



Tomasz MIROWSKI\*, Jacek KAMIŃSKI\*\*, Artur WYRWA\*\*\*

## Implementacja modeli systemów paliwowo-energetycznych w infrastrukturze PLGrid Plus

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono krótką analizę specjalistycznych usług IT przeznaczonych dla sektora energetyki. Usługi te opierają się na matematycznych modelach systemów paliwowo-energetycznych, które dzięki implementacji w infrastrukturze PLGrid oraz łatwemu interfejsowi użytkownika pozwalają na wykonywanie symulacji zarówno specjalistom zajmującym się modelowaniem, jak i mniej zaawansowanym użytkownikom. Przeanalizowano również infrastrukturę PLGrid, która została utworzona z pięciu największych w Polsce ośrodków obliczeniowych w celu zapewnienia możliwości prowadzenia badań opierając się na symulacjach komputerowych i obliczeniach w różnych dziedzinach e-Science.

**SŁOWA KLUCZOWE:** krajowy system elektroenergetyczny, modelowanie matematyczne, badania długookresowe, polityka energetyczna, obliczenia dużej skali

### Wprowadzenie

W czasie, gdy szybki dostęp do informacji jest kluczowy w wielu dziedzinach życia, coraz częściej doceniane są niezawodność systemów informatycznych oraz łatwy dostęp do usług

---

\* Dr inż. – Pracownia Zrównoważonego Rozwoju Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: mirowski@meeri.pl

\*\* Dr hab. inż. – Pracownia Polityki Energetycznej i Ekologicznej, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: kaminski@meeri.pl

\*\*\* Dr inż. – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Kraków; e-mail: awyrwa@agh.edu.pl

obsługiwanych przez te systemy. Dynamika rozwiązań proponowanych przez środowisko IT jest w ostatnim okresie tak zawrotna, że z trudem nadąża się za standardami, nie wspominając o nowościach. Przykładem jest choćby „przetwarzanie w chmurze” (ang. *Cloud Computing*), często określane jako „praca w chmurze” czyli przetwarzanie zasobów IT, przechowywanie ich oraz udostępnianie na żądanie. Jeszcze do niedawna można było powiedzieć, że idea *Cloud Computing* to swoiste bujanie w obłokach (np. ze względu na ograniczony dostęp użytkowników komputerów do Internetu, przepustowości łącz internetowych itp.) i że jest nieosiągalnym marzeniem. Zapoczątkowane w 2008 roku przez serwis Amazon i równoległe projekt OpenNebula udostępniania danych finansowany przez Komisję Europejską, następnie w 2010 roku wykorzystane przez NASA, dziś przetwarzanie w chmurze jest jedną w wielu usług informatycznych. Podobnie jest z aplikacjami, z których możemy korzystać na wielu urządzeniach z różnymi systemami, poprzez przeglądarki internetowe, zdalne pulpity itp.

Biorąc pod uwagę te uwarunkowania, za cel artykułu postawiono ogólną analizę możliwości, jakie zostały wypracowane dla środowiska naukowego w Polsce, w szczególności w dziedzinie energetyki, w zakresie dedykowanych usług IT.

## 1. Modele systemów paliwowo-energetycznych

Sektor paliwowo-energetyczny to zasadniczy element funkcjonowania każdego państwa. Jego badania są kluczowe dla procesu tworzenia założeń do polityki energetycznej każdego państwa, a także w procesie decyzyjnym wielu przedsiębiorstw energetycznych. Przetworzenie i analiza informacji statystycznej dotyczącej sektora nie pozwalają obecnie na wyciągnięcie cennych wniosków. W pracach wykonywanych przez renomowane instytuty i jednostki naukowo-badawcze (International Energy Agency, International Institute for Applied Systems Analysis, IGSMiE PAN, AGH) długoterminowe prognozy rozwoju systemów paliwowo-energetycznych wykonywane są za pomocą modeli matematycznych. Zmiany w systemach paliwowo-energetycznych powodowane wieloma czynnikami są bardzo trudne do przewidzenia w przyszłości. Dlatego też wiele prac badawczych związanych z modelowaniem systemów paliwowo-energetycznych (np. EU 2014; Gawlik 2013) zakłada scenariusze, w których przyjęte założenia będą miały określony skutek w przyszłości. Przykładem jest ostatni projekt Ministerstwa Gospodarki przedstawiający wnioski z analiz prognostycznych krajowych ośrodków zajmujących się modelowaniem krajowego sektora paliwowo-energetycznego (MG 2014).

