYBRANE PROBLEMY DIAGNOSTYKI PRZEPIYU POWIETRZA POD PODNIESIONĄ PODŁOGĄ TECHNICZNĄ

Zapewnienie możliwie dużej niezawodności sprzętu informatycznego będącego wyposażeniem serwerowni, oraz utrzymanie wysokiej efektywności utrzymania centrum danych wymaga właściwej dbałości także o przepływ powietrza chłodzącego pod podniesioną podłogą techniczną.

Zaniedbania dotyczące kontroli przepływu powietrza pod podłogą techniczną mogą prowadzić do przeoczenia wielu rodzajów problemów. Najbardziej widocznym ich efektem jest dostarczenie niedostatecznej ilości powietrza do lokalizacji w pomieszczeniu, które wymagają szczególnie silnego chłodzenia. Inne zaburzenia to niewłaściwy kierunek przepływu powietrza, ograniczenia przepływu wywołane przeszkodami w postaci niewłaściwie ułożonych instalacji podpodłogowych, utrata powietrza chłodzącego z przestrzeni pod podłogą spowodowana różnego rodzaju nieszczelnościami, czy zasysanie cieplejszego powietrza z pomieszczenia pod podłogę w wyniku efektu Venturiego, wywołanego nadmierną prędkością przepływu. Diagnostyka zaburzeń przepływu powietrza pod podniesioną podłogą techniczną pozwala wykryć trudne do dostrzeżenia lub do zmierzenia w inny sposób nieszczelności, które pojawiają się szczególnie przy progach drzwiowych, przepustach na kable wychodzące spod podłogi, ale i przy przepustach wszelkich instalacji w ścianach i podłodze, lub przy innych elementach konstrukcyjnych (np. schody). Na rozkład przepływu powietrza

ostatecznie ukształtowanego przez personel centrum danych wpływa również rozmieszczenie w szafach sprzętu informatycznego. Sprzęt bardziej obciążony obliczeniowo, lub mniej efektywny energetycznie, lub gęściej wyposażone sprzętem informatycznym szafy wymagają zazwyczaj doprowadzenie do ich lokalizacji większej ilości powietrza chłodzącego, niż pozostałe lokalizacje. Pomiar parametrów powietrza pod podłogą techniczną, takich jak ciśnienie, przepływ objętościowy lub masowy, temperatura, wilgotność jest trudny bez specjalizowanego urządzenia i metody. Najprostszą metodą byłoby uchylenie płyty podłogowej i wprowadzenie czujników na przewodach pod podłogę przez szparę utworzoną przez uchyloną płytę podłogową. Niedogodnością tego sposobu jest powodowanie nieszczelności na obwodzie podniesionej płyty, co może zakłócać wyniki pomiarów. Innym sposobem byłoby umieszczenie czujników i całego urządzenia pomiarowego pod podniesioną podłogą techniczną. Niedogodnością tego sposobu jest utrudniona obsługa urządzenia, w szczególności sytuowanie czujników, kontrola momentu ustabilizowania odczytu i dokonywanie odczytów pomiarów. Kolejnym sposobem mogłoby być umieszczenie pod podniesioną podłogą techniczną sieci czujników, połączonych kablami infrastrukturą komunikacyjną, lub też czujników bezprzewodowych.

5. TERMODYNAMICZNE WSKAŹNIKI OCENY CENTRÓW DANYCH

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie różnych typów powszechnie stosowanych tzw. *środowiskowych wskaźników nieszkodliwości*, opartych o zasady termodynamiki oraz wskazano ich potencjalne wady i zalety.

Wskaźniki oparte o masę zdecydowanie nie są najlepszym rodzajem wskaźnika dla technologii IT. Choć wiedza na temat materiałów używanych i produkowanych w branży IT jest użyteczna, sam wskaźnik oparty o masę nie jest preferowanym wskaźnikiem, bowiem pomija on zagadnienia źródeł energii, które są istotnym aspektem technologii informacyjnej. Analiza energetyczna technologii informacyjnych jest w literaturze faworyzowana, jeżeli jest to analiza przeprowadzana przez cały cykl życia danej technologii. Ponadto analizy energetyczne, które porównują egzergię², a nie prostą energię, są lepsze, ponieważ różne formy energii mają różną zdolność do wykonywania pracy użytecznej [12–22].

Porównanie egzergii wymaganej do produkcji, eksploatacji i usuwania technologii informacyjnych daje bardziej użyteczny wskaźnik, ponieważ można porównywać wiele różnych technologii. Analiza egzergii okazała się być korzystnym wskaźnikiem dla określenia optimum eksploatacyjnego dla różnych typów technologii informacyjnych. Ocena cyklu użytkowania stanowi z kolei

bardziej kompletną analizę skutków środowiskowych technologii informacyjnej niż analiza energii w trakcie cyklu życia.

