

AUTOREFERAT

Modele i metody dla analizy i optymalizacji efektywności energetycznej
centrów danych

dr inż. Ariel Oleksiak

Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe
afiliowane przy Instytucie Chemii Bioorganicznej
Polskiej Akademii Nauk



Poznań, 18 lutego 2019 r.

I. IMIĘ NAZWISKO

Ariel Oleksiak

II. POSIADANE STOPNIE I TYTUŁY NAUKOWE

1. Stopień doktora nauk technicznych – Politechnika Poznańska, Wydział Informatyki i Zarządzania; dyscyplina – informatyka;
 - rok nadania 2009r.
 - tytuł rozprawy doktorskiej: „Multicriteria Resource Management in Grid Environments with Prediction and Reservations Systems”
 - promotor: prof. dr hab. inż. Jan Węglarz
2. Tytuł zawodowy magistra – Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny; kierunek – informatyka; specjalizacja - Inteligentne Systemy Wspomagania Decyzji;
 - rok nadania 2001r.
 - tytuł pracy magisterskiej: „An evolutionary algorithm for multicriteria reduction of cycles in outranking graphs”
 - promotor: prof. dr hab. inż. Roman Słowiński
3. Tytuł zawodowy inżyniera – Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny; kierunek – informatyka;
 - rok nadania 1999r.
 - tytuł pracy inżynierskiej: „Metoda reprezentacji informacji dla potrzeb eksploracji danych”
 - promotor: dr hab. Tadeusz Pankowski

III. DOTYCHCZASOWE ZATRUDNIENIE W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

1. Kierownik Działu Energooszczędnych Technologii ICT
 - Pracodawca: Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe ICHB PAN
 - Okres: 2015 –
2. Zastępca Kierownika Działu Aplikacji
 - Pracodawca: Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe ICHB PAN
 - Okres: 2008 – 2015
3. Analityk Systemów Komputerowych
 - Pracodawca: Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe ICHB PAN
 - Okres: 2002 – 2008

IV. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO WYNIKAJĄCEGO Z art. 16 ust. 2 USTAWY O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)

A. TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Modele i metody dla analizy i optymalizacji efektywności energetycznej centrów danych

B. LISTA PRAC WCHODZĄCYCH W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Wyniki badań wchodzących w skład mojego osiągnięcia naukowego, uporządkowane chronologicznie, zostały zebrane poniżej. W zestawieniu znalazło się 14 artykułów naukowych. Dla każdej z prac podano liczbę cytowań według Web of Science (WoS), Scopus (S) oraz Google Scholar (GS), a dla tych z prac, które znajdują się w bazie Journal Citation Reports (JCR), współczynnik wpływu (Impact Factor; IF) oraz liczbę punktów z listy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW).

Oznaczenie prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego jak i moich dodatkowych prac, do których odnoszę się we wszystkich rozdziałach niniejszego autoreferatu, jest zgodne z oznaczeniami przyjętymi w wykazie dorobku habilitacyjnego (Załącznik 3).

- [P1] K. Kurowski, A. Oleksiak, W. Piątek, T. Piontek, A. Przybyszewski, J. Węglarz, DCworms – A tool for simulation of energy efficiency in distributed computing infrastructures, *Simulation Modelling Practice and Theory* 39, pp. 135-151, DOI:10.1016/j.simpat.2013.08.007, 2013
- IF (2013)=1.05, MNiSW (2016) =25
 - Cytowania (GS, S, WoS): 36, 25, 16
- [P2] M. Jarus, S. Varrette, A. Oleksiak, and P. Bouvry, Performance evaluation and energy efficiency of high-density HPC platforms based on Intel, AMD and ARM processors, *Energy Efficiency in Large Scale Distributed Systems* (J.-M. Pierson, G. Da Costa, and L. Dittmann, eds.), *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 182–200, Springer Berlin Heidelberg, 2013
- Cytowania (GS, S, WoS): 38, 19, 11
- [P3] M. Witkowski, A. Oleksiak, T. Piontek, J. Węglarz, Practical power consumption estimation for real life HPC applications, *Future Generation Computer Systems* 29 (1), 208-217, 2013
- IF (2013)=2.639, MNiSW (2016) =40
 - Cytowania (GS, S, WoS): 49, 29, 20
- [P4] M Jarus, A Oleksiak, T Piontek, J Węglarz, Runtime power usage estimation of HPC servers for various classes of real-life applications, *Future Generation Computer Systems* 36, 299-310, 2014
- IF (2014)=2.786, MNiSW (2016) =40

- Cytowania (GS, S, WoS): 24, 17, 14
- [P5] Da Costa G., Oleksiak A., Piatek W., Salom J., Sisó L. (2015) Minimization of Costs and Energy Consumption in a Data Center by a Workload-Based Capacity Management. In: Klingert S., Chinnici M., Rey Porto M. (eds) Energy Efficient Data Centers. E2DC 2014. Lecture Notes in Computer Science, vol 8945. Springer, Cham
- Cytowania (GS, S, WoS): 5, 0, 0
- [P6] L. Cupertino, G. Da Costa, A. Oleksiak, W. Piatek, J.-M. Pierson, J. Salom, L. Siso, P. Stolf, H. Sun, T. Zilio, Energy-efficient, thermal-aware modeling and simulation of data centers: The CoolEmAll approach and evaluation results, Ad Hoc Networks, Volume 25, Part B, February 2015, Pages 535-553
- IF (2015)=1.66, MNiSW (2016) =35
 - Cytowania (GS, S, WoS): 34, 21, 14
- [P7] T. Mastelic, A. Oleksiak, H. Claussen, I. Brandic, J.M. Pierson, A.V. Vasilakos, Cloud computing: Survey on energy efficiency, ACM computing surveys (csur) 47 (2), 33, 2015
- IF (2015)=5.243, MNiSW (2016) = 50
 - Cytowania (GS, S, WoS): 177, 106, 33
- [P8] W. Piątek, A. Oleksiak, G. Da Costa, Energy and thermal models for simulation of workload and resource management in computing systems, Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 58, Part 1, November 2015, Pages 40-54, ISSN 1569-190X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2015.04.008>.
- IF (2015)=1.482, MNiSW (2016) =25
 - Cytowania (GS, S, WoS): 16, 13, 5
- [P9] M. Jarus, A. Oleksiak, Top-Down Characterization Approximation based on performance counters architecture for AMD processors, Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 68, November 2016, Pages 146-162, ISSN 1569-190X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2016.08.006>.
- IF (2016)=1.954, MNiSW (2016) =25
 - Cytowania (GS, S, WoS): 1, 1, 0
- [P10] A. Oleksiak, W. Piatek, K. Kuczynski, and F. Sidorski. 2016. Reducing energy costs in data centres using renewable energy sources and energy storage. In Proceedings of the 5th International Workshop on Energy Efficient Data Centres (E2DC '16). ACM, New York, NY, USA, Article 5 , 8 pages, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/2940679.2940684>
- Cytowania (GS, S, WoS): 2, 1, 0
- [P11] M. Kierzyńska, L. Kosmann, M. von dem Berge, S. Krupop, J. Hagemeyer, R. Griessl, M. Peykanu, A. Oleksiak, Energy Efficiency of Sequence Alignment Tools - Software and Hardware Perspectives, Future Generation Computer Systems, Vol 67, 2017, pp. 455-465, doi:10.1016/j.future.2016.05.006
- IF (2013)=2.639, MNiSW (2016) =40
 - Cytowania (G, S, WoS): 3, 3, 1
- [P12] A. Oleksiak, M. Kierzyńska, W. Piatek, G. Agosta, A. Barengi, C. Brandolese, W.

Fornaciari, G. Pelosi, M. Cecowski, R. Plestenjak, J. Inkelj, M. Pormann, J. Hagemeyer, R. Griessl, J. Lachmair, M. Peykanu, L. Tigges, M. von dem Berge, W. Christmann, S. Krupop, A. Carbon, L. Cudennec, T. Goubier, J.-M. Philippe, S. Rosinger, D. Schlitt, C. Pieper, C. Adeniyi-Jones, J. Setoain, L. Ceva, and U. Janssen. 2017. M2DC Modular Microserver DataCentre with heterogeneous hardware. *Microprocess. Microsyst.* 52, C (July 2017), 117-130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2017.05.019>

- IF (2017)=1.049, MNiSW (2016) =20
- Cytowania (G, S, WoS): 4, 4, 1

[P13] F. Almeida, M. D Assunção, J. Barbosa, V. Blanco, I. Brandic, G. Da Costa, M. F Dolz, A. C Elster, M. Jarus, H. D Karatza, L. Lefèvre, I. Mavridis, A. Oleksiak, A.-C. Orgerie, J.-M. Pierson, Energy monitoring as an essential building block towards sustainable ultrascale systems, *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 17, 27-42, Elsevier, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2017.10.013>

- IF(2017)=1.196, MNiSW (2016) = 20
- Cytowania (G, S, WoS): 2, 1, 0

[P14] A. Oleksiak, T. Ciesielczyk, M. Kierzynka, W. Piatek, Minimising energy costs of data centers using high dense heterogeneous systems and intelligent resource management, *Proceedings of the Ninth International Conference on Future Energy Systems*, 499-505, ACM, 2018

- Cytowania (GS, S, WoS): 0, 0, 0

C. OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO WW PRAC, OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW ORAZ ICH EWENTUALNEGO WYKORZYSTANIA

Przedstawiony cykl prac stanowiący osiągnięcie naukowe dotyczy specjalności informatyki związanej ze złożonymi systemami komputerowymi – centrami danych (ang. *data centers*) – ze szczególnymi naciskiem na ich efektywność energetyczną i metody obniżenia zużycia energii. Główne zagadnienia związane z powyższą tematyką obejmują odpowiednie projektowanie centrów danych, metody zarządzania zasobami i zadaniami w tych centrach, analizę efektywności energetycznej aplikacji oraz zarządzanie chłodzeniem i integrację z zewnętrznymi systemami energetycznymi.

Podjęcie tej tematyki jest uzasadnione bardzo szybkim wzrostem wykorzystania technologii informatycznych, w tym centrów danych, a co za tym idzie znaczącego wzrostu zużycia energii przez te systemy. Zużycie to sięga 2% całkowitego globalnego zużycia energii co równa się zapotrzebowaniu na energię przez przemysł lotniczy [Koomey08]. Za znaczną część odpowiadają centra danych, które zużywają do 1.5% całkowitej energii [Koomey11] (w Wielkiej Brytanii nawet ponad 3%). Zagadnienie efektywności energetycznej centrów danych nie ogranicza się do efektywnego zarządzania zasobami komputerowymi. Znaczna część energii jest wymagana do chłodzenia systemów IT, które niemalże 100% energii przetwarzają na ciepło. Energia zużywana przez systemy chłodzenia (oraz inne dodatkowe systemy takie jak podtrzymanie zasilania) może sięgać nawet 50% całkowitego zużycia energii przez centrum

danych [Bel11]. Wg. różnych badań przeprowadzanych w poprzedniej dekadzie w wielu centrach danych, stosunek całkowitej zużytej energii do energii zużytej przez systemy IT (tzw. współczynnik *PUE*, ang. *Power Usage Effectiveness* [Ave12]) może sięgać średnio nawet 1.8 [Sta12].

Wysokie zapotrzebowanie na energię wraz gwałtownym rozwojem centrów danych (związanych m.in. ze znacznym rozpowszechnieniem rozwiązań informatycznych opartych o chmury lub przetwarzanie wielkiej skali) spowodowało liczne ograniczenia i problemy. Wpłynęły one na trzy główne aspekty ekonomiczne i społeczne:

- Wysokie koszty eksploatacji centrów danych (prowadzące nawet do lokalizacji centrów danych w miejscach o niższych kosztach energii i chłodniejszym klimacie),
- Wysoki poziom wymaganej gwarantowanej mocy, często niedostępny lub wymagający przebudowy infrastruktury elektro-energetycznej,
- Znaczący globalny wpływ na emisję gazów cieplarnianych.

