

Wprowadzenie do stosowania zewnętrznych podprogramów współpracujących z solverem pakietu Abaqus w analizach wariantowych profilaktyki szkód górniczych

JERZY CYGAN

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Profilaktyka negatywnego oddziaływania eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu, zabudowę i infrastrukturę opiera się na właściwym prognozowaniu jej wpływu na otoczenie. Wśród naukowych metod prognozowania znajdują się klasyczne, sprawdzone teorie, jak również nowoczesne metody obliczeniowe, wykorzystujące możliwości prowadzenia badań za pomocą symulacji numerycznych. Ciągłe zmieniające się warunki prowadzenia robót górniczych, zwłaszcza w coraz trudniejszych warunkach geologicznych, wymagają stałego doskonalenia metod prognozowania.

Wykorzystanie prognoz oddziaływania eksploatacji górniczej na otoczenie do celów profilaktyki szkód wiąże się często z wykonaniem analiz wariantowych, w celu wyłonienia najbardziej optymalnej opcji (wariantu) realizacji przedsięwzięcia. Szczególnie profilaktyka górnicza, polegająca na takim prowadzeniu robót wydobywczych, by ich wpływ na otoczenie był jak najmniejszy, wykorzystuje analizy wariantowe w celu wyłonienia najbardziej optymalnych parametrów prowadzenia eksploatacji. Analizy wariantowe mogą być również stosowane jako element profilaktyki budowlanej, m.in. w sytuacjach wyboru lokalizacji i orientacji obiektu na terenie parceli.

W artykule zaprezentowano narzędzie, które poprzez automatyzację obliczeń pakietów zadań umożliwia prowadzenie wielowariantowych analiz numerycznych, obejmujących zagadnienie oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane. Przedstawione w pracy narzędzie dedykowane jest do współpracy z solverem obliczeniowym pakietu FEA Abaqus, który jest zaawansowanym narzędziem modelowania złożonych zagadnień z zakresu mechaniki. W wyniku zrealizowanych prac uzyskano zautomatyzowanie procesu obliczeniowego na potrzeby analizy wielowariantowej z zastosowaniem procedur użytkownika. Do realizacji zadania zastosowano język skryptowy, edytor strumieniowy oraz polecenia powłoki. Powstałe procedury posłużą do polepszenia oraz usprawnienia procesu modelowania wpływu eksploatacji górniczej na posadowione nad obszarem wydobywania obiekty budowlane.

Słowa kluczowe: analizy wariantowe, szkody górnicze, eksploatacja górnicza, górnictwo podziemne, profilaktyka szkód górniczych, modelowanie komputerowe w systemie FEA Abaqus

1. Wstęp

Eksploatacja górnicza, niezbędna dla funkcjonowania gospodarki, pociąga za sobą wiele niepożądanych skutków ubocznych. Skutki te ogólnie określa się mianem szkód górniczych. Jednym z ich rodzajów jest szkodliwy, a nierzadko destrukcyjny wpływ na obiekty budowlane położone nad obszarem, w którym prowadzone są roboty górnicze. Konieczność likwidacji zaistniałych uszkodzeń i przywrócenia obiektów do stanu sprzed powstania szkody pociąga za sobą duże nakłady finansowe, co w konsekwencji zwiększa koszty robót górniczych oraz powoduje szereg niekorzystnych skutków obejmujących nie tylko aspekty materialne ale również społeczne i ekonomiczne.

