

**I Krajowa Konferencja Naukowa**  
**Szybkie prototypowanie**  
**Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary**  
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA  
RAPIDROM

## Prototypowanie przekładni zębatych w środowisku MES z wykorzystaniem skryptów programu ABAQUS

### Prototyping toothed gears in FEM environment with the use of scripts of ABAQUS program

PAWEŁ FUDALI  
 JACEK PACANA\*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.559

W pracy zostały przedstawione metody tworzenia oraz wykorzystania wykonywalnych skryptów w programie ABAQUS w celu zautomatyzowania przeprowadzania analiz przekładni zębatych z wykorzystaniem MES. Dla poszczególnych etapów analizy został opracowany graficzny interfejs, dzięki któremu obsługa skryptów staje się bardziej intuicyjna.

**SŁOWA KLUCZOWE:** MES, przekładnie zębate, ABAQUS

*The paper presents methods of creating and using executable scripts in ABAQUS program to automate the analysis of toothed gears using FEM. For the different stages of analysis there has been developed graphical user interface thanks to which scripts operating becomes more intuitive.*

**KEYWORDS:** FEM, toothed gears, ABAQUS

#### 1. Wprowadzenie

Projektowanie urządzeń mechanicznych często jest realizowane za pomocą komputerowych programów obliczeniowych, wśród których dużym zainteresowaniem cieszy się metoda elementów skończonych (MES). Obliczenia numeryczne konstrukcji z zastosowaniem MES są często bardzo skomplikowane oraz czasochłonne. Użytkownik musi przeprowadzić wiele czynności przygotowawczych do obliczeń, tzw. 'preprocessing', jak również przeprowadzić obróbkę i analizę wyników, tzw. 'postprocessing'. W przypadku analizy przekładni zębatych dla każdego modelu trzeba za każdym razem definiować warunki brzegowe, obciążenia czy definiować materiały. Podobnie w przypadku analizy wyników symulacji. Tworzenie wykresów, generowanie suma-

rycznych nacisków czy śladu współpracy jest procesem długotrwałym. Wiele z tych czynności można skrócić wykorzystując automatyzację procesu analizy numerycznej. W celu osiągnięcia tego zadania została opracowana aplikacja rozszerzająca możliwości programu ABAQUS.

#### ■ 1.1. Aplikacja do analizy przekładni

W ramach prac badawczych została opracowana wtyczka programowa do przeprowadzania analiz współpracy kół zębatych. Wtyczka została podzielona na dwa podprogramy, jeden o nazwie przygotowanie\_obliczen, służy jako pomoc w procesie tworzenia obliczeń, drugi natomiast: wyniki\_obliczen jest pomocny w przetwarzaniu otrzymanych wyników i ułatwia szybką i czytelną prezentację wybranych wyników symulacji z zakresu: stanu naprężeń, nacisków powierzchniowych, śladu styku, wykresu nierównomierności ruchu. Wtyczka jest zbiorem kilkunastu plików tekstowych z rozszerzeniem py w których zapisane są instrukcje w języku Python.

Obliczenia numeryczne przekładni zębatych w programie ABAQUS, przeprowadza się z wykorzystaniem modeli zaimportowanych do niego, a przygotowanych w innym dowolnym programie CAD. Przygotowanie obliczeń składa się z kilku rutynowych niezbędnych czynności podstawowych, jak definiowanie warunków brzegowych, lecz także wielu działań pomocniczych, które należy wykonać dla każdego zaimportowanego modelu jak np. ustawianie modeli, podział powierzchni itp. [4, 5, 7]. Czynności dodatkowe znacznie wydłużają czas przygotowawczy obliczeń, a duża ich ilość może spowodować wystąpienie pomyłek. Zautomatyzowanie tego procesu pozwoli zachować te same ustawienia dla wielu wariantów przeprowadzanych obliczeń i znacząco skróci ich czas. W programie ABAQUS obejmuje zwykle następujące krok podstawowe:

- zaimportowanie modelu,

\* Mgr inż. Paweł Fudali (pfudali@prz.edu.pl), dr inż. Jacek Pacana (pacanaj@prz.edu.pl) – Katedra Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej

- zdefiniowanie własności materiałowych oraz przypisanie ich do poszczególnych modeli,
- zdefiniowanie obciążeń oraz utwierdzeń,
- utworzenie siatki elementów skończonych,
- określenie parametrów symulacji,
- zdefiniowanie warunków kontaktu między elementami.