Powyższe problemy i wyzwania zmotywowały naukowców oraz firmy z tego obszaru do intensywnych prac nad poprawą efektywności energetycznej centrów danych. Trendy, zmiany w dostępnych technologiach oraz kierunki badań objęły m.in.:

- Rozwój systemów heterogenicznych i mikroserwerów, w tym nowe architektury sprzętowe (np. ARM), wykorzystanie akceleratorów graficznych (GPU) i rekonfigurowalnych (FPGA),
- Analizę efektywności energetycznej aplikacji (w uzupełnieniu do wcześniejszych prac skoncentrowanych na wydajności),
- Nowe metody chłodzenia, np. bezpośrednie chłodzenie cieczą (DLC, ILC),
- Systemy bliżej danych i użytkowników lub energii („edge data centers”),
- Integracja z inteligentnymi sieciami przesyłowymi oraz odnawialnymi źródłami energii.

Powyższe trendy i kierunki badań, a także metody zwiększania efektywności energetycznej, wzbudziły rosnące zainteresowanie naukowców w ostatnich latach co znalazło odzwierciedlenie w licznych przeglądach literaturowych oraz planach badawczych (ang. *roadmaps*). Nowe trendy związane ze zbieżnością metod *Big Data* z obliczeniami wielkiej skali oraz powstawaniem i wykorzystaniem mniejszych systemów zlokalizowanych bliżej źródeł danych (typu „edge”) oraz ich integrację z dużymi centralnymi systemami przetwarzania danych przeanalizowano w [Don18]. Przegląd metod zwiększania efektywności energetycznej został przedstawiony m.in. w [Org14][Jin16]. Modele predykcyjne związane z energią i skupiające się na systemach dużej mocy (HPC) podsumowano w [Obr14]. Przegląd metryk używanych do oceny efektywności i innych parametrów centrów danych zastał przedstawiony w [Red17]. Inne przeglądy prac o tematyce związanej z osiągnięciem naukowym zawarto w [Ben12][Cai11][Gra14][Sur13]. W [Min09] przedstawiono analizę możliwości redukcji poboru mocy analizując ten pobór zarówno na poziomie centrum danych jak i serwera. Analizy stanu badań wraz z identyfikacją wyzwań i proponowanymi pracami badawczymi zostały również zawarte w prezentowanym cyklu prac stanowiącym osiągnięcie naukowe jak i dodatkowych wynikach autora cyklu powiązanych z

tematyką systemów komputerowych efektywnych energetycznie. Zagadnienia związane z efektywnością środowisk chmurowych przedstawiono w [P7], wyzwania efektywnych systemów wielkiej skali w [F12], natomiast aspekty związane z monitorowaniem efektywności w [P13]. W uzupełnieniu do przedstawionego cyklu prac stanowiącego osiągnięcie naukowe, prace nad analizą trendów i wyzwań prowadzono w ramach projektów, sieci badawczych i innych inicjatyw takich jak: akcja COST IC0804 dotycząca badań nad efektywnością energetyczną systemów rozproszonych [IC0804], sieć badawcza NESUS zajmująca się efektywnymi systemami wielkiej skali [NESUS][F12][P13], projekty w ramach licznych programów EU, w tym klastry projektów takie jak Smart Cities Collaboration Cluster lub sieć HiPEAC [HiPEAC]. Warto zaznaczyć, że wiele prac powstałych w ramach osiągnięcia naukowego zostało opracowanych na bazie wyzwań zdefiniowanych w ramach międzynarodowych projektów badawczych (w tym koordynowanych przez autora osiągnięcia naukowego). Pod uwagę wzięto również wyzwania i możliwości centrum danych Poznańskiego Centrum Superkomputerowo-Sieciowego (PCSS).

Wykorzystanie nowych układów obliczeniowych w celu zwiększenia efektywności energetycznej zostało poruszone w szeregu prac, m.in. wykorzystanie architektury ARM zbadano w [Roj17] czy też w ramach dużych projektów międzynarodowych [Wel17][MontBlanc][F7][F10]. Było to też przedmiotem badań w pracach przedstawionych w prezentowanym osiągnięciu naukowym [P2][P12]. Układami o niskim zużyciu energii oraz wysokiej wydajności są również układy rekonfigurowalne FPGA, które wymagają jednak znacznego nakładu pracy na dostosowanie konfiguracji układu do wybranego problemu. Układy rekonfigurowalne były stosowane do różnych obliczeń [P12][F10], w tym do problemu dopasowania sekwencji [P11], stosowanego w asemblacji DNA.

Przed pojawieniem się powyższych trendów i wyzwań dotychczasowe badania oraz dostępne rozwiązania kładły szczególny nacisk na wydajność systemu, np. maksymalny czas przetwarzania, czas odpowiedzi, przepustowość. Typowe kryteria w problemach szeregowania zadań oraz przegląd metod można znaleźć w [Bła07][Węg11]. W ostatnich latach rozszerzono te problemy uwzględniając ograniczenia mocy, np. prace nad modelem oraz algorytmami szeregowania w celu minimalizacji całkowitego czasu wykonania (*makespan*) oraz wykonania zadań przed ich ostatecznym terminami zakończenia (*deadlines*) przy uwzględnieniu ograniczenia mocy przedstawiono w [Róż12] [Róż14]. W kolejnych pracach, w tym wcześniejszych pracach autora cyklu publikacji, rozważano użycie wielu kryteriów w zagadnieniach zarządzania zasobami i zadaniami w złożonych systemach obliczeniowych, takich jak gridy obliczeniowe [C4][D1][D3]. Kryteria oprócz wydajności zawierały również koszt (który wynika w dużej mierze ze zużycia energii). W obliczu pojawiających się trendów i wyzwań naturalnym było rozwinięcie prac w kierunku aspektów energetycznych złożonych systemów komputerowych.

Jak już wspomniano uwzględnienie aspektów energetycznych w analizie, modelowaniu i zarządzaniu centrami danych wymaga modeli obejmujących różne warstwy systemów informatycznych od aplikacji, poszczególne układy obliczeniowe, serwery, aż po systemy zarządzania poziomie całych klastrów. Co więcej modele powinny również uwzględniać elementy centrów wykraczające poza systemy informatyczne, takie jak systemy chłodzenia (odprowadzania ciepła) czy też dostępność, koszt i źródło energii. Wymaga to podejścia interdyscyplinarnego do konstrukcji modeli, narzędzi symulacyjnych i metod zarządzania. Centrum danych, zwane też czasem centrum przetwarzania danych lub centrum obliczeniowym (ang. *data center*, *HPC center*) składa się z wielu elementów, których architektura, konfiguracja oraz wzajemna interakcja wpływa na całkowitą wydajność,

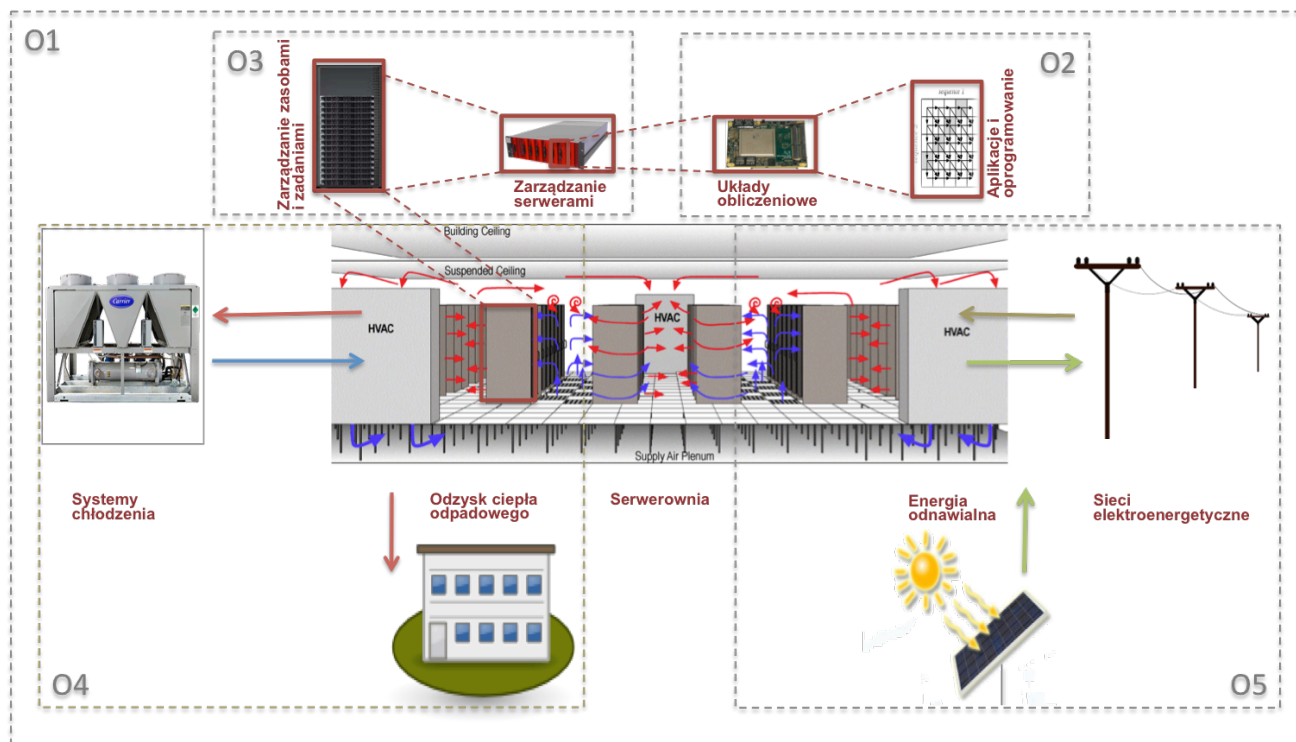
niezawodność ale także zużycie energii i koszty operacyjne centrum. Aplikacje i usługi są uruchamiane na serwerach, które mogą dziś zawierać znaczną liczbę procesorów (od standardowych 1-2 procesorowych do nawet kilkudziesięciu układów [Moonshot][P12]). Nowoczesne systemy heterogeniczne mogą zawierać procesory wielordzeniowe oraz specjalizowane akceleratory sprzętowe. Powyższe podejścia umożliwiają zwiększenie wydajności i efektywności energetycznej ale wymagają również odpowiedniego zarządzania złożonymi systemami, a także odpowiednich konfiguracji sprzętowo-programowych efektywnych dla poszczególnych klas aplikacji. Większe zbiory zasobów w centrum danych zintegrowane w ramach tzw. klastrów są zarządzane przez systemy kolejkowe [SLURM][Moab] lub systemy zarządzania zasobami zwirtualizowanymi [VMware][Kubernetes][OpenStack]. Systemy te mają też wpływ na całkowite zużycie energii przez zadania zlecone do centrum danych i dla wielu z nich powstały w ostatnich latach rozwiązania związane z oszczędzaniem energii [Geo15][Bod14][Raj17] [Goi11][Goi12]. Oprócz warstwy oprogramowania znaczenie ma też warstwa sprzętowa (fizyczna). Serwery są umieszczone w szafach serwerowych (ang. *racks*). Z kolei szafy są rozmieszczone, z reguły regularnie, w serwerowni. Ich lokalizacja ma istotny wpływ na procesy odprowadzania ciepła i efektywność chłodzenia – kolejny istotny obszar związany z efektywnością energetyczną centrum danych. Obszar ten obejmuje zarówno techniki odprowadzania ciepła z samych serwerów (np. algorytmy zarządzania wentylatorami w serwerach) jak i na poziomie całej serwerowni. Dodatkowo ciepło odpadowe może być wykorzystywane poza centrum danych. Interakcja z zewnętrznymi systemami może również obejmować sieci elektroenergetyczne, w tym cenę energii, jej źródło oraz dostępność.