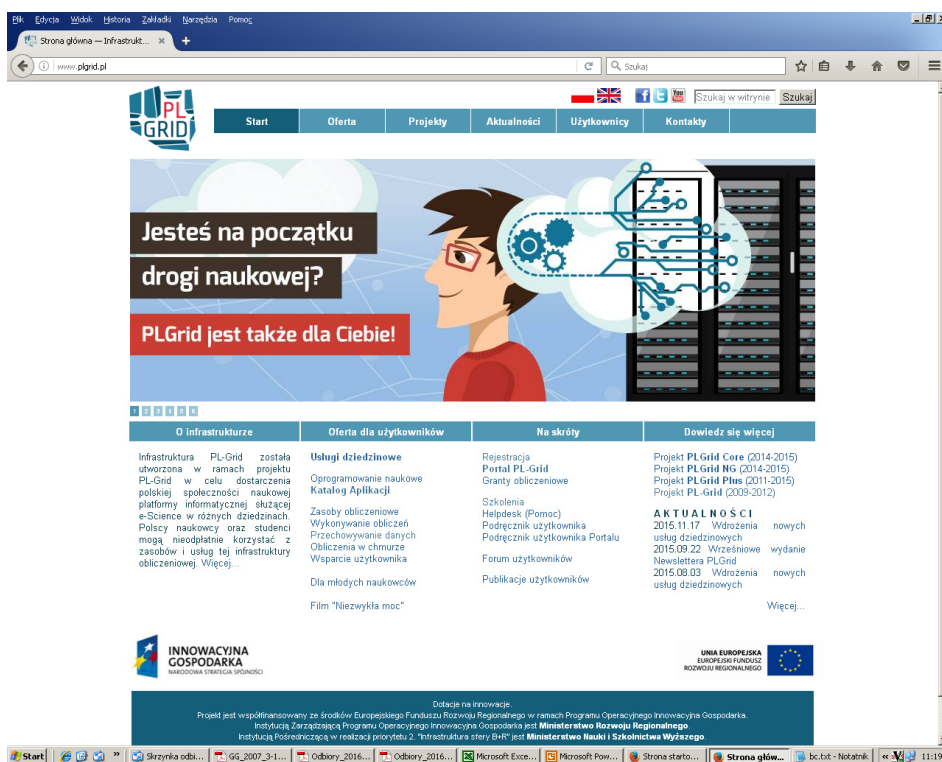
Dla ochrony obiektów znajdujących na terenie objętym oddziaływaniem eksploatacji stosowany jest szereg działań określanych mianem profilaktyki szkód górniczych. Działania te, zarówno obejmujące optymalizację procesów wydobywczych (profilaktyka górnicza), jak i właściwe zabezpieczanie obiektów budowlanych (profilaktyka budowlana) opierają się na odpowiednim prognozowaniu oddziaływania eksplo-

atacji na powierzchnię i zabudowę. Zatem skuteczność podejmowanych działań profilaktycznych uzależniona jest od prawidłowego wyznaczenia wpływu planowanych robót górniczych na obiekty budowlane zlokalizowane w zasięgu ich oddziaływania. Z tego powodu rozwijanie i doskonalenie metod określania skutków eksploatacji, zwłaszcza w obliczu stale zmieniających się warunków prowadzenia robót wybierkowych, jest szczególnie istotne w kontekście ochrony terenów górniczych oraz zrównoważonego rozwoju regionów wydobywczych [Cygan i Florkowska, 2016; Cygan i in., 2007]. Nowe, stale ulepszane narzędzia, jakimi są programy do modelowania i symulacji procesów [m.in. FEA Abaqus] są często stosowane w złożonych zagadnieniach badawczych [Florkowska i in., 2013].

W problematyce analizy wpływu planowanej eksploatacji na powierzchnię i obiekty budowlane szczególną rolę odgrywa metoda analizy wariantowej, polegająca na sprawdzaniu wielu możliwych do realizacji scenariuszy i wyborze najbardziej optymalnego z nich – według ustalonych kryteriów. W przypadku rozważanego zagadnienia – eksploatacji górniczej – kryterium optymalizacji stanowić może minimalizacja jej oddziaływania na otoczenie przy zachowaniu jak najlepszego wykorzystania złoża oraz opłacalności wydobycia. Wykonanie analiz wariantowych realizowane jest najczęściej poprzez wykorzystanie procedur numerycznych, które umożliwiają wykonywanie serii obliczeń dla tego samego układu równań ze zmianą wybranych parametrów.