Tabela 1. Zestawienie różnych typów środowiskowych wskaźników nieszkodliwości

Rodzaj wskaźnika	Zaleta	Wada
Masowy	Względna łatwość obliczania.	Brak pełnego opisu.
Analiza energii	Obejmuje masę i energię z uznaniem zachowania masy i 1-sze prawo termodynamiki.	Nie może porównywać różnych postaci energii, nie śledzi zanieczyszczenia, wyczerpania zasobów.
Analiza energii w trakcie cyklu życia	Jak analizy energii, ale może także porównywać różne postacie energii, dochodzi do pojedynczego wskaźnika.	Wymaga większego wysiłku w obliczeniach niż wskaźniki oparte o masę, nie śledzi bezpośrednio szkód w środowisku naturalnym.
Ocena cyklu użytkowania	Bardzo kompletny obraz skutku środowiskowego.	Trudny do obliczania, bez pojedynczego wskaźnika do porównania różnych produktów lub procesów.
Egzergetyczna ocena cyklu życia	Kompletny obraz, pojedynczy wskaźnik.	Trudny do obliczania i nie śledzi skutków w środowisku.
Emergia²	Rozszerzenie cyklu życia o aspekty ekologiczne.	Trudny i czasochłonny w obliczeniach.

Wyniki projektu oraz analiza literatury pokazują, że z tych powodów można argumentować, że egzergetyczna ocena cyklu życia, stanowi na chwilę obecną najlepszy kompromis pomiędzy różnymi wskaźnikami termodynamicznymi w odniesieniu do projektowania technologii informacyjnych nieszkodliwych dla środowiska.

4. WNIOSKI

Obecnie najnowocześniejsze modele CFD wykorzystują równania Naviera-Stokesa w powiązaniu z równaniami energetycznymi, a nawet modelami turbulencji, aby stworzyć modele przepływu powietrza i przewidzieć prędkość oraz pola temperatury w centrum danych. Analizy CFD są często złożone oblicze-

² Emergia - dostępna energia w rodzaju tej, która została wcześniej zużyta bezpośrednio lub pośrednio na dostarczenie usługi lub produktu (przy założeniu, że pod pojęciem „dostępnej energii” rozumiemy, potencjalną energię zdolną do wykonania pracy, która jest zużywana w procesie (egzergia).” Innymi słowy (w szerszym ujęciu), *emergia* określa ilościowo pracę natury, jak również człowieka w wytwarzaniu produktu lub usługi.

niowo i wymagają drogiej stacji roboczych o dużej mocy, aby poradzić sobie z dużą liczbą obliczeń. Modelowanie CFD może wymagać dużo czasu, często wielu godzin, aby osiągnąć zbieżność wyników. Podczas projektowania centrów danych nakłady kapitałowe oraz poświęcony czas konieczny do przeprowadzenia analiz CFD nie mają wielkiego znaczenia w porównaniu z całością projektu oraz budowy centrum danych. Z uwagi na rosnące wymagania dotyczące niezawodności oraz efektywności energetycznej centrów danych, istotne jest kontrolowanie i diagnoza nietypowych przepływów powietrza chłodzącego pod podniesioną podłogą techniczną. Pozwala to wychwycić wiele istotnych problemów związanych z efektywnym chłodzeniem.



PODZIĘKOWANIA



Niniejsza praca badawcza powstała jako rezultat projektu: „Opracowanie aktywnego systemu zarządzania przepływem ciepła w centrach danych” (Projekt: POIG.01.04.00-22-063/13 współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, Priorytet I – „Badania i rozwój nowoczesnych technologii”, Działanie 1.4 – Wsparcie projektów celowych.

W imieniu zespołu Laboratorium Przetwarzania Obrazu i Dźwięku, zaangażowanego w realizację projektu POIG.01.04.00-22-063/13 Autorzy pracy pragną podziękować:

- 1. Narodowemu Centrum Badań i Rozwoju za udzielone wsparcie finansowe.*
- 2. Zarządowi Pomorskiego Centrum Przetwarzania Danych Sp. z o. o. za cenne uwagi oraz możliwość wspólnego przeprowadzenia niektórych prac badawczych.*
- 3. Zespołowi firmy Moss McKenna LLC z USA, za przekazanie cennej wiedzy, uwag oraz spostrzeżeń badawczych, które zostały wykorzystane do powstania niniejszej pracy.*

LITERATURA

- [1] Ahern J. E., *The Exergy Method of Energy Systems Analysis*, John Wiley & Sons, 1980.
- [2] Ayres R. U., Ayres L. W., Martinas K., *Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis*. Energy 1998.
- [3] Azapagic A., *Life cycle assessment and its application to process selection, design, and optimisation*. In: *Chemical Engineering Journal*, April 1999.
- [4] Beitelmal A.H., Patel C.D., *Thermo-fluids provisioning of a high performance high density data center*. In: *Distributed and Parallel Databases*, 2007.
- [5] Bieksa D., Martinaitis V., Sakmanas A. A., *An estimation of exergy consumption patterns of energy-intensive building service systems*, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2006.
- [6] Boucher T.D. et al., *Viability of dynamic cooling control in a data center environment*. In: *Journal of electronic packaging*, 2006.