Uwzględniając w badaniach powyższe trendy i wyzwania oraz doświadczenia z budowy i eksploatacji różnych złożonych systemów komputerowych przyjęto następujące założenia w przedstawianym cyklu publikacji:

- połączenie różnych aspektów energetycznych i/lub komponentów centrum danych (np. rozdział zasobów i aspekty termiczne) umożliwi bardziej szczegółowe analizy efektywności energetycznej i osiągnięcie większych oszczędności energii i kosztów,
- zadania wykonywane są na heterogenicznych zasobach, w tym na różnych procesorach oraz nowych układach wykorzystywanych w centrach danych takich jak architektury ARM, akceleratory sprzętowe: graficzne (GPU) i rekonfigurowalne (FPGA),
- aplikacje mają różną charakterystykę energetyczną w zależności od ich typu oraz wykonania dla specyficznej konfiguracji sprzętowej; charakterystyka powinna zostać wyznaczona na bazie testów aplikacji lub podobnych benchmark'ów na różnych układach obliczeniowych, na podstawie odczytów wskaźników wydajności (ang., *performance counters*) nawet jeśli nie ma dostępu do kodów źródłowych i/lub możliwości modyfikacji aplikacji,
- zakłada się możliwość pomiaru zużycia energii na poziomie co najmniej pojedynczego serwera, dostępne poprzez standardowe/powszechne interfejsy programistyczne takie jak IPMI dla serwerów, RAPL dla procesorów Intela, własne rozwiązania dla niestandardowych rozwiązań i prototypów; w przypadku braku informacji o zużyciu energii/mocy należy przygotować własne metody do estymacji,
- w serwerach i układach obliczeniowych dostępne są funkcje kontroli zużycia energii takich jak prędkość procesora (np., DVFS), ograniczenia mocy układu (np., Intel RAPL, NVIDIA NVML), uśpienia/wyłączenia układu (np. poprzez interfejs ACPI),
- dostępne są prototypy z możliwością pełnego sterowania zarządzania serwerem, w tym mocą układów i szybkością poszczególnych wentylatorów (możliwe m.in. w ramach

- projektów FiPS i M2DC tworzących nowe prototypy platformy serwerowej),
- istnieje możliwość odczytu i konfiguracji nastaw systemu chłodzenia – częściowo z systemu BMS (ang. Building Management System) rzeczywistych centrów danych oraz, dla szczegółowych eksperymentów ze sterowaniem, środowisko laboratoryjne do testów i środowisko symulacyjne,
 - znane są ceny energii, a także potencjalnie dynamicznie zmiany ceny energii oraz wymagania dotyczące ograniczenia mocy (zarządzanie odpowiedzią strony popytowej) na bazie istniejących programów w EU i USA,
 - istnieje popyt na odzysk ciepła odpadowego z serwerowni oraz potencjalna techniczna możliwość realizacji,
 - możliwe jest podłączenia źródeł energii odnawialnej bezpośrednio do centrów danych; zakłada się dostępność takiego środowiska testowego w PCSS.

Prezentowany cykl prac przedstawia modele i metody do analizy i optymalizacji efektywności energetycznej centrów danych z uwzględnieniem ich złożoności i zależności pomiędzy różnymi systemami i elementami infrastruktury. Poglądowy schemat centrum danych zaprezentowany na Rysunku 1 zawiera te istotne elementy mające wpływ na zarządzanie energią, rozważane w przedstawianym cyklu prac. Uwzględnienie tak różnych systemów oraz zależności pomiędzy nimi wymagało interdyscyplinarnego podejścia oraz nowych metod. Z tego względu nowe modele i metody w twórczy sposób łączą problematykę zarządzania zasobami, teorię szeregowania zadań, analizę wydajności aplikacji, testy obliczeniowe nowych układów obliczeniowych, symulacje komputerowe, a nawet termodynamikę i zagadnienia zarządzania sieciami elektroenergetycznymi. Wyniki zostały uzyskane za pomocą eksperymentów obliczeniowych w nowoczesnych środowiskach sprzętowo-programowych jak i zaawansowanych autorskich narzędziach symulacyjnych.



Rysunek 1 Schemat centrum danych z jego kluczowymi elementami oraz zaznaczonymi obszarami badań (O1-O5), w których są pogrupowane wyniki osiągnięcia naukowego

W cyklu prac można wyróżnić 5 głównych komplementarnych obszarów grupujących cele naukowe oraz najważniejsze metody i wyniki. Obszary te odpowiadają zidentyfikowanym częściom centrów danych przedstawionym na Rysunku 1 (poszczególne obszary zostały przypisane na rysunku do odpowiednich części centrum danych).

- [O1] Modele, narzędzia symulacyjne i metryki do całościowej analizy efektywności energetycznej centrum danych [P1][P6][P7] wraz z ich zastosowaniami i rozszerzeniami [P5][P8][P13]
- [O2] Analiza efektywności energetycznej aplikacji na różnych platformach sprzętowych [P2], [P3], [P4], [P9], [P11]
- [O3] Zarządzanie zadaniami i zasobami w centrach danych z uwzględnieniem aspektów energetycznych [P5], [P12], [P14], [P6]
- [O4] Modelowanie procesów cieplnych i metody zarządzania chłodzeniem w systemach komputerowych [P6], [P8], [P5]
- [O5] Modele i algorytmy uwzględniające dostępność energii oraz interakcję z sieciami energetycznymi [P5], [P10]

W dalszej części autoreferatu podsumowane zostały wyniki osiągnięte w każdym z obszarów.

[O1] Modele, narzędzia symulacyjne i metryki do całościowej analizy efektywności energetycznej centrum danych

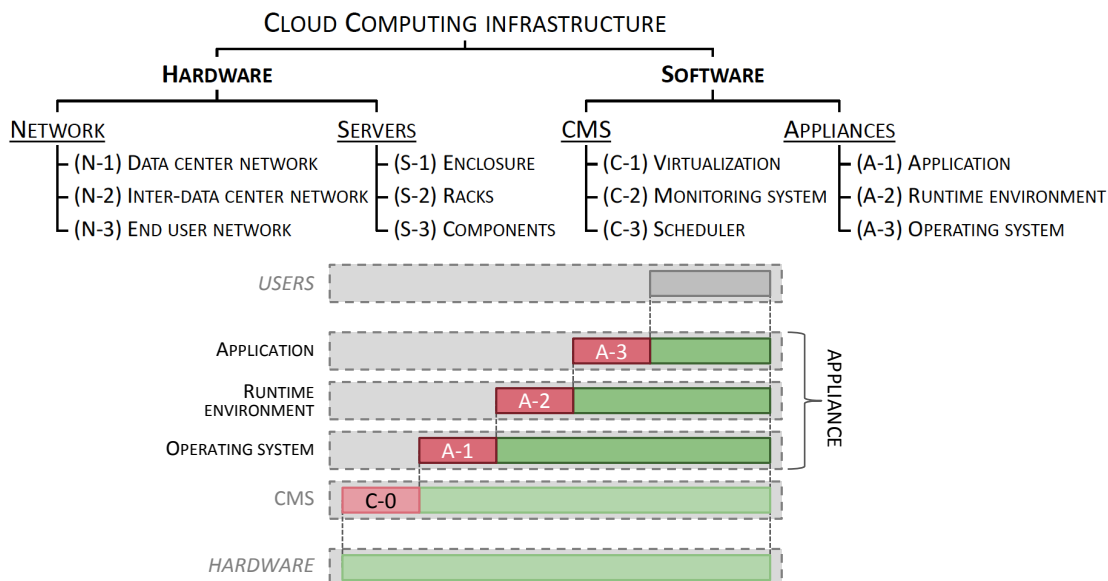
Podjęcie prac badawczych nad analizą i poprawą efektywności energetycznej centrów danych wymagało opracowania odpowiednich modeli energetycznych, narzędzi symulacyjnych integrujących poszczególne elementy centrów danych, a także doboru metryk do oceny ich efektywności.

Modele centrum danych

W prezentowanym cyklu prac przyjęto podejście zakładające całościową analizę zarządzania energią w centrach danych. Podejście to wynikało z przyjętej hipotezy badawczej, która zakładała, że osiągnięcie wysokiej efektywności energetycznej jest możliwe dzięki wykorzystaniu zależności pomiędzy kluczowymi komponentami. Komponenty objęły również zewnętrzną infrastrukturę i systemy, które mogą mieć wpływ na funkcjonowanie centrum (por. Rysunek 1). Powyższe komplementarne podejście umożliwiło szereg ciekawych wyników ale wymagało zdefiniowania nowych modeli centrum danych z dobrze zdefiniowanymi modelami poszczególnych podsystemów oraz szczegółowych modeli zużycia energii.

Jedne z pierwszych prac nad modelami centrum danych zawarto w [F1][P6] na podstawie założeń i wymagań zdefiniowanych w projekcie europejskim CoollEmAll. W powyższych pracach zaproponowano koncepcję modeli komponentów centrum danych (ang. *Data Center Building Blocks, DEBB*), integrację aspektów termicznych w zarządzaniu zasobami, model chłodzenia centrum danych oraz podejście do modelowania obciążenia i poszczególnych zadań w systemie. Modele termiczne zostały uszczegółowione w [P8], umożliwiając predykcję temperatur oraz zużycia energii z uwzględnieniem chłodzenia serwerów. Prace powiązane z modelami centrum danych były również przedstawione w [P13] (monitorowanie) oraz [F1-F6][F8-F10].

Model do analizy zużycia energii przez chmury obliczeniowe przedstawiono w [P7]. W modelu zaproponowano rozróżnienie na energię traconą (ang. *Energy Loss*) czyli taką, która nie jest zużyta na wykonanie zadania i marnowaną (ang. *Energy Waste*), dla której zadanie jest wykonane w sposób nieefektywny. Energię traconą podzielono na niezużyta (np. straconą podczas transmisji, konwersji w systemach zasilania) oraz zużyta przez podsystemy powodujące narzuty energetyczne (np. podsystemy chłodzenia). Z kolei energię marnowaną podzielono na energię wykorzystaną w czasie bezczynności (np. serwera) oraz na nieużyteczne przetwarzanie (np. redundantne operacje, nieoptymalizowany program aplikacji). Powyższy model zastosowano do zaproponowanych do istotnych warstw systemu chmurowego zaproponowanych w powyższej pracy: sieci, serwerów, systemów zarządzania chmurą oraz warstwy aplikacyjnej. W każdej z warstw została przedstawiona identyfikacja energii traconej i marnowanej wraz potencjalnymi metodami zapobiegania oraz wyzwaniami badawczymi. Podział na warstwy i przykładowy rozkład energii traconej i marnowanej jest przedstawiony na Rysunku 2. Dodatkowo przeanalizowano stań badań i wyzwania dotyczące systemów chłodzenia i metryk do oceny efektywności. Prace wchodzące w skład prezentowanego osiągnięcia naukowego skupiły się głównie na głównym modelu, pełnej analizie warstwy aplikacyjnej oraz systemów chłodzenia i metryk.



Rysunek 2 Warstwy systemu chmurowego oraz przykładowy rozkład energii traconej i marnowanej zaproponowane w [P7]

Narzędzia symulacyjne

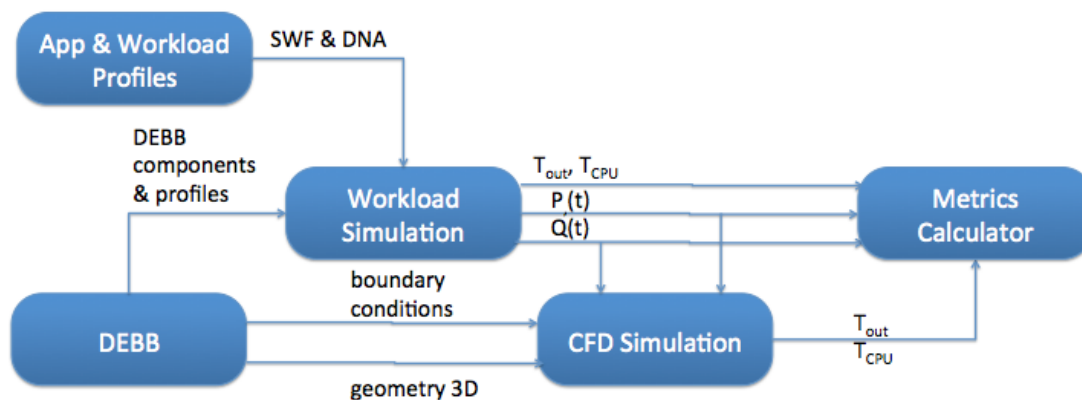
Ponieważ centra danych i wielkie systemy komputerowe są istotną (a często nawet krytyczną) infrastrukturą dla funkcjonowania dzisiejszych firm oraz społeczności, przeprowadzanie eksperymentów obliczeniowych wielkiej skali nie jest z reguły możliwe. Co więcej, włączenie do badań systemów chłodzenia czy też interakcję z systemami energetycznymi ogranicza tę możliwość jeszcze bardziej. Często też analizowane w cyklu prac podejścia i modele wybiegają w przyszłość proponując metody dla systemów nowej generacji.

Z tego względu dość wcześnie zidentyfikowano potrzebę zaawansowanych metod i narzędzi symulacyjnych, które umożliwiłyby przeprowadzenie złożonych eksperymentów, a nawet mogłyby posłużyć do zaawansowanych analiz innym użytkownikom.