Celem pracy było opracowanie metody pozwalającej na automatyczną realizację procedury wykonywania analizy wariantowej dla zagadnienia oddziaływania eksploatacji podziemnej na budynek. Metoda powyższa oparta została na zastosowaniu zewnętrznych procedur programistycznych współpracujących z solverem pakietu Abaqus. W pracy wykonywano analizy wariantowe dla dwóch zmiennych parametrów: prędkości eksploatacji oraz kąta pomiędzy osiami głównymi budynku a osią podłużną parceli eksploatacyjnej (ściany). W ogólności wybór parametru uzależniony jest od postawionego zagadnienia badawczego; prowadzi on do rozważenia wpływu wartości danego parametru na wielkość i rodzaj oddziaływań generowanych przez roboty górnicze w odniesieniu do analizowanego obiektu (lub powierzchni terenu).

Realizacja tego typu obliczeń wymaga dysponowania odpowiednią infrastrukturą obliczeniową: maszynami liczącymi o właściwych zasobach oraz oprogramowaniem. Z uwagi na fakt, że analizy zagadnień oddziaływania eksploatacji podziemnej na zabudowę powierzchni terenu należą do problemów złożonych i wymagających zastosowania zaawansowanych narzędzi obliczeniowych [Florkowska, 2010], do wykonania analiz wariantowych wykorzystano zasoby krajowej infrastruktury informatycznej udostępnianej dla celów naukowych w ramach projektu PL-Grid.



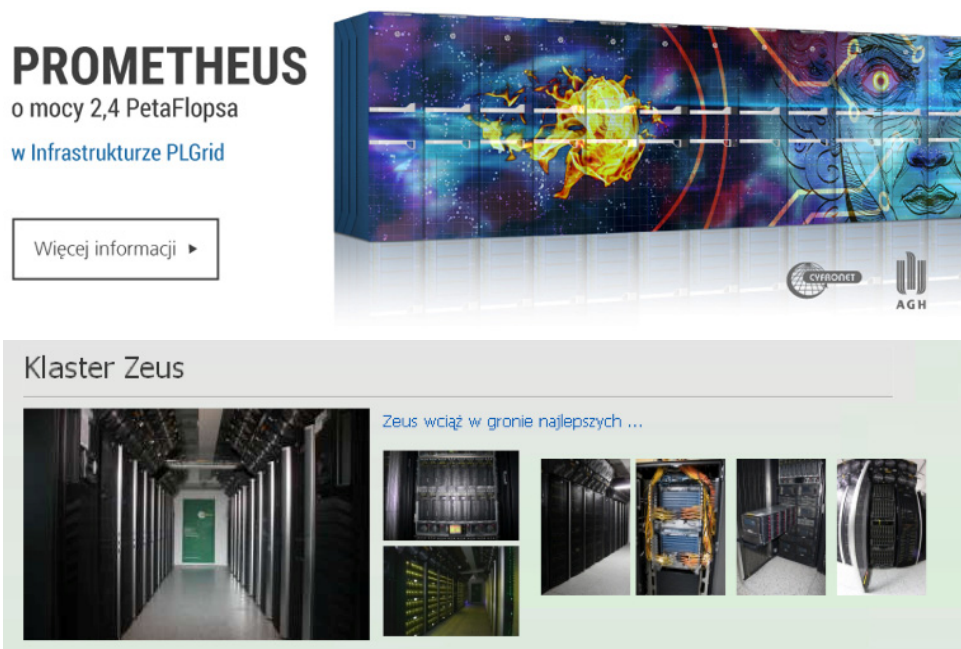
Rys. 1. Witryna projektu PL-Grid [1]

2. Infrastruktura informatyczna na potrzeby nauki

Modelowanie matematyczne złożonych problemów mechaniki (do których należą także zagadnienia oddziaływania eksploatacji górniczej na zabudowę) prowadzone jest najczęściej za pomocą zaawansowanych programów wykorzystujących metody numeryczne. Są to techniki, które wymagają odpowiedniej infrastruktury sprzętowej. Modelowanie z użyciem pakietu Abaqus – to długotrwałe obliczenia zajmujące duże ilości pamięci oraz wymagające potężnej mocy obliczeniowej.

