

# WIELOWARIANTOWA ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA RAMY NOŚNEJ MASZyny NA PRZYKŁADZIE AGREGATU UPRAWOWO- SIEWNEGO Z MECHATRONICZNYM UKŁADEM STEROWANIA WYSIEWEM

Streszczenie

W artykule przedstawiono model obliczeniowy oraz przebieg obliczeń wytrzymałościowych agregatu uprawowo-siewnego. Obliczenia pozwoliły na weryfikację przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. Zidentyfikowano stan wyężenia konstrukcji dla przyjętych warunków eksploatacji, ze szczególnym uwzględnieniem newralgicznych węzłów konstrukcji (połączenia spawane, miejsca połączeń zespołów z konstrukcją nośną). Wyniki obliczeń pozwoliły na wyznaczenie wartości średnich oraz naprężeń amplitudowych, które naniesiono na wykres Smitha dla stali S355.

**Słowa kluczowe:** agregat uprawowo-siewny, konstrukcja, analiza wytrzymałości, wykres Smitha

## Wstęp

Wykorzystanie systemu komputerowego do analiz inżynierskich w branży maszyn rolniczych powoduje istotne zmiany w metodach prac konstrukcyjno-technologicznych, dokonujące się w następstwie rozwoju komputerowych systemów wspomagania projektowania i wytwarzania. Umożliwiają one przeprowadzenie efektywnych symulacji zachowań projektowanej maszyny, na podstawie modelu wirtualnego, już we wczesnych fazach projektowania [1].

Prowadzenie takich symulacji wymaga łączenia wiedzy z wielu dyscyplin naukowych w celu wykonania analiz warunków i zjawisk występujących podczas użytkowania symulowanej maszyny.

W artykule przedstawiono przebieg symulacji i obliczeń związanych z warunkami eksploatacji agregatu uprawowo-siewnego.

## Modelowanie konstrukcji

Badany agregat uprawowo-siewny (rys. 1), składa się z agregatu uprawowego i siewnika z mechatronicznym układem sterowania umożliwiającym zwiększenie prędkości roboczej i podwyższenie dokładności wysiewu. Agregat uprawowy składa się z wału przedniego strunowego, sekcji kultywatora i wału tylnego typu Packer [5]. Agregat uprawowy wraz z nabadowanym siewnikiem jest zawieszony na tylnym TUZ ciągnika.

W konstrukcji nośnej agregatów uprawowo-siewnych zastosowano różnego rodzaju blachy, profile kwadratowe i prostokątne wykonane ze stali S355. Model bryłowy agregatu uprawowo-siewnego opracowano w systemie komputerowym Solid Works [3].

Celem obliczeń komputerowych było przeprowadzenie analiz wytrzymałościowych agregatu uprawowo-siewnego w oparciu o metodę elementów skończonych (MES). Obliczenia obejmowały ramę nośną agregatu i siewnika, zbiornik siewnika i elementy mocujące narzędzia robocze. Obliczenia nie przeprowadzono dla narzędzi roboczych, ponieważ ze względu na duży stopień ich skomplikowania całościowa analiza byłaby utrudniona i czasochłonna. Zaistniała więc konieczność przeniesienia informacji o obciążeniach z narzędzi roboczych na model ramy nośnej maszyny.

Model obliczeniowy konstrukcji nośnej agregatu opracowano oraz obliczenia przeprowadzono w systemie komputerowym IDEAS NX 6.1. Bazuje on na teorii metody elementów skończonych.



Rys. 1. Model agregatu uprawowo-siewnego o szerokości roboczej 3,0 m [3]

Fig. 1. Model of tilling and sowing combined machine with working width of 3,0 m [3]



Rys. 2. Model agregatu uprawowo-siewnego zdyskretyzowany elementami płytowo-powłokowymi [3]

Fig. 2. Model of tilling and sowing combined machine digitized with plate and coat elements [3]

Model (rys. 2) opisany został za pomocą elementów płytowo-powłokowych czworokątnych i trójkątnych typu Thin shell, elementów belkowych typu Beam oraz elementów prętowych typu Rod [4]. Do opisanie ramy nośnej posłużono się elementami płytowo-powłokowymi. Pozostałe elementy