Modele prezentowane powyżej umożliwiły opracowanie zaawansowanych narzędzi symulacyjnych, a w szczególności symulatora DCworms (Data Center Workload and Resource Management Simulator) [P1]. Symulator ten powstał na bazie symulatora GSSIM [D2] i był wykorzystywany do różnych badań z wykorzystaniem wielu kryteriów optymalizacji alokacji i uszeregowania zadań [D1][D3]. Naturalnym wykorzystaniem było zastosowanie kryteriów energetycznych i kosztowych, wiązało się to jednak z opracowaniem i integracją symulacji poszczególnych podsystemów i aspektów energetycznych zgodnie z modelami przedstawianymi powyżej.

W rezultacie opracowano pierwszy symulator dostarczający tak kompleksowej możliwości symulacji centrum danych z uwzględnieniem szczegółowej charakterystyki wydajnościowej i

energetycznej aplikacji, modelowania obciążenia (ang. workloads), modeli zużycia energii przez heterogeniczne zasoby sprzętowe, modeli cieplnych i systemów chłodzenia, a także cen energii. Szczegółowe modele i zastosowania w symulacjach opisano w [P5][P6][P8] oraz [F11][F15]. W [P5] oraz [F1][F2][F6] zaproponowano podejście, przedstawione na Rysunku 3, w którym integruje się symulacje dyskretne (wykonania zadań na zasobach) z symulacjami ciągłymi przy wykorzystaniu mechaniki obliczeniowej płynów (przepływu ciepła). Alternatywnie, dla symulacji, w których wyniki dotyczące rozkładu temperatur muszą być obliczone szybko, zintegrowano uproszczone modele cieplne oraz systemów chłodzenia bezpośrednio w symulatorze DCworms [P6][P8][F11][F15].



Rysunek 3 Architektura złożonej symulacji centrum danych

Symulator był wykorzystywany do symulacji szerokiego spektrum scenariuszy w wielu międzynarodowych projektach, m.in. CoolEmAll [P6], FiPS [F7][F10], ESCAPE [ESCAPE], M2DC [M2DC][P12].

Metryki

Kluczowym elementem w analizie efektywności energetycznej centrów danych są metryki służące do ich oceny. Oprócz podstawowych metryk związanych z czasem wykonania czy też zużyciem energii w danym czasie, do analizy centrów danych zostało zdefiniowanych wiele różnych metryk.

Najbardziej znanym przykładem jest PUE (ang. *Power Usage Effectiveness*), którą oblicza się jako E_{DC} / E_{IT} , gdzie E_{DC} jest całkowitą energią zużywaną przez centrum danych a E_{IT} energią zużywaną przez systemy informatyczne. Służy ona zatem do oceny efektywności infrastruktury wspierającej systemy IT w centrum danych. Ze względu na swoją prostotę metryka zyskała wielką popularność ale jest często stosowana w niewłaściwy sposób, np., do porównywania różnych centrów danych lub do oceny efektywności całego centrum, w tym systemów IT. Natomiast w praktyce poprawienie efektywności systemów IT może spowodować nawet pogorszenie wartości PUE.

Krytyczną analizę PUE (szczególnie pod kątem jego powszechnego wykorzystania) zawarto w [P5][P6] wraz z propozycją nowych metryk. W szczególności zaproponowano *PUE4 (PUE Level 4)* jako rozszerzenie do istniejących 3 poziomów pomiarów *PUE* [PUE][Ave12], o następującym wzorze:

$$PUE4 = \frac{E_{DC}[Wh]}{E_{IT} - E_{FANS} - E_{PSU}[Wh]}$$

PUE4 wyklucza z części IT systemy chłodzenia (głównie wentylatory) oraz zasilacze. W ten sposób metryka bardziej realnie oddaje efektywność samej części informatycznej. Jej wartości są bardziej naturalne/intuicyjne ponieważ występuje większa korelacja jej wartości z efektywnością energetyczną i całkowitym zużyciem energii przez centrum danych. Analiza i propozycja metryki były też prezentowane na spotkaniu z organizacją *The Green Grid* odpowiedzialną za definicję PUE [T15]. Co ciekawe w podobnym czasie została opublikowana propozycja metryki ITUE[Pat13] o podobnej koncepcji do przyjętego PUE4.

Kolejną zaproponowaną metryką był współczynnik zmarnowanej energii *Energy Waste Ratio (EWR)*, próbująca zdefiniować ile energii jest marnowane czyli niezużywane na faktycznie użyteczną pracę systemów komputerowych w centrum danych [P6].

$$EWR = \frac{E_{DC \text{ not useful work}}[Wh]}{EDC[Wh]}$$

Gdzie $E_{DC \text{ not useful work}}$ jest zdefiniowane jako ilość energii zużywana ponad wartość wynikającą z założenia o proporcjonalnym zużyciu energii przez centrum danych (liniowa zależność poboru mocy od obciążenia):

$$\int_{t_0}^{t_1} (P(t) - load(t) * P_{MAX}) dt = [Wh]$$

Analiza istniejących metryk została również przeprowadzona w [P7]. Inne propozycje nowych metryk opracowanych w ramach współpracy w międzynarodowych projektach zostały opisane w [F3] (metryki do oceny rozkładu ciepła w serwerowni) oraz [F13] (metryki do oceny wpływu na środowisko naturalne oraz elastyczności centrum danych).

[O2] Analiza efektywności energetycznej aplikacji na różnych platformach sprzętowych

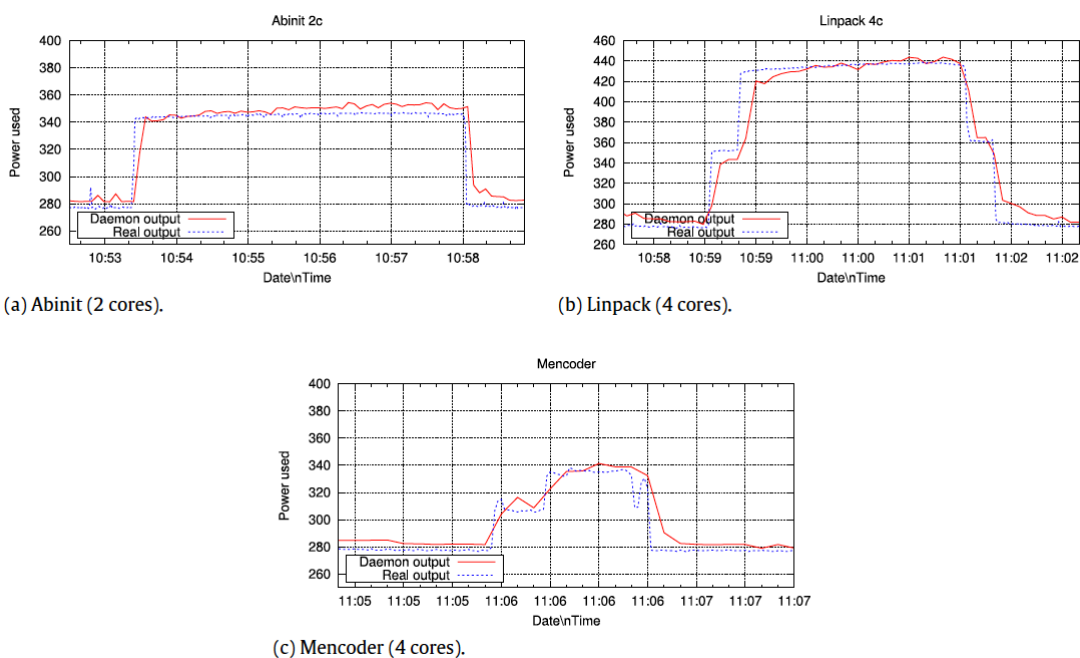
Opracowanie dokładnych i użytecznych modeli i narzędzi symulacyjnych w pracach z obszaru [O1] wymagały wykorzystania danych pochodzących z eksperymentów obliczeniowych w rzeczywistych systemach komputerowych na poziomie pojedynczych heterogenicznych węzłów obliczeniowych (zarówno specyficznych układów obliczeniowych jak i całych platform serwerowych). Dane te umożliwiły dobór parametrów zaproponowanych modeli w celu podniesienia dokładności, a także ich walidację.

Rezultaty prac przedstawione w obszarze [O2] oprócz wykorzystania w opracowanych modelach i narzędziach symulacyjnych, mają też bezpośrednie zastosowanie do doboru środowisk sprzętowych do poszczególnych klas aplikacji [P2] czy też estymacji poboru mocy oraz klasyfikacji aplikacji [P3][P4]. Prace w obszarze [O2] dotyczą najbardziej niskopoziomowych i szczegółowych aspektów efektywności energetycznej ze względu badania na poziomie pojedynczych rdzeni czy też nawet podsystemów/parametrów procesora. Ze względu na skalę

użycia aplikacji sięgających nawet tysięcy węzłów obliczeniowych odpowiedni dobór platform sprzętowych może mieć znaczny wpływ na efektywność całego centrum danych. Z drugiej strony obszar [O2] jest istotny ze względu na bezpośredni wpływ na ostateczną ocenę efektywności systemu przez użytkownika: wydajności i niezawodności w porównaniu do kosztów użytkowania systemu – ściśle związanych z efektywnością energetyczną.

W pracy [P2] przedstawiono jedną z pierwszych kompleksowych analiz porównawczych zastosowania procesorów ARM do różnych typów przetwarzania. Porównania z procesorami Intel i AMD wskazały spory potencjał zwłaszcza do osiągnięcia dobrej efektywności energetycznej dla aplikacji, które nie są bardzo mocno intensywne obliczeniowo (ang. *compute-bound*). Analizy wykorzystania procesorów ARM kontynuowano w ramach dalszych prac, między innymi w [P12] w ramach prac w projekcie M2DC [M2DC]. Potwierdziły one potencjał układów opartych na architekturze ARM do aplikacji ograniczonych pamięciowo (ang. *memory-bound*) oraz w celu obniżenia kosztów zakupu i utrzymania infrastruktury obliczeniowej.

Modele i statystyczne metody szacowania poboru mocy systemów obliczeniowych na podstawie monitorowania aplikacji zawarto w pracach [P3][P4]. Wykorzystano w nich wskaźniki wydajnościowe (ang. performance counters) odczytywane na poziomie systemu operacyjnego. Z dużej liczby dostępnych wskaźników (nawet do 300) wybrano istotny podzbiór i opracowano model z wykorzystaniem funkcji regresji. W [P4] uzupełniono prace propozycją metody do automatycznej klasyfikacji typów aplikacji z wykorzystaniem drzew decyzyjnych w celu lepszego dopasowania modeli do wykonywanych aplikacji. Metody pozwoliły na dokładność szacowania nawet na poziomie 1-2%, charakterystyka oraz dokładność oszacowania dla przykładowych aplikacji jest przedstawiona na Rysunku 4.



Rysunek 4 Estymacja poboru mocy przez system w porównaniu do rzeczywistych pomiarów [P3]

Dalszym krokiem w analizie wydajności i efektywności aplikacji było podejście do zbudowania modelu, który lepiej wyjaśnia wykorzystanie procesora przez aplikację niż szczegółowe wskaźniki. Wykorzystano do tego celu tzw. model Top-Down zaproponowany przez firmę Intel dla jej procesorów i przedstawiono pierwszy model Top-Down dla procesorów AMD [P9].

Problematyka doboru platform sprzętowych oraz optymalizacji poszczególnych aplikacji była także poruszana w [P12][F10], także w [F5] i [F9]. W szczególności w [P11] zaproponowano efektywne wykorzystanie układów FPGA do problemu dopasowania sekwencji (ang. *sequence alignment*) wykorzystywanego m.in. w asemblacji DNA. W tym celu jedna z najbardziej wydajnych implementacji tego algorytmu na świecie, z wykorzystaniem akceleratorów graficznych [Bla13], została przeniesiona na układ FPGA osiągając dwukrotny wzrost efektywności energetycznej.

[O3] Zarządzanie zadaniami i zasobami w centrach danych z uwzględnieniem aspektów energetycznych

Kolejnym obszarem związanym z efektywnym zarządzaniem oprogramowaniem i warstwą aplikacyjną jest obszar zarządzania zasobami i zadaniami [O3]. Wyzwania badawcze dotyczące efektywnego energetycznie zarządzania zasobami i zadaniami w chmurach oraz w systemach wielkiej skali przedstawiono odpowiednio w [P7] i [F12]. We wcześniejszych pracach rozważano zarządzanie zasobami i zadaniami z wieloma kryteriami oceny [D1][D3]. W ramach prezentowanego cyklu prac skupiono się na kryterium efektywności energetycznej oraz (pośrednio) kosztu.