Dla potrzeb nauki został stworzony specjalny projekt o nazwie PL-Grid (Rys. 1), który wspiera wszelkie badania naukowe intensywnie wykorzystujące techniki komputerowe [1]. Szczególnie, gdy te badania wymagają bardzo długich obliczeń, w takich dziedzinach jak: chemia, fizyka, biologia molekularna albo różnego rodzaju modelowanie i symulacje oraz obliczenia inżynierskie.

PL-Grid posiada formę konsorcjum, w skład którego wchodzi duże ośrodki akademickie dysponujące komputerami o dużej mocy obliczeniowej. W ramach tego projektu ośrodek AGH Cyfronet udostępnia komputery dużej mocy obliczeniowej (Rys. 2) (KDM): Zeus i Prometheus. Prometheus jest klastrem, który według prowadzonej klasyfikacji znajduje się w pierwszej pięćdziesiątce na liście top500 superkomputerów na świecie [2].



Rys. 2. Komputery dużej mocy: Prometheus i Zeus w AGH Cyfronet [2]

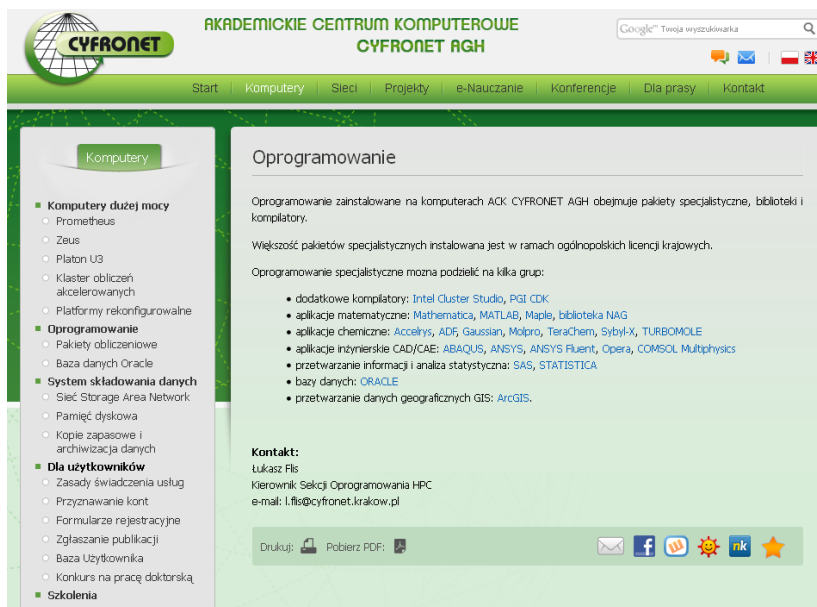
Rys. 3. Zakładanie konta w systemie PL-Grid [1]

Aby móc wykonywać obliczenia na tych komputerach należy założyć konto w systemie PL-Grid. Założenie konta odbywa się drogą elektroniczną (Rys. 3). Dla pracowników naukowych procedura identyfikacji odbywa się poprzez identyfikator z bazy OPI.

Otrzymanie konta użytkownika PL-Grid umożliwia wykorzystanie dostępnej infrastruktury w zakresie pozwalającym na wykonanie badań wstępnych i przetestowanie procedur w ramach tzw. grantu osobistego. Wykonywanie obliczeń potrzebujących większych zasobów wymaga uzyskania tzw. właściwego grantu obliczeniowego. Projekt tego typu grantu, zawierający tytuł i opis planowanych badań oraz wnioskowane zasoby przesyłany jest drogą elektroniczną. Podlega następnie procesowi oceny i weryfikacji. Przyznanie grantu właściwego oznacza możliwość prowadzenia obliczeń z wykorzystaniem zasobów, zgodnie z wnioskowanym/przyznanym przydziałem.