Kolejnym czynnikiem, który utrudnia wykonanie dokładnych analiz w relatywnie krótkim czasie, jest problem z przetwarzaniem coraz większej ilości danych. Częstość wykonywania obliczeń dla założonych scenariuszy powoduje, że końcowy wynik prac badawczych może ukazać się po kilku, a nawet kilkunastu miesiącach. Aby tak prowadzone badania były w pełni efektywne, nie wystarczy zaawansowany w swej budowie model, który uwzględni tysiące zmiennych i bazuje na najnowszych danych wejściowych. Potrzebna jest odpowiednia moc obliczeniowa z bezpieczną przestrzenią pamięci dyskowej do przechowywania wyników.

Można się zatem spodziewać, że modele systemów paliwowo-energetycznych, np. takich jak: (Kamiński i Saługa 2014; Suwała 2013; Kudelko 2005), staną się bardziej docenione przez środowisko naukowe i szeroko pojęty przemysł paliwowo-energetyczny.

## 2. Obliczenia dużej skali w infrastrukturze PLGrid

Efektywność prowadzonych badań za pomocą zaawansowanych modeli systemów paliwowo-energetycznych – z punktu widzenia użyteczności samego narzędzia – można zdefiniować jako liczbę poprawnych wyników przeprowadzonych symulacji przy zadanym zbiorze danych wejściowych. Im wartość jest wyższa w założonej jednostce czasu, tym rezultaty badań trafiają szybciej do decydenta. Zasadniczą rolę odgrywa tu zespół badawczy, który przygotowuje zbiory danych wejściowych i analizuje wyniki otrzymanych symulacji. Znaczenie ma także sprzęt, na którym wykonuje się te symulacje. Zwiększając w modelu rozdzielczość czasową obliczeń, można napotkać na szereg problemów (niewystarczająca ilość pamięci operacyjnej, kolejkowanie), z którymi nie radzą sobie nawet klastry obliczeniowe, nie wspominając o indywidualnych jednostkach klasy PC.

W celu zwiększenia potencjału badawczego, w 2009 roku na potrzeby środowisk naukowych została utworzona Polska Infrastruktura Gridowa zapewniająca możliwość prowadzenia badań opartych na symulacjach komputerowych i obliczeniach o dużej skali. Infrastruktura ta została utworzona poprzez połączenie w konsorcjum pięciu największych ośrodków badawczych IT: Akademickiego Centrum Komputerowego CYFRONET AGH w Krakowie, Interdyscyplinarnego Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego w Warszawie (ICM UW), Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej w Gdańsku (CI TASK), Poznańskiego Centrum Superkomputerowo Sieciowego w Poznaniu (PCSS) oraz Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego (WCSS).

W ramach projektu o nazwie PL-Grid opracowano i wdrożono narzędzia umożliwiające tworzenie i uruchomienie projektów naukowych o ogromnych zasobach obliczeniowych. Wykorzystanie rozproszonych źródeł danych pozwala użytkownikom prowadzić obliczenia ze swojego komputera z dowolnego miejsca za pomocą wygodnych i prostych interfejsów. Dzięki systemom gridowym, które wybierają najmniej obciążone obliczeniowo maszyny, efektywność prowadzonych obliczeń o dużej skali jest nieporównywalnie większa w stosunku do innych rozwiązań (Kitowski i in. 2014). Obecnie dostępne zasoby obliczeniowe w infrastrukturze PL-Grid charakteryzują następujące parametry (PLGrid, 2014):

- ✧ moc obliczeniowa: 588,02 TFlops,
- ✧ pamięć dyskowa: 5,6 PB,
- ✧ pamięć operacyjna: 107,9 TB,
- ✧ liczba rdzeni obliczeniowych: 40 288.

### 3. Modele matematyczne zbudowane w ramach PL-Grid ENERGETYKA

Infrastruktura PL-Grid to część paneuropejskiej infrastruktury tworzonej w ramach EGI (*European Grid Initiative*). Jej celem było połączenie narodowych platform gridowych w jedną stabilną infrastrukturę produkcyjną.