W [P6] przeanalizowano wpływ różnych popularnych algorytmów szeregowania i zarządzania zasobami na metryki związane z aspektami energetycznymi takie jak: zużycie energii, PUE i PUE4, EWR (ilość zmarnowanej energii), maksymalne temperatury na wylotach serwerów. Zbadane algorytmy objęły FCFS, LCFS, LJF, SJF, wraz z różnymi podejściami do backfilling'u, i różne metody alokacji zadań do zasobów: Random, Round-Robin, Load Balancing. Te powszechne podejścia zostały uzupełnione przez zaproponowane metody uwzględniające ciepło:

- *Execution Time Optimization (ExecTimeOpt)* – każde z zadań jest przydzielone do węzła, dla którego czas wykonania jest minimalny.
- *Energy Usage Optimization (EnergyOpt)* - każde z zadań jest przydzielone do węzła, dla którego energia potrzebna do wykonania zadania jest minimalna.
- *Maximum Temperature Optimization (MaxTempOpt)* - każde z zadań jest przydzielone do węzła, dla którego maksymalna temperatura powietrza wylotowego jest najniższa.

Zastosowano również również różne metody konsolidacji, w tym świadome fizycznej lokalizacji węzłów obliczeniowych.

W [P5] zaprezentowano metodę minimalizacji zużycia energii i kosztów w centrum danych za pomocą zarządzania jego potencjałem wykonawczym (ang. *capacity management*). Do osiągnięcia celu zastosowano metodę ograniczania poboru mocy przez zasoby (ang. *power capping*). W pracy została zaproponowana metoda doboru progów poboru mocy na podstawie

historycznych statystyk obciążenia zasobów. Opracowano również algorytm sterowania poborem mocy i powiązano go z modelem cieplnym umożliwiając podniesienie temperatury serwerowni dzięki sterowaniu ograniczeniem mocy serwerów. Podczas ewaluacji wyników działania zaproponowanej metody uwzględniono model całego centrum danych wraz z systemami chłodzenia, a także zmienne ceny prądu. Eksperymenty zostały przeprowadzone w symulatorze DCworms.

Algorytm ograniczania mocy został rozwinięty i zastosowany do nowej platformy serwerowej opracowywanej w ramach projektu międzynarodowego M2DC [D5]. W pracy [P14] zaproponowano metodę inteligentnego ograniczania mocy dla systemów heterogenicznych z wykorzystaniem dynamicznych priorytetów. Priorytety umożliwiły unikanie obniżania mocy dla części węzłów obliczeniowych (np. z ważnymi usługami lub aplikacjami) i mogły być ustawiane dynamicznie, np. przez system szeregowania zadań. Podejście to umożliwiło wybór węzłów do ograniczenia mocy w taki sposób, żeby maksymalizować możliwe obniżenie mocy i zarazem zredukować negatywny wpływ na wydajność uruchomionych na nim aplikacji. Ponadto zaproponowana metoda kieruje się oszczędnością energii przy wyborze węzłów – wśród węzłów o tych samych priorytetach wybiera na podstawie kryterium zużycia energii.

Dodatkowo w [P13] omówiono monitorowanie zasobów (skupiając się na energii) w systemach wielkiej skali, istotnym elemencie dla zarządzania zasobami w dużych systemach komputerowych. Prace nad doбором częstotliwości DFVS oraz zarządzaniem serwerami prezentowano w [T9][T23].

[O4] Modelowanie procesów cieplnych i metody zarządzania chłodzeniem w systemach komputerowych

Jak przedstawiono w omówieniu obszaru [O1], w całościowym podejściu do modelowania centrum danych zaproponowanym w cyklu prac istotną część stanowiły modele procesów odprowadzania ciepła i systemów chłodzenia. Prace te objęły kilka komplementarnych osiągnięć.

Pierwszym z osiągnięć była integracja symulacji opartych na przetwarzaniu zdarzeń dyskretnych (ang. *Discrete Events Simulations*) z wynikami symulacji z wykorzystaniem obliczeniowej mechaniki płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics, CFD*) [F1][P1][F6][F8][F9]. Symulacja zdarzeń dyskretnych wraz modelami energetycznymi została wykorzystana do symulacji wykonania zadań na zasobach obliczeniowych i uzyskania danych o poborze mocy i szybkości przepływów powietrza (szybkości pracy wentylatorów) w czasie. Dane te w wybranych punktach czasowych stanowiły dane wejściowe do symulacji CFD, za pomocą których obliczane były rozkłady temperatur dla serwerów i pomieszczeń serwerowni. Pomimo dokładnych wyników wadą tej metody był dość spory narzut czasowy ze względu na złożoność symulacji CFD, a co za tym idzie możliwość oszacowania rozkładu temperatur tylko dla ograniczonej liczby punktów w czasie. Rozwiązanie to było wystarczające do badań nad systemami z relatywnie stabilnym obciążeniem (z rzadkimi zmianami) natomiast badania nad wpływem dynamicznych zmian w obciążeniu, alokacji zadań i konfiguracji zasobów na efektywność chłodzenia oraz całego centrum danych wymagały prostszych, szybkich do obliczenia modeli przedstawionych poniżej. Warto jednak zaznaczyć, że prace nad wykorzystaniem symulacji CFD do analizy efektywności

centrów danych były kontynuowane i wdrożone w praktycznych zastosowaniach, a w ramach [D5] zaproponowano połączenie metod CFD oraz sztucznej inteligencji do szybkiej estymacji rozkładu temperatur w serwerowni dla dużej liczby potencjalnych konfiguracji zasobów i uszeregowania zadań.

W celu umożliwienia eksperymentów symulacyjnych, w których dla różnych alokacji i konfiguracji zasobów obliczeniowych (a także nastaw systemów chłodzenia) uzyskano oszacowania zużycia energii przez system chłodzenia, a także rozkład temperatur serwerów, opracowano modele systemu chłodzenia w centrum danych [P6]. Na podstawie ilości ciepła generowanego przez serwery, prędkości przepływu powietrza oraz parametrów systemu chłodzenia takich jak *COP* (ang. *Coefficient of Performance*) i krzywej efektywności chłodzenia *EER* (ang. *Energy Efficiency Ratio*) umożliwiając one oszacowanie energii zużytej na chłodzenie centrum danych.

Całościowy model DC został uzupełniony przez modele termiczne układów obliczeniowych oraz serwerów [P8]. W szczególności przedstawiono metodę modelowania temperatur układów obliczeniowych oraz powietrza wylotowego serwera [P8]. Modele te zakładały znajomość parametrów układów obliczeniowych zainstalowanych w serwerze i zintegrowanych z nimi wymienników ciepła. Parametry te zawierały m.in. współczynnik wymiennika ciepła, rezystancję termiczną, pojemność cieplną i były definiowane na podstawie kart katalogowych lub obliczane na podstawie wyników eksperymentów. Zdefiniowano również modele systemów chłodzenia serwerów, w tym wentylatorów (zależności szybkości obrotów od temperatur oraz przepływu powietrza od obrotów). Symulując moc pobieraną przez układ na podstawie obciążenia i ustawień (np. częstotliwości taktowania) szacowane były temperatury procesora i jego otoczenia, przepływ oraz temperatury wyjściowe serwerów. Na bazie tych wartości obliczany był pobór mocy przez cały serwer, nawet z uwzględnieniem prądu upływu (ang. *power leakage*) prowadzącego do większego poboru mocy przez procesor w wyższych temperaturach. Powyższe modele, zarówno dla całego centrum danych jak i serwerów zostały zaimplementowane w symulatorze DCworms [P8][P6].

Modele termiczne oraz chłodzenia serwerów pozwoliły na rozwój metod zarządzania chłodzeniem serwerów, w tym sterowania pracą wentylatorów. Pierwsze analizy zużycia energii przez wentylatory dla różnych ustawień i strategii zarządzania przedstawiono w [P8]. Wykorzystano różne ustawienia szybkości wentylatorów w rzeczywistym serwerze do obliczenia parametrów modelu (np. konwekcyjnej rezystancji cieplnej) i walidacji dokładności modeli. Zaproponowano również strategię zarządzania wentylatorami opartą na zmianach szybkości ich obrotów na podstawie obliczonych progów temperaturowych. W [P6] również porównano zużycie energii przez wentylatory dla różnych strategii szeregowania i alokacji zadań. Wykorzystanie i dalszy rozwój modeli chłodzenia dla serwerów umożliwił opracowanie metod predykcji temperatur i przepływów w rzeczywistych systemach serwerowych [F11] a nawet integrację nowych metod zarządzania wentylatorami w opracowywanych prototypach nowych platform serwerowych [F15].

Na bazie modeli procesów cieplnych i chłodzenia dla całego centrum danych zaproponowano również metody zarządzania z uwzględnieniem aspektów odprowadzania ciepła. W [P6] zbadano wpływ zmian temperatur serwerowni i ograniczania mocy na oszczędności. W szczególności opracowano algorytm sterowania poborem mocy i powiązano go z modelem cieplnym umożliwiając podniesienie temperatury serwerowni dzięki sterowaniu ograniczeniem mocy

serwerów. Podczas ewaluacji wyników działania zaproponowanej metody uwzględniono model całego centrum danych wraz z systemami chłodzenia. Modele procesów cieplnych i chłodzenia zostały zastosowane w [P6] w celu oceny poszczególnych strategii szeregowania i zarządzania zasobami z perspektywy całego centrum danych. Ocena objęła wartości energii zużytej przez poszczególne części centrum danych oraz wartości poszczególnych metryk takich jak *PUE* ale również nowych zdefiniowanych w obszarze [O1]: *PUE4* i *EWR*.

Termiczne aspekty obliczeń i całych centrów danych były też badane w kontekście testowych aplikacji (ang. *benchmarks*) [F5] oraz metryk oceniających rozkład ciepła w serwerowni [F3]. Podjęto również prace nad modelami elastyczności centrów danych w kontekście wykorzystania ich ciepła odpadowego [D5] do ogrzewania innych budynków.

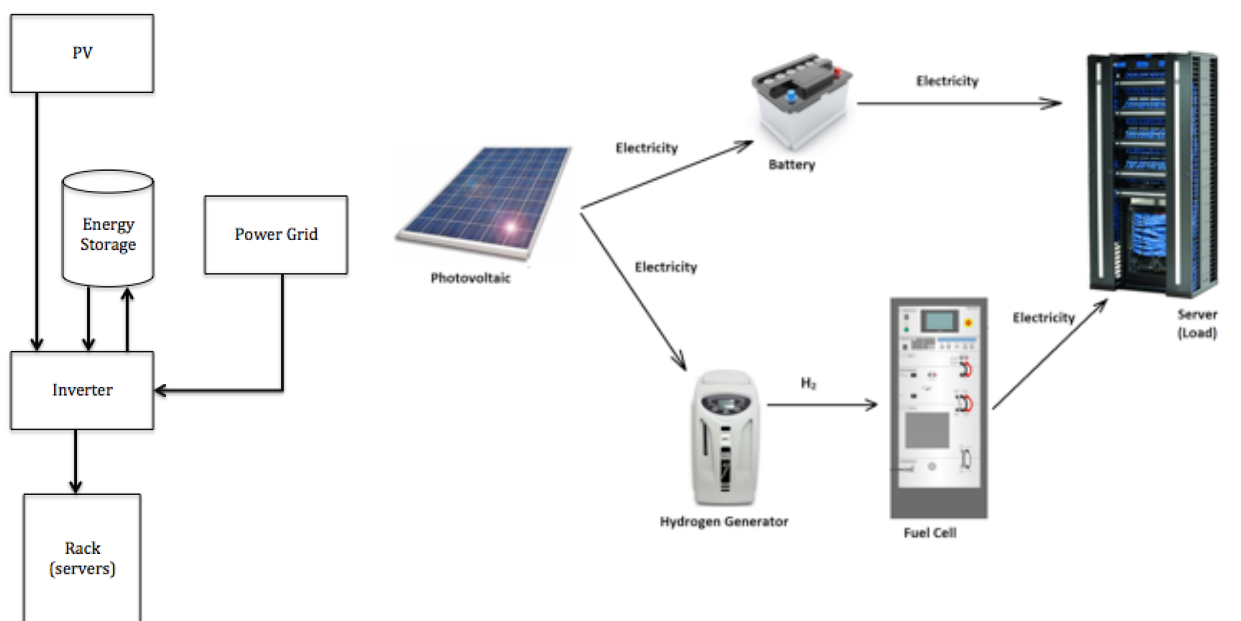
[O5] Modele i algorytmy uwzględniające dostępność energii oraz interakcję z sieciami energetycznymi

W obszarze [O5] podjęto prace badawcze związane z integracją centrów danych z zewnętrznymi systemami i sieciami energetycznymi. Motywacją podjęcia tych badań był fakt, że koszt zużytej energii oraz wpływ na środowisko naturalne zależą nie tylko od samego centrum danych ale też od źródła i dostępności energii, wykorzystanie ciepła odpadowego i innych czynników.