2.1. Oprogramowanie do obliczeń naukowych

Efektywne wykonywanie obliczeń wymaga dysponowania nie tylko odpowiednimi zasobami sprzętowymi ale również programistycznymi. W systemie PL-Grid jest do dyspozycji bogaty zestaw programów do wykorzystania w badaniach naukowych (Rys. 4). Są to między innymi: kompilatory, biblioteki oraz pakiety specjalistyczne [Fluent, Ansys, Abaqus, Gaussian, Mathematica, Statistica i inne].



Rys. 4. Oprogramowanie dostępne w ramach PL-Grid [2]

W pracy wykorzystano oprogramowanie FEA Abaqus w zakresie solvera Abaqus Standard z rozszerzeniem jego możliwości poprzez dołączenie podprogramu typu User's Subroutine. Przygotowane pliki typu *input*, zawierające zapis modelu numerycznego w kodach Abaqusa oraz pliki podprogramów w języku Fortran, tworzą komplet danych wejściowych do obliczeń realizowanych przez solver. Sposób uruchomienia obliczeń, zapisany w postaci pliku skryptowego, wstawiany jest do systemu kolejkowego, gdzie oczekuje na przydział wymaganych zasobów.

2.2. Kolejkowy system zadań na klastrach

Zadania na komputerach dużej mocy wykonywane są w systemie kolejkowym. Kolejki zróżnicowane są w zależności od zapotrzebowania na zasoby i czas obliczeń. Na klastrze Zeus, z zasobów którego korzystano w niniejszych badaniach, funkcjonują cztery kolejki:

- test
- short
- long
- exclusive

Zadania wykonuje się wstawiając do odpowiedniej kolejki. Do umieszczania zadań w kolejce służą skrypty kolejkowe, albo aplikacje wspomagające uruchamianie i śledzenie zadań, dostępne w ramach systemu PL-Grid. Złożone zadania, wykorzystujące procedury użytkownika ze zmiennymi wartościami parametrów, wymagają odpowiednich skryptów programistycznych umożliwiających ich realizację z zachowaniem wymaganych procedur. Tego typu skrypt opracowano w celu wykonania serii analiz wariantowych opartych na modelu numerycznym zbudowanym z zastosowaniem pre-procesora Abaqus CAE oraz dodatkowych narzędzi programistycznych.

3. Analizy wariantowe

Analizy wariantowe w zagadnieniach oddziaływania eksploatacji podziemnej na zabudowę prowadzone są w celu określenia wpływu warunków prowadzenia robót górniczych oraz warunków

lokalizacji obiektu na stan obiektu budowlanego. Dla przeprowadzenia tego typu analiz konieczne jest wykonanie serii obliczeń symulujących zachowanie badanego obiektu w różnych kombinacjach warunków lokalizacyjnych i górniczych. Warunki te zadawane były za pomocą zewnętrznego podprogramu typu DISP [Abaqus User Manual, 1998] współpracującego z modułem obliczeniowym pakietu FEA Abaqus [Florkowska, 2010].

3.1. Algorytm realizujący analizę wielowariantową

Zadaniem wynikającym z tematu realizowanych prac było przygotowanie programu (skryptu), który wielokrotnie uruchamia symulację w systemie Abaqus, wykorzystując moduł użytkownika (DISP), z różnymi wartościami parametrów: prędkości eksploatacji oraz kąta pomiędzy osiami głównymi obiektu i kierunkiem eksploatacji. Do realizacji tego zagadnienia zastosowany został język skryptowy powłoki (bash) [3], edytor strumieniowy (sed) [4] oraz polecenia powłoki systemu Linux.