Aby te kroki zautomatyzować można użyć specjalnie przygotowanego podprogramu w formie wtyczki w preprocesorze programu ABAQUS. Podprogram ten obejmuje powyższe czynności i krok po kroku przeprowadza użytkownika przez proces przygotowania obliczeń.

Uruchomienie wtyczki jest możliwe poprzez wybranie opcji przekładnia-przygotowanie obliczeń z menu głównego programu w zakładce Plug-ins. Po uruchomieniu aplikacji zostaje wyświetlone okno (rys.1.1), w którym użytkownik może wykonywać poszczególne etapy przygotowania modelu do obliczeń. Etapy te powinny być uruchamiane w kolejności, w jakiej zostały zdefiniowane. Wszystkie operacje wykonywane w przedstawionej wtyczce można według własnych potrzeb zmieniać, są one dostępne na drzewie operacji.



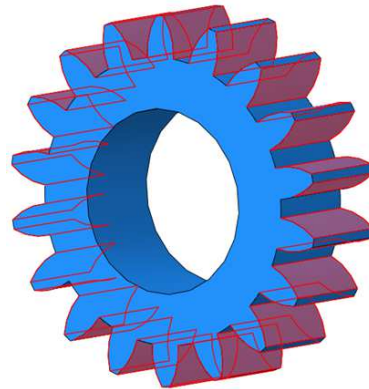
Rys. 1.1. Główne okno programu do przygotowywania obliczeń

Każdy etap przygotowania modelu wyszczególniony w oknie głównym podczas uruchomienia wyświetla odpowiednie okienko służące wprowadzeniu parametrów lub wskazaniu obiektów.

## ■ 1.2. Ograniczenia aplikacji

Ze względu na fakt, że modele są importowane do programu Abaqus z zewnątrz, istnieje konieczność wskazania powierzchni współpracy (kontakt), powierzchni do zagęszczenia siatki (rys.1.2.), osi obrotu kół, czy powierzchni wewnętrznych piast. Wszystkie te elementy muszą być podane z wskazaniem z użyciem narzędzi dostępnych graficznym interfejsie użytkownika (GUI) programu Abaqus. Receptą na wyeliminowanie tych kroków jest stworzenie generatora kół zębatych wewnątrz programu Abaqus, oraz narzucenia mu

odpowiednich nazw na konkretne elementy, tak aby podczas wykonywania skryptów dostęp do powierzchni odbywał się bez zaznaczania powierzchni.

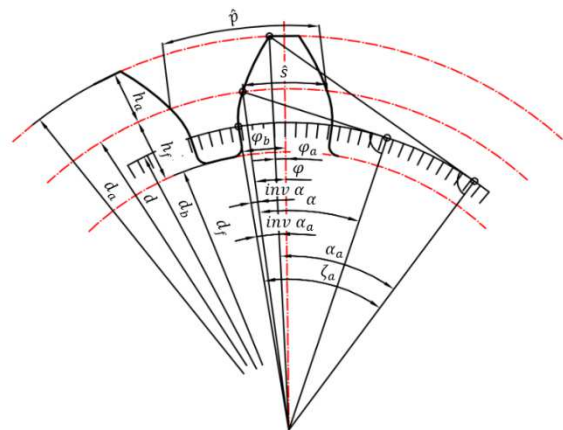


Rys. 1.2. Model koła zębatego wraz z zaznaczonymi powierzchniami do zagęszczenia siatki mesh

Dodatkowym ważnym atutem generatora kół wewnątrz programu Abaqus jest łatwość używania. Podanie podstawowych parametrów koła (takich jak wartość modułu, liczbę zębów zębnika i koła zębatego) pozwala automatycznie stworzyć modele kół, ułożyć je w pozycji pracy. Nie ma potrzeby za każdym razem w celu zmiany któregoś z parametrów koła do zmiany go programie CAD, eksportu do formatu odczytanego przez Abaqus, definiowania wszystkich elementów analizy od początku.