W pierwszej kolejności w analizach kosztów operacyjnych centrów danych oraz strategiach zarządzania uwzględniono ceny energii [P5]. Założono przy tym, że ceny te mogą dynamicznie się zmieniać w zależności od popytu i podaży energii. Pokazano, że poprzez sterowanie poborem mocy oraz temperaturą serwerowni można ograniczyć zużycie energii w okresach wysokich cen energii bez dużych strat wydajności. Doprowadziło to do nawet 25% oszczędności. Dostosowanie centrum danych do popytu i podaży energii było przedmiotem badań w ramach międzynarodowych konsorcjów takich jak DOLFIN [P10] i CATALYST [F16].

Opracowano również model i metody bezpośredniego wykorzystania energii odnawialne [P10]. W tym celu rozważono szczególny przypadek podejścia prezentowanego w poprzednim paragrafie. Podaż i cena energii zależy w nim od poziomu produkcji przez system fotowoltaiczny. Dodatkowo w modelu przyjęto magazyn energii zintegrowany z systemem energii odnawialnej. Model i środowisko testowe zostało oparte o infrastrukturę dostępną w PCSS, w tym ogniwa fotowoltaiczne oraz magazyny energii: zestawy akumulatorów i ogniwa paliwowe [P10]. Przedstawiono koncepcję przesuwania obciążenia z okresów o wysokiej cenie energii, algorytm zarządzania obciążeniem z wykorzystaniem magazynu energii, wyniki eksperymentalne oparte na środowisku badawczym w PCSS oraz analizę kosztów i oszczędności dla dużego centrum danych. Do wyboru przesuwanych/opóźnianych zadań wykorzystano ich priorytety (założono, że zadania są podzielone na te o wysokim i niskim priorytecie). Do eksperymentów i ewaluacji przyjęto, że zwiększony popyt na energię w stosunku do jej podaży na rynku energii powoduje dynamiczne zwiększenie ceny przez okres niedoboru energii na rynku. Dla takiej sytuacji wykazano oszczędności kosztów energii nawet od 30% do 92% w zależności od architektury systemu (maksymalne oszczędności uzyskano dla bezpośredniego podłączenia systemu fotowoltaicznego jako źródła zasilania serwerów). Eksperymenty i szczegółowe oceny były przeprowadzone wykorzystując infrastrukturę laboratorium efektywności energetycznej PCSS (tzw. mikro centrum danych) wraz systemem fotowoltaicznym i magazynami energii. Oczywiście,

zastosowanie tego podejścia dla dużego centrum danych i uzyskania tak znaczących oszczędności wymagałoby bardzo dużej instalacji fotowoltaicznej oraz dużych inwestycji w magazyny energii. Analiza kosztowa dla centrów danych została również zawarta w omawianej pracy i wykazała, że przy obecnych technologiach wymagana inwestycja zwróciłaby się po około 12 latach. Czynnikiem skracającym czas zwrotu są m.in.: spadek kosztów magazynowania energii oraz wysokie ceny energii w szczytowych okresach (lub wysokie kary/stawki związane z przekraczaniem ustalonych progów mocy). Prace nad integracją odnawialnych źródeł energii były również prezentowane na [T18][T20].



Rysunek 5 Schemat systemu fotowoltaicznego z magazynem energii oraz środowiska testowego użytego w eksperymentach

Zagadnienia związane z zarządzaniem reakcją strony popytowej (ang. *Demand Side Response, DSR*) są obecnie zarówno przedmiotem badań jak i regulacji. Programy DSR są wdrażane w wielu miejscach na świecie (częściowo również w Polsce) i centra danych ze względu na znaczne zużycie energii oraz możliwości kontroli są potencjalnym uczestnikiem tych procesów związanych z rynkiem mocy i energii. Badania nad tymi zagadnieniami prezentowane w ramach przedstawianego cyklu prac były i są prowadzone w ramach międzynarodowych projektów takich jak DOLFIN [P10] oraz CATALYST [CATALYST][F16][D5].

Interakcja centrów danych z sieciami energetycznymi nie oznacza jedynie sieci elektrycznych. Centra danych są znaczącymi producentami energii cieplnej. Jak już wspomniano znaczna część energii elektrycznej zużywanej przez centra danych jest wymagana przez systemy chłodzenia. W przedstawianym cyklu prac spora część badań była poświęcona modelowaniu i optymalizacji tych procesów. Powstałe ciepło odpadowe zazwyczaj jest usuwane na zewnątrz centrum danych. Natomiast interesującą alternatywą jest odzysk tego ciepła do ogrzewania budynków i wody użytkowej. Przykładem jest serwerownia PCSS, z której ciepło odzyskiwane

jest do ogrzewania budynku biurowego CBPIO. Ponieważ centra danych często są zlokalizowane w miastach, a przynajmniej w otoczeniu innych budynków, prowadzone są prace nad wykorzystaniem ciepła w większych obszarach, a nawet z wykorzystaniem sieci ciepłowniczych [F16]. Wyzwaniami w realizacji tego typu systemów są ograniczenia w odległościach (ze względu na straty ciepła), bardzo wysokie temperatury wykorzystywane przez sieci ciepłownicze, czy też dynamiczne dostosowanie się źródeł ciepła do wymagań odbiorców. Część tych wyzwań jest przedmiotem bieżących prac, a zaawansowane modele i metody przewidywania ilości ciepła produkowanego przez centrum danych (wraz z temperaturami) zostały zawarte w pracy [D5] (w trakcie recenzji).

Podsumowanie

Badania przeprowadzone w przedstawionym cyklu publikacji [P1]-[P14] wnoszą istotny wkład w rozwój tematyki efektywności energetycznej złożonych systemów komputerowych. W ramach powyższego cyklu zaproponowano kompleksowe podejście do aspektów energetycznych centrów danych, niezwykle ważnej dla nauki i gospodarki oraz gwałtownie rozwijającej się składowej globalnej infrastruktury informatycznej. Przedstawione wyniki pogrupowano w pięciu obszarach stanowiących uzupełniające się ale również zależne od siebie części. Zaproponowane interdyscyplinarne podejście łączące symulacje komputerowe, algorytmy rozdziału zasobów i szeregowania zadań, analizę charakterystyki aplikacji na heterogenicznych układach obliczeniowych, elementy termodynamiki i systemów chłodzenia oraz interakcję z sieciami energetycznymi umożliwiło dokładniejsze zamodelowanie złożonych systemów komputerowych, a w konsekwencji możliwość uzyskania znacznych oszczędności energii i kosztów. Przeprowadzone liczne eksperymenty obliczeniowe i symulacyjne potwierdziły słuszność interdyscyplinarnego podejścia i wskazały korzyści wynikające z integracji modeli i metod z pięciu prezentowanych obszarów. Doprowadziło to do powstania nowych lub usprawnienia istniejących praktycznych rozwiązań w postaci oprogramowania do symulacji, monitorowania i zarządzania efektywnością energetyczną złożonych systemów komputerowych.

Podsumowanie wkładu naukowego zawartego w 14 publikacjach wchodzących w skład osiągnięcia naukowego zaprezentowano poniżej:

- Wypracowano kompleksowe modele energetyczne centrów danych, które umożliwiają zintegrowaną analizę różnych komponentów centrum danych w celu oszacowania, predykcji oraz poprawy efektywności energetycznej [P1][P6][P7][P8][P13];
- Opracowano symulator DCworms – pierwszy tak kompleksowy symulator centrum danych, który pozwala symulować wiele istotnych elementów mających wpływ na zużycie energii i koszty oraz umożliwia szczegółową analizę metod szeregowania zadań i rozdziału zasobów [P1];
- Zaproponowano i zastosowano nowe metryki do oceny efektywności energetycznej centrum danych: *Energy Waste Ratio (EWR)* oraz *PUE Level 4* [P6][P5];
- Przeprowadzono analizy aplikacji i ich efektywności energetycznej na różnych platformach sprzętowych, w tym nowych architekturach, w szczególności opracowano:
 - metody estymacji poboru mocy serwerów na podstawie wskaźników wydajnościowych dla danych aplikacji [P3][P4],
 - podejście do klasyfikowania aplikacji ze względu na podobne profile

- energetyczne [P4],
 - analizę wykorzystania procesorów ARM w efektywnym przetwarzaniu [P2][P12],
 - nową metodę Top-Down dla procesorów AMD [P9];
 - analizę efektywności nowej implementacji metody dopasowywania sekwencji z wykorzystaniem układów rekonfigurowalnych (FPGA) [P11]
- Opracowano i przeanalizowano metody zarządzania zadaniami i heterogenicznymi zasobami z uwzględnieniem infrastruktury centrum danych: temperatur w serwerowni [P6], systemów chłodzenia [P5] i kosztów energii [P5][P10];
- Opracowano rozwiązanie i heurystykę do inteligentnego ograniczania mocy i oszczędzania energii serwerów z uwzględnieniem dynamicznych priorytetów, modeli heterogenicznych zasobów oraz wpływu ograniczenia mocy na efektywność energetyczną w zależności od typu aplikacji [P14];
- Wprowadzono modele termiczne zasobów i wentylatorów wraz z analizą algorytmów szeregowania [P6][P8], które zostały wykorzystane do opracowania algorytmów zarządzania zasobami platformy mikroserwerowej [P12][F11][F15];
- Zaproponowano modele i metody zarządzania zasobami zintegrowane z sieciami energetycznymi w szczególności zasilanymi energią z odnawialnych źródeł energii [P10], a także modele określające elastyczność w generowaniu ciepła przez centrum danych użyteczne do wykorzystania jego ciepła odpadowego [P6][P5][P8][D5].

Dodatkowe 5 prac w czasopismach indeksowanych w JCR oraz innych 18 prac, których jestem współautorem w okresie po obronie doktoratu, nie zostało ujęte w przedstawianym cyklu publikacji wchodzących w skład głównego osiągnięcia naukowego. Stanowią one dopełnienie wyników prowadzonych badań. Zdecydowana większość z nich jest ściśle powiązana z tematyką efektywności energetycznej systemów komputerowych. Zostały one podsumowane w załączniku "Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki".

V. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH

A. OMÓWIENIE REALIZOWANYCH PROJEKTÓW O CHARAKTERZE NAUKOWYM ORAZ BADAWCZO-ROZWOJOWYM

Większość badań była powiązana z pracami projektów w międzynarodowych konsorcjach, w których kierunki badań, wyzwania i założenia były dyskutowane z uznanymi ośrodkami badawczymi oraz firmami. Projekty, w których wyniki przedstawionego cyklu prac znalazły zastosowanie to m.in.:

- projekt CoolEmAll [F1][P6][F2-F6][F8], koordynowany przez autora przedstawionego cyklu prac, w którym rozwijano oprogramowanie DCworms i SVDToolkit;
- projekt FiPS [F7][F10], w którym budowano i wykorzystywano środowisko LABEE, wykorzystano symulator DCworms, analizowano pracę wentylatorów [F11] i zoptymalizowano oprogramowanie do dopasowania sekwencji [P11];
- DOLFIN, w którym wykorzystywano środowisko LABEE wraz z systemem fotowoltaicznym do demonstracji oprogramowania do zwiększenia wykorzystania

- energii odnawialnej do zasilania serwerów [P10];
- ESCAPE, w którym rozwinięto i wykorzystano symulator DCworms do symulacji efektywności energetycznej aplikacji do numerycznej prognozy pogody [ESCAPE];
 - M2DC, koordynowany przez autora przedstawionego cyklu prac, w którym wykorzystywano laboratorium LABEE jako główne środowisko testowe projektu, metody ograniczania mocy [P14] i zarządzania chłodzeniem [P8][F15] do stworzenia oprogramowania RTM zintegrowanego z nową platformą serwerową rozwijaną w projekcie [P12];
 - CATALYST, w którym analizowane jest wykorzystanie ciepła odpadowego centrum danych oraz wykorzystanie energii odnawialnej do zasilania centrum danych [F16][D5];
 - RECIPE, w którym poprzednie prace dotyczące analizy aplikacji są wykorzystywane do zapewnienia wykonania aplikacji numerycznej prognozy pogody w ograniczonym czasie i mocy;
 - ASPIDE, w którym wykorzystywane jest środowisko LABEE do analizy wydajności i efektywności aplikacji przetwarzających duże ilości danych, np. uczenia maszynowego.