- [7] Cornelissen R., Hirs G. G., The value of the exergetic life cycle assessment besides the LCA. In: *Energy Conversion and Management*, June 2002.
- [8] Creyts J.C., *Extended Exergy Analysis: A Tool for Assessment of the Environmental Impact of Industrial Processes*, PhD thesis, University of California, Berkeley 1998.
- [9] Creyts J.C., Carey V.P., Use of extended exergy analysis to evaluate the environmental performance of machining processes, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 1999.
- [10] Cruz E. et al., Comparison of Numerical Modeling to Experimental Data in a Small Data Center Test Cell. *ASME*, 2009.
- [11] Cruz E. et al., Comparison of numerical modeling to experimental data in a small, low power data center test cell, *Proceedings of ASME IMECE conference*, November 2009.
- [12] Dewulf J. et al., *Recycling rechargeable lithium ion batteries: Critical analysis of natural resource savings*, Resources, Conservation and Recycling, 2010.
- [13] World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*, Report of the World Commission on Environment and Development. Published as Annex to General Assembly document A/42/427, Development and International Co-operation: Environment August 2, 1987.
- [14] D. C. Esty et al., *2005 Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship*, New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2005.
- [15] Facanha C., Horvath A., Evaluation of Life-Cycle Air Emission Factors of Freight Transportation, *Environmental Science & Technology* 41/2007.
- [16] Fontecchio M., Data center air recycling saves cash-strapped greenhouse, May 2009.
- [17] Gondipalli S. et al., Effect of isolating cold aisles on rack inlet temperatures, 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITHERM). optional. optional. Orlando, FL, May 2008.
- [18] Gondipalli S. et al., Optimization of cold aisle isolation designs for a data center with roofs and doors using slits, *ASME 2009 InterPACK Conference collocated with the ASME 2009 Summer Heat Transfer Conference and the ASME 2009 3rd International Conference on Energy Sustainability (InterPACK2009)*. Volume 2. San Francisco, California, USA, July 2009.
- [19] Goodland R., Daly H., Environmental sustainability: Universal and non negotiable, In: *Ecological Applications*, November 1996.
- [20] Greenberg A. et al., The cost of a cloud: research problems in data center networks, In: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* (2008).
- [21] Guo C. et al., BCube: a high performance, server-centric network architecture for modular data centers, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. Volume 39, 2009.
- [22] Gutowski T. et al., A thermodynamic characterization of manufacturing processes, In: *Electronics & the Environment*, Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on. IEEE, 2007.
- [23] Hak T., Moldan B., Dahl A., *Sustainability Indicators: A Scientific Assessment*, Washington, D.C.: Island Press, 2007.

- [24] Hamann H.F., Lopez V., Stepanchuk A., Thermal zones for more efficient data center energy management, Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2010 12th IEEE Intersociety Conference on. IEEE, 2010.
- [25] Hannemann C. R. et al., Lifetime exergy consumption as a sustainability metric for enterprise servers, Proceedings of the ASME 2nd International Conference on Energy Sustainability. Jacksonville, Florida, August 2008.
- [26] Al-Rabghi O.M., Hittle D.C., Energy simulation in buildings: overview and BLAST example, Energy conversion and Management, 2001.

**SELECTED RESEARCH PROBLEMS THE SCOPE OF AIR FLOW
MODELING, TEMPERATURE DISTRIBUTION AND SPATIAL PLANNING
OF DATA CENTERS**

This paper describes some problems of modeling air flow, temperature distribution and spatial planning in data centers. Additionally, we discussed in detail the selected lines of research related to the wider issue of reducing energy costs in modern data centers through appropriate management of the flow of heat in this type of objects. A trends in the evolution of such systems was analyzed. We also presented selected results of research and development, simulation studies and literature studies resulting from the project no. POIG.01.04.00-22-063/13.: *The development of an active heat flow management system for data centres* made by the team of the Laboratory of Sound and Image Processing LLC.

(Received: 8. 02. 2016, revised: 5. 03. 2016)