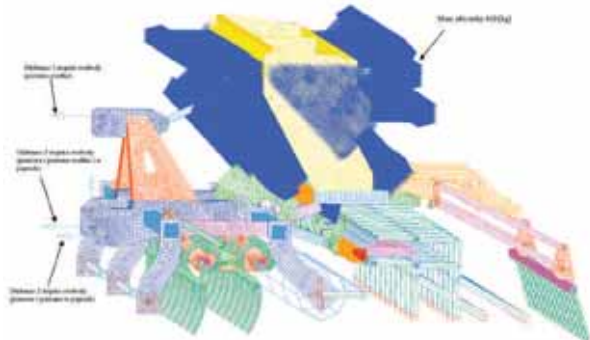
maszyny (siłowniki, sworznie, narzędzia robocze) zamodelowano w sposób uproszczony wykorzystując elementy belkowe lub prętowe.

### Określenie przypadków obciążeń i warunków brzegowych

W celu sprawdzenia wytrzymałości zmęczeniowej agregatu uprawowo-siewnego w różnych warunkach eksploatacji opracowano szereg przypadków obliczeniowych [3]:

- LC1 - transport po drogach, (nadwyżka dynamiczna 1.4),
- LC2 - transport z pochyleniem bocznym 8,5°, (nadwyżka dynamiczna 1.4),
- LC3 - transport z pochyleniem do tyłu 8,5°, (nadwyżka dynamiczna 1.4),
- LC4 - transport z pochyleniem do przodu 8,5°, (nadwyżka dynamiczna 1.4),
- LC5 - praca (nadwyżka dynamiczna 1.3 dla oporów roboczych).

Dla przypadków dotyczących transportu odwzorowano przypadki, w jakich rama nośna zostaje poddana obciążeniem pod wpływem masy własnej maszyny oraz od masy nasion w zbiorniku. Pierwsze cztery przypadki dotyczą transportowania agregatu w położeniu transportowym.



Rys. 3. Warunki brzegowe agregatu uprawowo-siewnego dla przypadku LC1-LC4 [3]

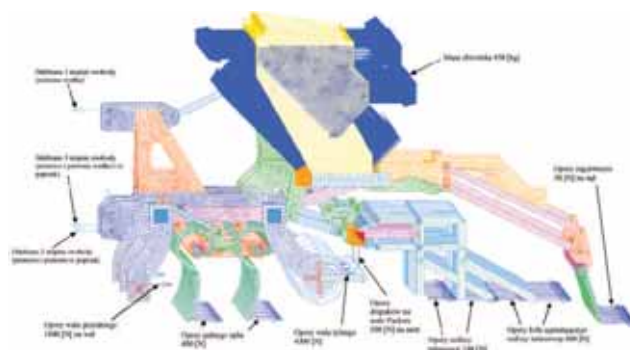
Fig. 3. Boundary conditions values of tilling and sowing combined machine for LC1-LC4 case [3]

Dla przypadków LC1-LC4, czyli dla transportu, odebrano przemieszczenia w trzech punktach na koźle zaczepowym (rys. 3): prawym dolnym końcu koźła zaczepowego odebrano przemieszczenia w trzech kierunkach (OX-OY-OZ), pozostawiając swobodne obroty, na drugim końcu odebrano przemieszczenia w dwóch kierunkach (OX-OZ), pozostawiając swobodne obroty i przemieszczenie agregatu w kierunku podłużnym. Na górnym łączniku koźła zaczepowego odebrano możliwość podłużnego przemieszczenia agregatu (OY). W tych przypadkach obciążenie zwiększono o współczynnik dynamiczny 1,4 (uwzględniający drgania i przeciążenia dynamiczne konstrukcji podczas eksploatacji w normalnych warunkach transportu) [3].

Piąty przypadek to praca agregatu uprawowo-siewnego. Zastosowano takie same warunki brzegowe jak dla przypadków transportowych. W przypadku LC5 zadano nadwyżkę dynamiczną 1.3 dla oporów roboczych agregatu i siewnika (rys. 4). Obciążenia robocze zostały przyjęte na podstawie [2].