Znaczna część prac naukowych była też realizowana w ramach grantów finansowanych ze środków Narodowego Centrum Nauki i Rozwoju oraz Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w tym:

- Grant badawczy COST IC0804: Metody oszczędzania energii w systemach rozproszonych dużej skali (Energy Efficiency in Large Scale Distributed Systems)
- Gant badawczy MAESTRO: Energooszczędne modele i algorytmy dla systemów i sieci komputerowych przyszłych generacji (Energy-efficient Models and Algorithms for Future Generation Computing and Networking Systems)

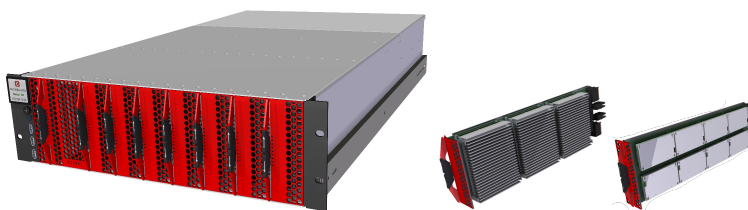
B. OMÓWIENIE WYKORZYSTANIA WYNIKÓW PRACY NAUKOWEJ ORAZ OPRACOWANYCH ROZWIĄZAŃ

Znaczna część wyników przedstawionych w opisie prac w ramach osiągnięcia naukowego ma wymiar praktyczny. Wiele z osiągniętych wyników doprowadziło do powstania oprogramowania, prototypów systemów, a nawet wdrożeń w rzeczywistych systemach i współpracy z przemysłem.

Symulator DCworms (*Data Center Workload and Resource Management Simulator*) [P1] powstał jako rozszerzenie symulatora GSSIM [D2][E11] w celu umożliwienia zaawansowanych symulacji złożonych systemów komputerowych, w tym całych centrów danych, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów energetycznych. DCworms jest pierwszym i jedynym symulatorem umożliwiającym tak kompleksowe symulacje centrów danych od szczegółowej charakterystyki aplikacji oraz heterogenicznych układów obliczeniowych, poprzez algorytmy szeregowania zadań i zarządzania zasobami, aż po procesy cieplne i systemy chłodzenia oraz koszty energii elektrycznej. Symulator umożliwia wykorzystanie popularnych formatów opisu zadań zleconych do systemów (swf), definiowanie opisów aplikacji oraz zasobów obliczeniowych, tworzenie wtyczek programistycznych (ang. *plugins*) z implementacją algorytmów i modeli. Moduł statystyczny daje możliwość generacji różnorodnych statystyk i wykresów. Oprogramowanie jest

udostępniane na licencji wolnego oprogramowania (open source). W ramach projektu międzynarodowego CoolEmAll, DCworms stał się częścią pakietu oprogramowania SVD Toolkit [F1][P6][F2][F6][F8][F10] umożliwiającego łączenie symulacji opartej na zdarzeniach dyskretnych, symulacji procesów cieplnych opartej na mechanice obliczeniowej płynów, zaawansowanej wizualizacji oraz analizie metryk.

Pakiet oprogramowania RTM (*Resource and Thermal Manager*) obejmuje oprogramowanie do inteligentnego ograniczania mocy (*Power Capping Manager*) i oszczędzania energii (*Energy Saver Manager*) [P14] oraz do sterowania wentylatorami [P6][P8][F11][F15]. Oprogramowanie były rozwijane w ramach kilku projektów i stosowane do różnych platform sprzętowych. Obecnie jest integrowane w ramach projektu M2DC, koordynowanego przez autora przedstawionego cyklu prac, tworzącego zaawansowaną platformę mikroserwerową [P12]. Dzięki temu oprogramowanie staje się częścią nowych serwerów RECS4 firmy Christmann [RECS][Christmann] przedstawionych na rysunku 6. Wersje opracowanej platformy dla systemów dużej mocy (HPC) oraz chmur są przygotowywane na warstwie programowo-aplikacyjnej przez PCSS. Oprogramowanie RTM oprócz zastosowania do zarządzania specyficznymi rozwiązaniami serwerowymi jest również wdrożone w laboratorium efektywności energetycznej (przedstawionym poniżej) do redukcji kosztów energii.



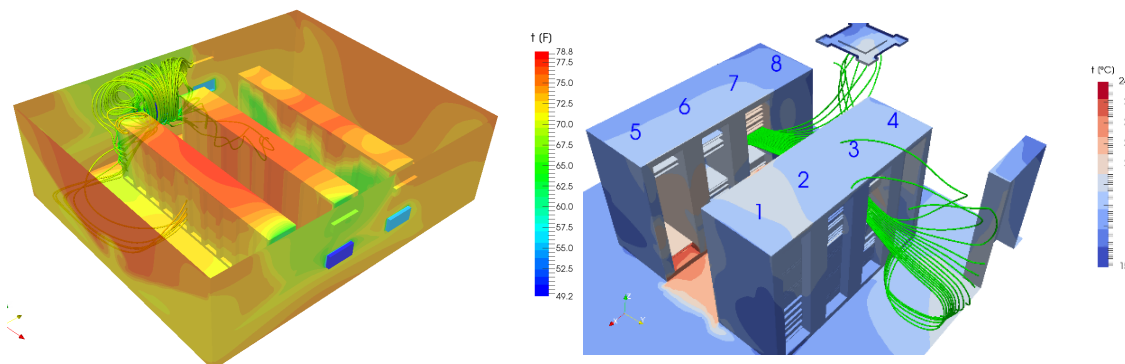
Rysunek 6 Platforma mikroserwerowa RECS4, opracowana w ramach projektu M2DC

Laboratorium Efektywności Energetycznej LABEE zostało stworzone w PCSS jako środowisko do przeprowadzania eksperymentów obliczeniowych związanych z efektywnością systemów komputerowych. Składa się z mikroserwerowni wyposażonej w heterogeniczne zasoby sprzętowe, w tym prototypy platform serwerowych opracowanych w ramach projektów międzynarodowych. Szczegółowe systemy monitorowania zawierają m.in. system BEMOS [P13] uzupełnione przez liczne czujniki i urządzenia pomiarowe. Na zasobach laboratorium zainstalowane i testowane jest oprogramowanie RTM [P14] omówione w poprzednim paragrafie oraz w obszarach [O3][O4]. Środowisko testowe jest dostępne dla zarejestrowanych użytkowników poprzez portal <http://labee.psn.pl> i było wykorzystywane w wielu projektach międzynarodowych, m.in. FiPS i M2DC oraz DOLFIN i CATALYST.



Rysunek 7 Wizualizacja danych z monitorowania środowiska testowego w portalu LABEE

Inne wdrożenia i zastosowania obejmują wykorzystanie opracowanych modeli i przeprowadzonych analiz do specyficznych przypadków praktycznych. Prace w obszarze modeli cieplnych wykorzystano w połączeniu z symulacjami CFD do analizy efektywności chłodzenia dla Hitachi Consulting oraz do audytu cieplno-energetycznego serwerowni IKEA Industry. Przykładowe wizualizacje procesu chłodzenia w serwerowniach są przedstawione na rysunku 8.



Rysunek 8 Wizualizacje procesu chłodzenia w serwerowniach

C. OPIEKA NAUKOWA NAD STUDENTAMI I DOKTORANTAMI W CHARAKTERZE OPIEKUNA NAUKOWEGO LUB PROMOTORA POMOCNICZEGO

Aktualnie jestem promotorem pomocniczym doktoranta na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej:

- mgr inż. Wojciech Piątek

Temat: *Zarządzanie energią i chłodzeniem heterogenicznych systemów serwerowych w centrach danych (ang. Energy and thermal management of heterogeneous servers in data centers)*

Praca dotyczy metod zarządzania serwerami z uwzględnieniem aspektów cieplnych oraz procesów chłodzenia tych systemów, w szczególności algorytmów zarządzania wentylatorami w serwerach. Wspólnie realizowana aktywność naukowa-badawczo przyczyniła się do opracowania szeregu metod i algorytmów przedstawionych w serii wartościowych wspólnych prac, m.in. [P5][P8][F11][F15]. Wyniki praktyczne obejmują również rozwój oprogramowania DCworms służącego do symulacji systemów komputerowych oraz narzędzi do zarządzania zasobami, wdrażanych w rzeczywistym systemie serwerowym.

Sprawowałem opiekę nad następującymi pracami magisterskimi realizowanymi w Instytucie Informatyki Politechniki Poznańskiej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Jana Węglarza:

- Michał Witkowski

Temat: *Analiza efektywności energetycznej aplikacji w systemach komputerów dużej mocy (ang. Analysis of Application Energy Efficiency in High Performance Computing Environments)*

Praca nagrodzona **pierwszą nagrodą** w XXVIII Ogólnopolskim Konkursie na najlepsze prace magisterskie z zakresu informatyki i jej zastosowań organizowanym przez Polskie Towarzystwo Informatyczne.

- Mateusz Jarus

Temat: Dynamiczne szacowanie poboru mocy serwerów obliczeniowych dla różnych klas rzeczywistych aplikacji (ang. *Runtime power usage estimation for various classes of real-life applications executed on HPC servers*)

Praca zdobyła **główną nagrodę** w Konkursie „Nagroda Miasta Poznania za wyróżniającą się pracę magisterską”.

Praca nagrodzona **wyróżnieniem** w XXIX Ogólnopolskim Konkursie na najlepsze prace magisterskie z zakresu informatyki i jej zastosowań organizowanym przez Polskie Towarzystwo Informatyczne.

- Andrzej Przybyszewski

Temat: Opracowanie nowych modeli aplikacji równoległych oraz heterogenicznych zasobów w środowisku symulacyjnym (ang. *Development of new models of parallel applications and heterogeneous resources in the simulation environment*)

- Andrzej Mikołajczak

Temat: Analiza i szacowanie zużycia energii przez urządzenia w domu i biurze za pomocą nieinwazyjnych technik monitorowania obciążenia (ang. *Analysis and estimation of energy consumption at homes and offices using non-intrusive load monitoring techniques*)

- Konrad Kuczyński

Temat: Analiza zużycia energii w inteligentnych budynkach za pomocą nieinwazyjnych technik monitorowania obciążenia (ang. *Analysis of energy consumption of smart buildings using non-intrusive load monitoring techniques*)

D. UDZIAŁ W ORGANIZACJI KONFERENCJI ORAZ RECENZOWANIU PRAC NAUKOWYCH

Wyniki moich badań były wielokrotnie prezentowane na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych (zestawienie referatów zostało przedstawione w pkt. II.L w wykazie dorobku). Oprócz wielokrotnej prezentacji wyników moich badań uczestniczyłem w organizacji i ocenie artykułów na konferencjach, będąc w komitetach programowych ponad 20 z nich. W szczególności współorganizuję 2 różne warsztaty o tematyce efektywności energetycznej systemów komputerowych: **Energy Efficient Data Centres** oraz **Power and Energy Aspects of Computing** (zestawienie uczestnictwa w komitetach organizacyjnych i programowych konferencji zostało przedstawione w pkt. III.C wykazu dorobku).

Recenzent kilkudziesięciu publikacji naukowych dla 16 czasopism z listy JCR dotyczących środowisk obliczeniowych dużej mocy, systemów równoległych i rozproszonych, systemów komputerowych nowej generacji, modelowania i symulacji, efektywności energetycznej, szeregowania. W marcu 2018 roku otrzymałem od czasopisma Future Generation Computer Systems certyfikat: „**Certificate of Outstanding Contribution in Reviewing**”. Sumaryczna liczba recenzji w czasopismach wydawnictwa Elsevier wyniosła 22, potwierdzona również certyfikatami „Certificate of Reviewing” otrzymanymi od Sustainable Computing, Informatics and Systems, Ad Hoc Networks, Parallel Computing, Simulation Modeling Practice and Theory, MethodsX, Heat and Mass Transfer.