Obecny projekt PLGrid Plus rozszerza usługi z zakresu *e-science* o konkretne dziedziny nauki, które charakteryzują się zróżnicowaną specyfiką i potrzebami w zakresie wykonywania obliczeń z wykorzystaniem komputerów dużej mocy (KDM), składowania danych oraz ich udostępniania. Jedną z dziedzin w projekcie PLGrid Plus jest energetyka. Dla tej dziedziny, dzięki pracy trzech zespołów badawczych z AGH i IGSMiE PAN, zaprojektowano, zbudowano i wdrożono następujące modele matematyczne (Mirowski i in. 2014):

- ✧ model zintegrowanego modelowania rozwoju systemów energetycznych –  $\pi$ ESA,
- ✧ model systemu wytwarzania energii elektrycznej – ModWEEL,
- ✧ system optymalizacji produkcji w podziemnych kopalniach węgla kamiennego stosujących ścianowy system eksploatacji – OPTiCoalMine.

Pierwszym modelem, wdrażanym przez zespół z Katedry Zrównoważonego Rozwoju Wydziału Energetyki i Paliw AGH w projekcie PLGrid Plus, jest platforma do zintegrowanej analizy rozwoju polskiego systemu paliwowo-energetycznego (ang. *Platform for Integrated Energy System Analysis*, w skrócie  $\pi$ ESA).

Model  $\pi$ ESA jest najbardziej rozbudowaną usługą. W jej skład wchodzi trzy modele: (1) model polskiego systemu elektroenergetycznego opracowany przy wykorzystaniu generatora TIMES, (2) system modelowania jakości powietrza POLYPHEMUS oraz (3) model do oceny oddziaływania zanieczyszczeń na środowisko i zdrowie ludzkie MAEH.

TIMES (zintegrowany system MARKAL-EFOM) pozwala na „oddolne” (ang. *bottom-up*) budowanie liniowych dynamicznych modeli systemów energetycznych. Zakłada on konkurencyjne rynki dla wszystkich towarów oraz doskonale racjonalne zachowania producentów i konsumentów, maksymalizując ich nadwyżki. TIMES umożliwia również szacowanie wielkości emisji zanieczyszczeń np. SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> oraz pyłu zawieszonego PM 2.5 (Wyrwa 2010). Dane emisyjne posłużą do analizy wpływu realizacji scenariuszy energetycznych na środowisko i zdrowie ludzkie. Dzięki tej funkcjonalności użytkownik będzie mógł skrócić czas oczekiwania na wyniki modelowania poprzez uruchomienie własnych przygotowanych scenariuszy na superkomputerach infrastruktury PLGrid.

POLYPHEMUS to złożony system do modelowania jakości powietrza. Głównym jego elementem jest eulerowski model transportu chemicznego Polair3D stosowany do zanieczyszczeń gazowych i aerozolowych. Otrzymane w węzłach zdefiniowanej przez użytkownika siatki modelowania wartości stężeń i depozycji zanieczyszczeń wykorzystywane są w usłudze  $\pi$ ESA przez model MAEH do analizy wpływu zanieczyszczenia powietrza na zdrowie ludzkie i w konsekwencji skrócenie oczekiwanej długości życia. W przypadku zdrowia ludzkiego zestawione one są z danymi dotyczącymi gęstości zaludnienia oraz funkcjami stężenie–odpowiedź. Wpływ depozycji zanieczyszczeń na ekosystemy lądowe i wodne oceniany jest przy

wykorzystaniu ładunków krytycznych kwasowości i eutrofizacji, co pozwala na identyfikację obszarów zagrożonych.

Dostęp do modelu  $\pi$ ESA będzie możliwy poprzez stronę www, a usługa posiadać będzie dwie funkcjonalności:

- ✧ pierwsza skierowana jest do zespołów badawczych wykorzystujących w swojej pracy generator modeli systemów energetycznych TIMES,
- ✧ druga funkcjonalność skierowana jest do pozostałych użytkowników zainteresowanych badaniami w zakresie matematycznego modelowania rozwoju systemów paliwo-energetycznych, którzy nie posiadają odpowiedniego do tego celu narzędzia. W tym celu został opracowany przez twórców usługi prosty interfejs graficzny, dzięki któremu użytkownicy będą mogli wykorzystać platformę  $\pi$ ESA do opracowania własnych scenariuszy energetycznych dla Polski.