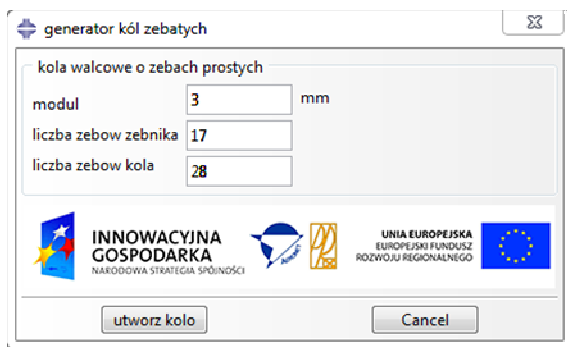
## 2. Generator kół zębatych ewolwentowych

W ząbieniu ewolwentowym zarysy boków współpracujących zębów są utworzone przez odtaczanie linii prostej po kole zasadniczym. Oznacza to, że zarysy boków współpracujących zębów są utworzone przez to samo koło odtaczające (o promieniu  $\rho = \infty$ ), a więc mają one wspólną normalną w punkcie ich styku. Geometria koła walcowego o zarysie ewolwentowym została pokazana na rys 2.1.

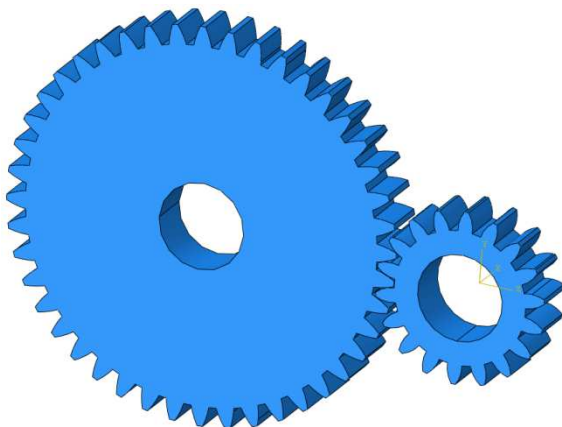


Rys. 2.1. Geometria koła walcowego o zarysie ewolwentowym

W celu automatycznego stworzenia modelu przekładni w środowisku Abaqus, został napisany skrypt, który rysuje geometrię kół na podstawie podstawowych parametrów zdefiniowanych przez użytkownika[6]. Dodatkowo zostało stworzone okienko, które ułatwia korzystanie ze skryptu, a które przechwytuje parametry takie jak moduł czy liczbę zębów. Okienko generatora zostało pokazane na rys 2.2. Użycie przycisku 'utwórzkoło' powoduje narysowanie przekładni, która pokazano na rys 2.3.