Dla przypadków opisanych powyżej opracowano również takie, które wyznaczą naprężenia średnie dla badanej maszyny. Nazwano je obciążeniami pionowymi. Będą to przypadki bez nadwyżek dynamicznych, których uzyskane mapy naprężeń pozwolą wyznaczyć naprężenia średnie. Poniżej przedstawiono dwa przypadki tzw. obciążenia pionowe, które będą podstawą do analizy wytrzymałościowej przypadków z nadwyżką:

- LC01 - obciążenie pionowe - transport,
- LC02 - obciążenie pionowe - praca.



Rys. 4. Warunki brzegowe agregatu uprawowo-siewnego dla przypadku LC5 [3]

Fig. 4. Boundary conditions values of tilling and sowing combined machine for LC5 case [3]

Przypadek LC01 jest to obciążenie pionowe dla transportu po drogach, dla którego będą określone naprężenia średnie dla przypadków LC1-LC4. Naprężenia te pozwolą określić naprężenia amplitudowe dla takich przypadków jak: transport po drogach, pochylenie boczne 8,5°, pochylenie do przodu 8,5° i pochylenie do tyłu 8,5°. Warunki brzegowe dla takiego przypadku będą identyczne jak dla przypadków LC1-LC4, z tym że brak będzie nadwyżki dynamicznej.

Natomiast przypadek LC02 opisuje obciążenia pionowe wykorzystane do wyznaczenia naprężeń średnich dla przypadku LC5. Przypadek ten będzie podstawą do określenia naprężeń amplitudowych dla przypadku LC5 (praca). W przypadku tym nie uwzględnia się nadwyżki dynamicznej dla oporów roboczych agregatu.

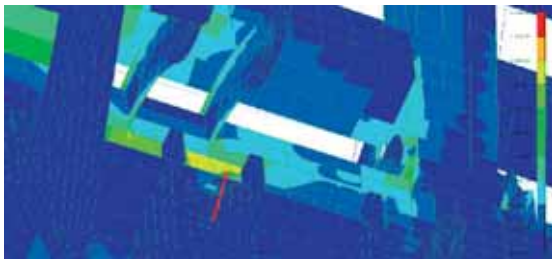
### Analiza wytrzymałościowa konstrukcji

Analiza wytrzymałościowa konstrukcji nośnej agregatu, została przeprowadzona dla warunków omówionych i przedstawionych wyżej. Przykładowe wyniki obliczeń w postaci rysunków map naprężeń przedstawiono na rys. 5-6 - dla przypadku transportu po drogach i na rys. 8-10 - dla przypadku pracy. Pierwotnie w analizowanej konstrukcji zidentyfikowano przekroczenie dopuszczalnych wartości naprężeń. Wprowadzono szereg zmian w celu zmniejszenia występujących koncentracji naprężeń przedstawionych w opracowaniu [3].

Największą wartość naprężeń dla wszystkich analizowanych przypadków konstrukcji zaobserwowano dla przypadku pracy (rys. 8). Podczas pracy uchwyt regulacji sekcji wysiewającej wyrywa się z belki nośnej sekcji wysiewającej powodując, że naprężenia w tym punkcie osiągają największą wartość koncentracji naprężeń w całej maszynie. Wartości odczytane w tym miejscu osiągają wartość 163 MPa. Większą ilość koncentracji naprężeń zlokalizowano w przypadku pracy niż zaobserwowano to w przypadkach transportowych. Wynikało to z charakteru obciążenia konstrukcji oporami roboczymi. Dodatkowo opory robocze zwiększono o 30%.

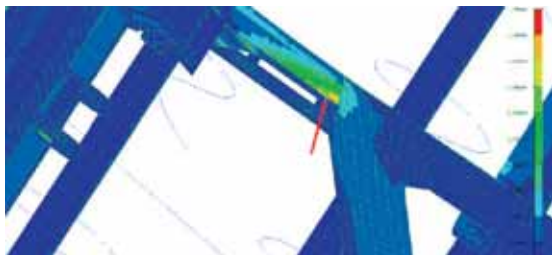
Duże naprężenia dla przypadku transportu zlokalizowano w podłużnicy agregatu (rys. 6). Podczas transportu maszyny cały ciężar przenoszony jest przez te elementy. Wartość naprężeń zlokalizowany w tym miejscu osiąga wartość 143 MPa.