VI. PODSUMOWANIE WSKAŹNIKÓW NAUKOMETRYCZNYCH

Suma punktów MNiSW wg danych z 2016r. za publikacje wchodzące w skład cyklu prac stanowiących osiągnięcie naukowe wyniosła **320**, natomiast sumaryczny *Impact Factor* tych publikacji, według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania wyniósł **21,489**.

Sumaryczny *Impact Factor* wszystkich **18** publikacji z listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania wyniósł **29,885** (w tym **25,792** dla **14** publikacji po uzyskaniu stopnia doktora).

Sumaryczna liczba punktów MNiSW za publikacje wg danych z 2016r. wyniosła **515** (w tym **415** po uzyskaniu stopnia doktora).

Liczba cytowań publikacji wyniosła odpowiednio:

- Web of Sciences: **196** (**168** bez autocytowań), cytowania poszczególnych prac: 32, 21, 20, 16, 14, 14, 13, 13, 11, 9, ...
- Scopus: **482** (**402** bez autocytowań), cytowania poszczególnych prac: 106, 38, 29, 25, 25, 21, 21, 19, 17, 15, 13, 13, 13, 11, ...
- Google Scholar: **1123**

Indeks Hirscha wyniósł odpowiednio:

- Web of Science: **9**
- Scopus: **13**
- Google Scholar: **18**

Literatura

[Asa06] K. Asanovic, R. Bodik, J. Demmel, T. Keaveny, K. Keutzer, J. Kubiawicz, N. Morgan, D. Patterson, K. Sen, J. Wawrzynek, D. Wessel, and K. Yelick, "The Landscape of Parallel Computing Research: A View from Berkeley," Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, Tech. Rep. UCB/EECS-2006-183, 2006

[Ave12] V. Avelar, D. Azevedo, A. French, PUE: A comprehensive examination of the metric, White paper 49, The GreenGrid (2012).

[Bel11] Anton Beloglazov, Rajkumar Buyya, Young Choon Lee, and Albert Y. Zomaya. 2011. A Taxonomy and Survey of Energy-Efficient Data Centers and Cloud Computing Systems. *Advances in Computers* 82 (2011), 47–111.

[Ben12] Benedict, S.: Review: Energy-aware performance analysis methodologies for hpc architectures-an exploratory study. *J. Netw. Comput. Appl.* 35 (6), 1709_1719 (2012). DOI 10.1016/j.jnca.2012.08.003. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2012.08.003>

[Bła07] J. Błażewicz, K.H. Ecker, E. Pesch, G. Schmidt and J. Węglarz, *Handbook of Scheduling: From Theory to Applications*, Springer-Verlag, Berlin 2007

[Bła13] J. Blazewicz, W. Frohberg, M. Kierzynka, P. Wojciechowski, G-MSA—A GPUbased, fast and accurate algorithm for multiple sequence alignment, *J. Parallel Distrib. Comput.* 73 (2013) 32–41.

[Bod14] Bodas, D., Song, J., Rajappa, M., Hoffman, A.: Simple power-aware scheduler to limit power consumption by hpc system within a budget. In: *Proceedings of the 2Nd International Workshop on Energy E-cient Supercomputing, E2SC '14*, pp. 2130. IEEE Press, Piscataway, NJ, USA (2014). DOI 10.1109/E2SC.2014.8. URL <http://dx.doi.org/10.1109/E2SC.2014.8>

[Cai11] Cai, C., Wang, L., Khan, S.U., Tao, J.: Energy-aware high performance computing: A taxonomy study. In: *2011 IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems*, pp. 953958 (2011). DOI 10.1109/ICPADS.2011.59

[Don11] J. Dongarra et al. The International Exascale Software Project Roadmap. *IJHPCA*, 25(1) pp. 3–60, DOI: 10.1177/1094342010391989, 2011

[Don18] M Asch, T Moore, R Badia, M Beck, P Beckman, T Bidot, F Bodin, F Cappello, A Choudhary, B de Supinski, E Deelman, J Dongarra, A Dubey, G Fox, H Fu, S Girona, W Gropp, M Heroux, Y Ishikawa, K Keahey, D Keyes, W Kramer, J-F Lavignon, Y Lu, S Matsuoka, B Mohr, D Reed, S Requena, J Saltz, T Schulthess, R Stevens, M Swamy, A Szalay, W Tang, G Varoquaux, J-P Vilotte, R Wisniewski, Z Xu, I Zacharov (2018). Big data and extreme-scale computing: Pathways to Convergence-Toward a shaping strategy for a future software and data ecosystem for scientific inquiry. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 32(4), 435–479. <https://doi.org/10.1177/1094342018778123>

[Geo15] Georgiou, Y., Glesser, D., Hautreux, M., Trystram, D.: Power adaptive scheduling (2015). SLURM User Group 2015, https://slurm.schedmd.com/SLUG15/Power_Adaptive_final.pdf

- [Goi12] Í Goiri, K Le, TD Nguyen, J Guitart, J Torres, R Bianchini, GreenHadoop: leveraging green energy in data-processing frameworks, Proceedings of the 7th ACM european conference on Computer Systems, 57-70, 2012
- [Goi11] Í Goiri, R Beauchea, K Le, TD Nguyen, ME Haque, J Guitart, J Torres, Ricardo Bianchini, Greenslot: scheduling energy consumption in green datacenters, High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC), IEEE, 1-11, 2011
- [Gra14] Grant, R.E., Olivier, S.L., Laros, J.H., Brightwell, R., Portereld, A.K.: Metrics for evaluating energy saving techniques for resilient hpc systems. In: 2014 IEEE International Parallel Distributed Processing Symposium Workshops, pp. 790797 (2014). DOI 10.1109/IPDPSW.2014.91
- [Jin16] Jin, Chao, de Supinski, Bronis R., Abramson, David, Poxon, Heidi, DeRose, Luiz, Dinh, Minh Ngoc, Endrei, Mark and Jessup, Elizabeth R. (2016) A survey on software methods to improve the energy efficiency of parallel computing. International Journal of High Performance Computing Applications, 31 6: 517-549.
- [Koomey08] Jonathan G Koomey. 2008. Worldwide electricity used in data centers. Environmental Research Letters 3, 3 (2008), 034008 (8pp).
- [Koomey11] Jonathan G Koomey. 2011. Growth in Data center electricity use 2005 to 2010. Environmental Research Letters 3, 3 (2011), 034008.
- [Min09] L. Minas and B. Ellison, Energy Efficiency for Information Technology: How to Reduce Power Consumption in Servers and Data Centers. Intel Press, Aug. 2009.
- [Obr14] O'brien, K., Pietri, I., Reddy, R., Lastovetsky, A., Sakellariou, R.: A survey of power and energy predictive models in hpc systems and applications. ACM Comput. Surv. 50(3), 37:137:38 (2017). DOI 10.1145/3078811. URL <http://doi.acm.org/10.1145/3078811>
- [Org14] Orgerie, A.C., Assuncao, M.D.d., Lefevre, L.: A survey on techniques for improving the energy e-ciency of large-scale distributed systems. ACM Comput. Surv. 46(4), 47:147:31 (2014). DOI 10.1145/2532637. URL <http://doi.acm.org/10.1145/2532637>
- [Pat13] M. K. Patterson, S. W. Poole, C.-H. Hsu, D. Maxwell, W. Tschudi, H. Coles, D. J. Martinez, and N. Bates, "TUE, a new energy efficiency metric applied at ornls jaguar," in Proceedings of International Supercomputing Conference. Springer, 2013, pp. 372–382.
- [Raj17] Rajagopal, D., Tafani, D., Georgiou, Y., Glesser, D., Ott, M.: A novel approach for job scheduling optimizations under power cap for arm and intel hpc systems. In: 2017 IEEE 24th International Conference on High Performance Computing (HiPC), pp. 142-151 (2017). DOI 10.1109/HiPC.2017.00025
- [Red17] V. D. Reddy, B. Setz, G. S. V. R. K. Rao, G. R. Gangadharan and M. Aiello, "Metrics for Sustainable Data Centers," in *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, vol. 2, no. 3, pp. 290-303, 1 July-Sept. 2017. doi: 10.1109/TSUSC.2017.2701883

-
- [Roj17] Krzysztof Rojek, Enrique S. Quintana-Ortí, Roman Wyrzykowski, Modeling power consumption of 3D MPDATA and the CG method on ARM and Intel multicore architectures, *The Journal of Supercomputing*, 2017, Volume 73, Number 10, Page 4373
- [Róż12] R Różycki, J Węglarz, Power-aware scheduling of preemptable jobs on identical parallel processors to meet deadlines, *European Journal of Operational Research* 218 (1), 68-75, 2012
- [Róż14] R Różycki, J Węglarz, Power-aware scheduling of preemptable jobs on identical parallel processors to minimize makespan, *Annals of Operations Research* 213 (1), 235-252, 2014
- [Sta12] M. Stansberry, J. Kudritzki, Uptime institute 2012 data center industry survey, Tech. rep. (2012).
- [Sur13] Surve, A.R., Khomane, A.R., Cheke, S.: Energy awareness in hpc: A survey. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 2(3), 4651 (2013). <https://www.ijcsmc.com/docs/papers/March2013/V2I3201309.pdf>
- [Sul04] A. Sulistio, C.S. Yeo and R. Buyya, A taxonomy of computer-based simulation and its mapping to parallel and distributed systems simulation tools, *International Journal of Software: Practice and Experience* 34 (2004), 653–673, DOI: 10.1002/spe.585, 2004
- [Wel17] J. Wanza Weloli, S. Bilavarn, M. De Vries, S. Derradji, C. Belleudy, Efficiency modeling and exploration of 64-bit ARM compute nodes for exascale, *Microprocessors and Microsystems*, Volume 53, 2017, Pages 68-80, ISSN 0141-9331, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2017.06.019>.
- [Węg11] J. Węglarz, J. Józefowska, M. Mika and G. Waligóra, Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes: a survey, *European Journal of Operational Research* 2008, 117-205 (2011), DOI: 10.1016/j.ejor.2010.03.037, 2011

Projekty i odnośniki www

[Christmann] Christmann Informationstechnik + medien, <https://christmann.info/>

[ESCAPE] Energy-efficient Scalable Algorithms for Weather Prediction at Exascale (ESCAPE), <http://www.hpc-escape.eu/>

[GreenGrid] Harmonizing global metrics for data center energy efficiency, Tech. rep., Global Taskforce Reaches Agreement Regarding Data Center Productivity, The Green Grid (March 2014), <https://www.thegreengrid.org/en/resources/library-and-tools/215-Harmonizing-Global-Metrics-for-Data-Center-Energy-Efficiency-%E2%80%93-March-2014>

[HiPEAC] High Performance and Embedded Architecture and Compilation (HiPEAC), <https://www.hipeac.net/>

[IC0804] IC0804 – Energy efficiency in large scale distributed systems, <https://www.cost.eu/actions/IC0804/#tabs|Name:overview>

[Kubernetes] Kubernetes – Production-Grade Container Orchestration, <https://kubernetes.io/>

[M2DC] Modular Microserver Data Centre (M2DC), <http://m2dc.eu>

[Moab] Moab Cloud HPC Suite, <http://www.adaptivecomputing.com/moab-hpc-basic-edition/>

[MontBlanc] MontBlanc project, <https://www.montblanc-project.eu/>

[Moonshot] HP Moonshot system. (2018). <https://www.hpe.com/emea/europe/en/servers/moonshot.html>

[NESUS] Network for Sustainable Ultrascale Computing (NESUS), <http://www.nesus.eu/>

[OpenStack] OpenStack – Open source software for creating private and public clouds, <https://www.openstack.org/>

[PUE] The Green Grid Data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCiE, <http://www.thegreengrid.org/Global/Content/white-papers/The-Green-Grid-Data-Center-Power-Efficiency-Metrics-PUE-and-DCiE>

[RECS] Resource Efficient Cluster Server (RECS), Christmann Informationstechnik + medien, <https://christmann.info/forschung/>

[SLURM] SLURM Workload Manager, <https://slurm.schedmd.com/>

[VMware] VMware Distributed Power Management, <https://www.vmware.com/content/dam/digitalmarketing/vmware/en/pdf/techpaper/Distributed-Power-Management-vSphere.pdf>