Rys. 2.2. Okienka generatora kół zębatach walcowych o zębatach prostych



Rys. 2.3. Efekt pracy generatora kół zębatach

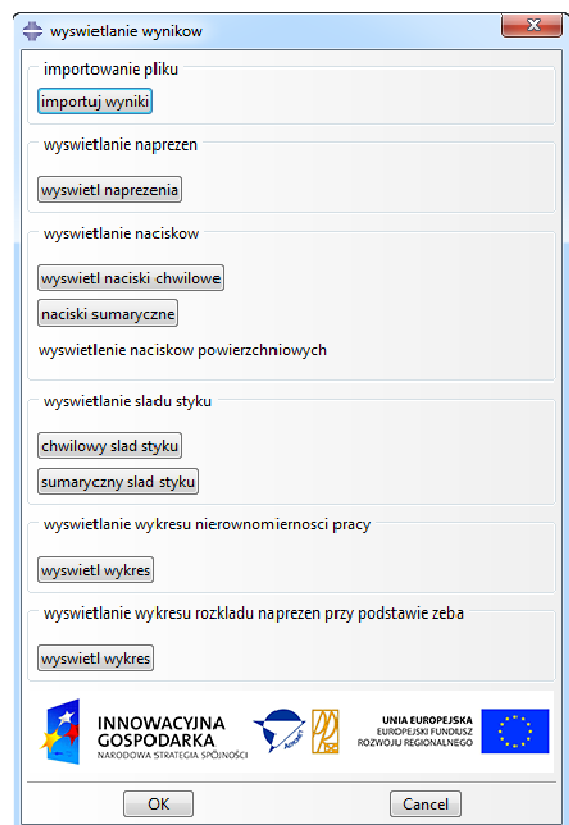
Użycie generatora kół zębatach tworzy model przekładni w środowisku abaqus (rys 2.3.), wszystkie parametry rysunku są modyfikowalne na każdym etapie przygotowywania analizy, odpowiednim powierzchniom jak np. bok zęba nadane zostały nazwy, co znacznie ułatwia definiowanie kontaktu, obciążeń czy utwierdzeń. Tak stworzony model może być użyty do przeprowadzania analiz z użyciem aplikacji przedstawionej w rozdziale 1.

### 3. Wyświetlanie wyników

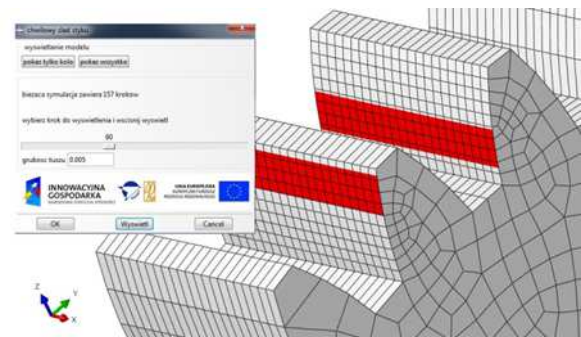
W celu przeprowadzenia analizy i prezentacji wyników przeprowadzonych obliczeń dotyczących przekładni zębataj został stworzony drugi podprogram. Jest on dostępny poprzez wybranie opcji 'przekładnia-wyniki obliczeń' z menu górnego Plug-ins. Po wybraniu polecenia pojawia się główne okno rys. 3.1. Wtyczka ta umożliwia: wczytanie pliku z obliczeniami, generowanie stanu naprężeń i nacisków dla każdego kroku, generowanie sumarycznego stanu nacisków, wyznaczanie chwilowego śladu styku (rys 3.2), wyznaczanie sumarycznego śladu współpracy, generowanie wykresu nierównomierności ruchu przekładni (rys. 3.4) oraz rozkładu naprężeń u podstawy zęba(rys 3.3) .

Wyświetlenie chwilowych naprężeń, nacisków czy śladu styku jest czynnością, którą stosunkowo łatwo można wykonać korzystając z graficznego interfejsu programu. Jeżeli zaś chodzi o sumaryczne naciski i sumaryczny ślad współpracy sytuacja się komplikuje. W przedstawionej aplikacji zastosowano następujący algorytm: przeanalizowano wszystkie wartości dla każdej chwili czasowej i w przypadku sumarycznych nacisków została zapamiętana największa wartość nacisków (w przypadku sumarycznego śladu najmniejszą wartość parametru COPEN) dla każdego z węzłów boków zębów, a następnie te zapamiętane wartości zostały nałożone na model koła zębatach. W przypadku śladu

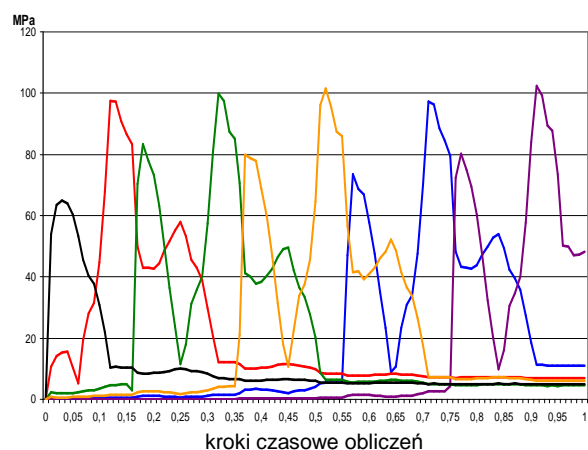
współpracy wartość grubości tuszu oznacza, że na czerwono zostają oznaczone miejsca, gdzie odległość zębniaka od koła zębatach jest mniejsza niż założona wartość.