Wykorzystując fakt, że własne procedury użytkownika można dołączać w postaci źródłowej, opracowano program (Rys. 5), który podstawia zadawane wartości wybranych parametrów we wcześniej przygotowanym module źródłowym procedury użytkownika. W ten sposób tworzone są w kolejnych krokach pętli – warianty obliczeniowe. Uproszczony schemat blokowy algorytmu programu przedstawiony został na rysunku 6.

Program został uzupełniony o szeroką diagnostykę błędów i nieoczekiwanych zdarzeń.

```
for (( ki=1; ki<${kLen}; ki++)) # petla po kacie
# wybranie i przeliczenie kata ze stopni na radiany
do
#   generowanie instrukcji edycji dla kata
Edit_K=s/KAT=-0\ .25.PI/KAT=${KAT[$ki]}\ /180*PI/

for (( vi=1; vi<${vLen}; vi++ )) # petla po predkosci
#   wybranie i przeliczenie predkosci z [m/doba] na [m/s]
do
#   generowanie instrukcji edycji dla predkosci
Edit_V=s/V=2\ .66E-05/V=${V[$vi]}\ /"${s_Doba}/

#   ustalenie przyrostka dla nazw plikow na podstawie parametrow
suffix="_K_${KAT[$ki]}_V_${V[$vi]}"
echo >> $out ; echo "Parametry: kat=${KAT[$ki]} v=${V[$vi]}" >> $out

#   wygenerowanie podprogramu z odpowiednimi parametrami (predkosc kat)
SUBnew="DISP${suffix}.f"
cat ${sub} | sed "$Edit_V; $Edit_K" > ${SUBnew}

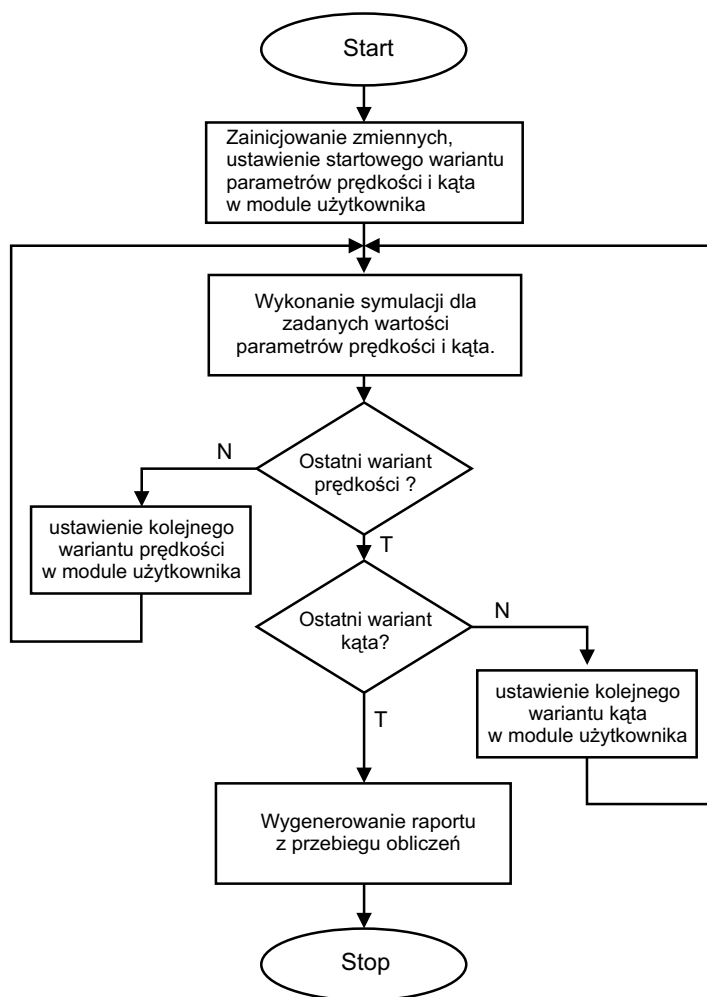
echo >> $log ; echo "Pliki wejsciowe: DISP"${suffix} ".f, "$inp >> $log
echo "-----" >> $log
day=`date +%F` ; time=`date +%T`
echo "Start obliczen: " $day" "$time >> $log
# Start obliczen symulacyjnych
# =====
job=abaqus${suffix}
abaqus job=${job} input=$inp user=${SUBnew} cpus=$np interactive>>$out
# =====
day=`date +%F` ; time=`date +%T`
echo "Koniec obliczen: " $day" "$time >> $log

fn="${job}.dat"
if ! [ -e $fn ] ; then echo "Brak pliku raportu: $fn" >>$log ; exit ; fi
err=`egrep FATAL\ ERROR $fn | wc -l`
ierr=`expr $err + 0`
if [ $ierr != 0 ] ; then echo "Koniec - zdarzenie: FATAL ERROR" >> $log ; exit ; fi
zdarzenie FATAL ERROR przerywa dalsze obliczenia

if ! [ -e $out ] ; then echo "Brak pliku _interactive_: $out" >>$log ; exit ; fi
err=`egrep Abaqus\ Error $out | wc -l`
ierr=`expr $err + 0`
if [ $ierr != 0 ] ; then echo "Koniec - zdarzenie: Abaqus Error" >> $log ; exit ; fi
zdarzenie - Abaqus Error - przerywa dalsze obliczenia

done # {vi}
done # {ki}
```