Zespół Pracowni Polityki Energetycznej i Ekologicznej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN opracował i zbudował model matematyczny oraz wdrożył usługę ModWEEL, która oferuje użytkownikom możliwość prowadzenia analiz funkcjonowania sektora wytwarzania energii elektrycznej w horyzoncie krótkoterminowym. Krajowy sektor wytwarzania energii elektrycznej (KSE) odwzorowano w usłudze ModWEEL na poziomie pojedynczych jednostek wytwórczych w godzinowej rozdzielczości czasowej z uwzględnieniem ograniczeń o charakterze technicznym, ekonomicznym i środowiskowym. Możliwe jest włączenie do obliczeń prognozowanej dyspozycyjności mocy bazujących na odnawialnych źródłach energii. Dzięki temu wyniki obliczeń niezbędne do analizy pracy KSE są dokładniejsze w porównaniu z wynikami modeli, w których zastosowano bloki zagregowane (tzw. reprezentatywne). W ramach prac nad usługą utworzono przyjazny interfejs dla użytkownika oparty na arkuszu kalkulacyjnym MS Excel, w którym przygotowane dane scenariuszowe można modyfikować według własnych preferencji. Zlecenie obliczeń w infrastrukturze PLGrid następuje przy użyciu prostej w użyciu aplikacji, a wyniki otrzymuje się w formie pliku xlsx. Obliczenia wykonywane są z wykorzystaniem programu GAMS, do którego licencji nie musi posiadać badacz.

Za pomocą ModWEEL można analizować krótkoterminowe skutki wdrożenia instrumentów polityki energetycznej i ekologicznej takich jak: limity emisji, podatki na paliwa czy podatki od emisji. Potencjalnymi użytkownikami usługi ModWEEL mogą być pracownicy i studenci wyższych uczelni technicznych (w szczególności kierunków energetycznych), jednostek naukowo-badawczych oraz przedstawiciele jednostek i urzędów zajmujących się sektorem wytwarzania energii elektrycznej w Polsce. Pierwsze wyniki analiz wykonanych z wykorzystaniem modelu ModWEEL można poznać w pracach (Ostrowska 2014; Golec 2014).

Podaż węgla na krajowym rynku ma strategiczne znaczenie dla realizacji polityki energetycznej Polski i kształtu sektora wytwarzania energii w przyszłości. Dlatego też zdecydowano dołączyć do usług dla energetyki usługę o nazwie OPTiCoalMine służącą do optymalizacji wydobywania węgla kamiennego. Model matematyczny oparty na programowaniu ewolucyjnym z selekcją elitarną, zaimplementowany w usłudze umożliwia odwzorowanie planowanych robót eksploatacyjnych w kopalni lub grupie kopalń węgla kamiennego z uwzględnieniem aspektu ryzyka związanego z procesem wydobywczym. Dzięki usłudze OPTiCoalMine można wspomagać procesy decyzyjne związane z oceną propozycji rozcięcia złoża, wyznaczania

kolejności eksploatacji partii pokładów czy doborze wyposażenia do planowanych wyrobisk (Brzychczy 2013).

## Podsumowanie

Narzędzia do modelowania systemów paliwowo-energetycznych z wykorzystaniem infrastruktury PLGrid otwierają dostęp do wykorzystania zaawansowanych modeli matematycznych, dzięki którym użytkownicy mogą do celów naukowych wykonywać symulacje i analizy z dowolnego miejsca i bez posiadania kosztownych licencji na specjalistyczne oprogramowanie. Do zalet należy zaliczyć zdecydowane przyspieszenie obliczeń; od kilku do kilkudziesięciu razy w stosunku do obliczeń wykonywanych na wysokiej klasy komputerze PC, dostępność oraz brak kosztów ponoszonych przez użytkownika (usługi są nieodpłatne dla pracowników nauki). Do trudności, jakie może napotkać użytkownik, należy zaliczyć system kolejowania wykonywanych zadań w klastrze obliczeniowym, który wydłuża czas oczekiwania na uruchomienie obliczeń. Problem ten jest jednak monitorowany i na bieżąco rozwiązywany przez zespoły techniczne obsługujące infrastrukturę PLGrid, aby zniwelować tę niedogodność.