Rys. 3.1. Główne okno programu do wyświetlania wyników



Rys. 3.2. Chwilowy ślad współpracy

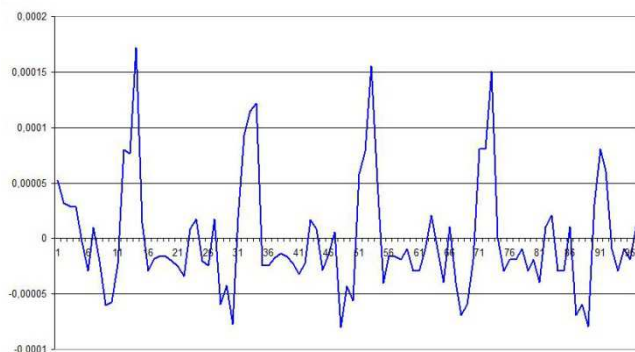


Rys. 3.3. Rozkład naprężeń u podstawy zęba

Wykres nierównomierności pracy przekładni został opracowany na podstawie zależności (1) [2] i dla badanego przykładu z wykorzystaniem wtyczki został pokazany na rys. 3.4.

$$\Delta\varphi^{(2)}(\varphi^{(1)}) = \varphi^{(2)}(\varphi^{(1)}) - \frac{z_1}{z_2}\varphi^{(1)} \quad (1)$$

gdzie:  $\varphi^{(1)}$  – kąt obrotu zębniaka,  $\varphi^{(2)}$  – kąt obrotu koła,  $z_1$  – liczba zębów zębniaka,  $z_2$  – liczba zębów koła.



Rys. 3.4. Rozkład naprężeń u podstawy zęba

#### 4. Podsumowanie

Wykorzystanie skryptów w programie ABAQUS znacznie ułatwia i przyspiesza pracę dla powtarzających się czynności. Z drugiej strony pozwala uzyskać wyniki, których nie da się wyświetlić korzystając z narzędzi dostępnych w interfejsie programu. Nakład pracy włożony w przygotowanie skryptu jest rekompensowany prostotą i użytecznością stworzonej wtyczki. Wyznaczone właściwości przekładni pozwalają ocenić poprawność jej pracy oraz zmniejszyć ilość testów na rzeczywistym modelu podczas jej projektowania.

#### Podziękowanie

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

#### LITERATURA

- [1]. ABAQUS - Podręcznik użytkownika.
- [2]. Marciniak A. „Synteza i analiza ząbów przekładni stożkowych o kołowo-tokowej linii zęba”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2002.
- [3]. Puri, G. M. „Python scripts for Abaqus : learn by example”.
- [4]. Pacana J. „Development of Bevel Gear Motion Transmission Graphs with FEM”, *Key Engineering Materials Vol. 490* (2012), Trans Tech Publications. Switzerland 2012, str. 83-89.
- [5]. Budzik G., Kozik B. Pacana J: „Defining influence of load conditions on distribution and value of stresses in dual-power-path gear wheels applying FEM”. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal 85/6* (2013) 453-459, pages 453-459.
- [6]. Pacana J., Budzik G., Kudasik T. „Wyznaczanie naprężeń zginających wkołach zębatych z zastosowaniem metody elementów skończonych”. *Acta Mechanica Slovaca 3-A/2008*, PRO-TECH-MA Ročník 12, Kosiče 2008r.
- [7]. Markowski T., Budzik G., Pacana J. „Kryteria doboru modelu numerycznego do obliczeń wytrzymałościowych walcowej przekładni zę-

batej metodą MES”. *Modelowanie Inżynierskie* 39, s. 135-142, Gliwice 2010.