Rys. 5. Fragment programu realizującego założenia algorytmu



Rys. 6. Uproszczony schemat blokowy algorytmu programu

3.2. Funkcje programu

Podstawowe funkcje opracowanego programu:

1. Program generuje pliki źródłowe, nadając im nazwy zgodne z wartościami parametrów.
2. Ustala nazwy plików wynikowych dla kolejnego wariantu.
3. Uruchamia obliczenia i sprawdza poprawność ich zakończenia po każdym wariantcie.
4. Przechodzi do kolejnego wariantu, jeśli nie napotkano błędu.
5. Sygnalizuje wystąpienie zdarzeń niepożądanych.
6. Tworzy pliki raportu z przebiegu procesu obliczeń.
7. Dodaje informacje, zawierające czas startu i zakończenia obliczeń, dla wariantu.

Opracowany w powyższy sposób program umożliwia pełną automatyzację obliczeń wariantowych. Próba ręcznego rozwiązania zagadnienia wymagałaby znacznego nakładu pracy związanego z generowaniem wielu wariantów tekstu źródłowego (w ilości odpowiadającej liczbie kombinacji), co wiązałoby z:

- dużą pracochłonnością,
- łatwością popełnienia pomyłek,
- mieszaniami nazw plików wariantów,
- koniecznością oczekiwania w kolejce na ponowne uruchomienie w przypadku pomyłki.

Dzięki zastosowaniu opracowanego programu możliwe jest przeprowadzenie całej serii obliczeń wariantowych, ze zmianami badanych parametrów, w postaci jednego zadania obliczeniowego. Wyniki obliczeń zapisywane są w postaci plików z nazwami zawierającymi stosowne symbole, identyfikujące zawartość pliku według wartości parametrów.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metodę realizacji analizy wariantowej, opartą na zastosowaniu zewnętrznych procedur programistycznych powiązanych z solverem pakietu FEA Abaqus, opracowaną dla zagadnień wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane. Analizy tego rodzaju wykonywane są dla potrzeb profilaktyki górniczej i budowlanej mającej na celu minimalizację niekorzystnego oddziaływania robót górniczych.

Opracowana metoda oparta została na:

- sformułowaniu modelu numerycznego zagadnienia przy zastosowaniu preprocesora Abaqusa oraz odpowiedniego podprogramu,
- wykorzystaniu infrastruktury informatycznej PL-Grid,
- specjalnie napisanym programie w języku skryptowym powłoki (bash).