Autorzy artykułu wyrażają nadzieję, że przybliżyli tematykę wykorzystania zaawansowanych usług informatycznych do badań związanych z sektorem paliwowo-energetycznym w Polsce.

## Literatura

- [1] BRZYCHCZY, E., 2013. The intelligent computer-aided support in designing mining operations at underground hard coal mines. 23rd World Mining Congress: held in conjunction with ISARC 2013 (International Symposium on Automation and Robotics in the Construction and Mining Industries): August 11–15 2013, Montreal/Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum 2013.
- [2] European Commission 2014. *EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050. Reference scenario 2013*. Luxembourg : EU.
- [3] GAWLIK, L. red. 2013. *Węgiel dla polskiej energetyki w perspektywie 2050 roku – analizy scenariuszowe*. Kraków, GIPH.
- [4] GOLEC, M., 2014. *Krótkoterminowa prognoza funkcjonowania sektora wytwórczego w Polsce ze szczególnym uwzględnieniem nowych mocy opartych na źródłach odnawialnych przy użyciu usługi ModWEEL*. Kraków. Biblioteka Wydziału Energetyki i Paliw AGH. Praca dyplomowa magisterska pod kierunkiem dr. inż. T. Mirowskiego.
- [5] KAMIŃSKI, J. i SAŁUGA, P. 2014. Pozyskanie surowców energetycznych na potrzeby wytwarzania energii elektrycznej – koncepcja budowy modelu matematycznego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources management* Vol. 30, Issue 1, p. 39–52.
- [6] KITOWSKI, J., WIATR, K., DUTKA, L., SZEPIENIEC, T., STERZEL, M., PAJĄK i R. DOMAIN-SPECIFIC. 2014. Services in Polish e-Infrastructure. *eScience on Distributed Computing Infrastructure. Lecture Notes in Computer Science*. Springer 2014, Volume 8500, p 1–15.

- [7] KUDELKO, M. 2005. Znaczenie analizy systemowej w prognozowaniu rozwoju sektorów paliwowo-energetycznych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 8, z. spec., s. 245–260.
- [8] MG 2014. *Wnioski z analiz prognostycznych na potrzeby Polityki Energetycznej do 2050 roku*. Warszawa: Ministerstwo Gospodarki, sierpień 2014.
- [9] MIROWSKI, T., KAMIŃSKI, J., WYRWA, A. i BRZYCHCZY, E. 2014. Środowisko obliczeniowe dla energetyki na przykładzie usług dziedzicznych w infrastrukturze PLGrid Plus. Naęczów: *VIII konferencja „Zarządzanie Energią i Teleinformatyką – ZET*.
- [10] OSTROWSKA, D. 2014. *Analiza wpływu zmian cen paliw pierwotnych na zużycie energii chemicznej w sektorze energetycznym*. Kraków. Biblioteka Wydziału Energetyki i Paliw AGH. Praca dyplomowa magisterska pod kierunkiem dr. hab. inż. J. Kamińskiego.
- [11] PLGrid 2014. Strona internetowa projektu PLGrid. [www.plgrid](http://www.plgrid) [dostęp: 02.08.2014].
- [12] SUWAŁA, W. 2013. Problemy budowy i wykorzystania modeli komputerowych w gospodarce paliwami i energią. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 16, z. 3, s. 47–58.
- [13] WYRWA, A. 2010. *Power system development: integrated assessment modeling*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, cop., s. 133–137.

Tomasz MIROWSKI, Jacek KAMIŃSKI, Artur WYRWA

## Implementation of Energy Modeling Systems in the PLGrid Plus Infrastructure

### Abstract

This paper presents a brief characterization of advanced IT services dedicated to the power sector. The services based on computer models are user friendly both for advanced specialists and ordinary users. They are implemented in PLGrid structures so that users can more quickly perform calculations. The article describes the PLGrid infrastructure, which is made up of five main supercomputing centers in Poland to provide the Polish scientific community with an IT platform based on computer clusters, enabling research in various domains of e-Science.

KEY WORDS: e-science infrastructure, energy sector tools, PLGrid Plus, national power system, mathematical modeling, large scale computing