Główny element metody stanowi, opisany w podrozdziale 3 program, pozwalający na automatyczną realizację obliczeń wielowariantowych w środowisku linuxowym klastrów infrastruktury PL-Grid. Dzięki zastosowaniu opracowanego programu analiza wielowariantowa sprowadzona zostaje do jednego zadania obliczeniowego, co powoduje znaczne ograniczenie nakładu pracy na etapie przygotowywania plików danych wejściowych oraz skrócenie czasu oczekiwania w systemie kolejkowym, a także ułatwia wczesne wychwytywanie błędów oraz porządkowanie plików wynikowych.

Artykuł ten jest wstępnym opisem prowadzonych badań. Wyniki wielowariantowych analiz zostaną przedstawione w późniejszych wydaniach czasopisma.

Prace zrealizowane w ramach badań statutowych IMG PAN za rok 2016 z wykorzystaniem infrastruktury PL-Grid.

Literatura

- ABAQUS / Standard User's Manual 1998: Vol I, II, III. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- Cygan J., Florkowska L., Leśniak J., Walaszczyk J. 2007: *Wpływ podziemnej eksploatacji górniczej na grupę budynków. Modelowanie fizyczne i numeryczne 2D*. Prace IMG PAN, Tom 9, Nr 1-4, s. 183-197.
- Cygan J., Florkowska L. 2016: *Rozwój metod prognozowania górniczych deformacji terenu*. Część 1. Prace IMG PAN, Tom 18, Nr 2, s. 53-61.
- Florkowska L. 2010: *Zastosowanie numerycznej mechaniki nieliniowej w zagadnieniach ochrony budynków na terenach górniczych*. Archives of Mining Sciences. Monografia. Nr 11. Kraków.
- Florkowska L., Walaszczyk J., Maj A., Cygan J., 2013: *Istotne problemy modelowania numerycznego oddziaływania eksploatacji podziemnej na obiekty budowlane*. Prace IMG PAN, Tom 15, Nr 3-4, s. 89-94.

Wykorzystane strony internetowe:

- [1] <http://www.plgrid.pl/>
- [2] <http://www.cyfronet.krakow.pl/komputery/15207,artykul,prometheus.html>
- [3] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Bash>
- [4] <http://www.continuum.com.pl/index.php/unixlinux/sed-edytorkompieniowy.html>
- [5] <https://software.intel.com/en-us/fortran-compilers>

An introduction to the application of external subroutines working with the Abaqus solver in what-if analysis of mining damage prevention

Abstract

Prevention of the negative influence of mining on the ground surface, building development and infrastructure is based on proper forecasting of its impact on the environment. Among the scientific forecasting methods are classic, time-tested theories, as well as modern computational methods taking advantage of the research using numerical simulations. Constant changes in mining conditions operations, especially the increasingly difficult geological conditions, require constant improvement of the methods of forecasting.

The use of any results of mining impact forecasts on the environment for the purpose of injury prevention is often associated with the implementation of so called what-if analyzes, in order to determine the optimal method

of exploitation. This is especially important when planning and conducting extraction works so that their impact on the environment is minimal. A what-if analyse can also be used as an element of building prevention, among other things when selecting a location and orientation of an object on the building lot.

The article presents a tool that – by automating the calculation of the work packages – allows conducting multivariate numerical analysis covering the issue of the impact of underground mining on the building structures. The tool presented in the paper is dedicated to working with FEA Abaqus compiler solver, which is an advanced tool for modeling complex mechanical problems. As a result of the work carried out, the calculation process was automated for multivariate analysis using user procedures. The scripting language, stream editor, and shell commands were used to complete the task. The resulting procedures will serve to improve and streamline the process of modeling the impact of mining on the building structures located above the mining area.

Keywords: what-if analyses, mining damage, mining, underground mining, mining damage prevention, computer modelling in FEA Abaqus