Następnie przeprowadzono analizę zmęczeniową konstrukcji agregatu uprawowo-siewnego. Do przeprowadzenia analizy zmęczeniowej należy posiadać informację o poziomie naprężeń średnich oraz o charakterze zmian naprężeń zmiennych cyklicznie. Wartości średnie przyjęto jako wartości naprężeń uzyskanych dla przypadku obciążenia pionowego (przypadek LC01). Natomiast amplitudę naprężeń wyznaczono jako różnicę naprężeń dla przypadku transportu po drogach i przypadku obciążenia pionowego.



Rys. 5. Naprężenia zredukowane [Pa], przypadek LC1, widok na belkę nośną sekcji wysiewającej [3]

Fig. 5. Reduced stresses [Pa], LC1 case, view of the supporting beam of drill unit [3]



Rys. 6. Naprężenia zredukowane [Pa], przypadek LC1, widok z góry na podłużnicę agregatu [3]

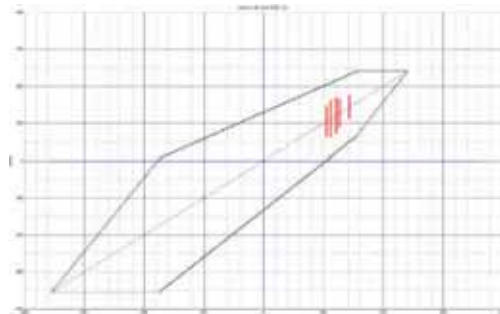
Fig. 6. Reduced stresses [Pa], LC1 case, overview of the longitudinal member of combined machine [3]

Na rys. 5-6 pokazano węzły (strzałki w kolorze czerwonym), w których odczytano maksymalne wartości naprężeń dla przypadku LC1. Wartości tych naprężeń zapisano w tab. 1, a następnie wyznaczono naprężenia amplitudowe dla miejsc, w których może wystąpić ograniczona wytrzymałość zmęczeniowa. Naprężenia zredukowane odczytano w każdym punkcie, dla górnej i dolnej warstwy elementów.

W tab. 1 zestawiono węzły dla przypadku LC1, dla których wyznaczono ograniczoną trwałość zmęczeniową. Sama tabela jest mało czytelna z racji tego, że nie pokazuje miejsc, dla których może wystąpić ograniczona trwałość zmęczeniowa. Wyniki w postaci graficznej pokazano na rys. 5-6. Na rysunkach tych przedstawiona skala pokazuje wartości naprężeń maksymalnych, jakie uzyskano dla przypadku LC1.

Sposób odczytania wyników z tab. 1 przedstawia się następująco: pozycja pierwsza - pola zaznaczone kolorem czerwonym - naprężenie średnie wynosi 112 MPa, a naprężenie amplitudowe plus 50 MPa (dla naprężenia maksymalnego) i minus 50 MPa (dla naprężenia minimalnego). Otrzymane wyniki wprowadzono do systemu Matlab, gdzie za pomocą własnego skryptu wygenerowano wykres Smitha.

Wyznaczone naprężenia amplitudowe i średnie przedstawione w tab. 1 naniesiono na wykresy Smitha dla stali S355 (rys. 7). Naprężenia maksymalne i minimalne nie przekraczają dopuszczalnych naprężeń dla przypadku transportu po drogach. Pola zaznaczone w tabeli kolorem czerwonym odpowiadają kolorom naprężeń amplitudowych, przedstawionych na wykresach Smitha.

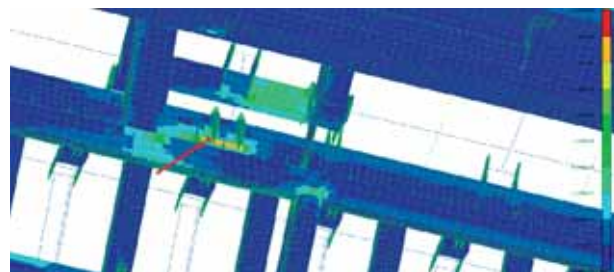


Rys. 7. Wykres Smitha dla stali S355, graficzne przedstawienie wyników największego naprężenia dla transportu po drogach [3]

Fig. 7. Smith graph for S355 steel, graphic illustration of the results of the biggest stress for transportation on the roads [3]

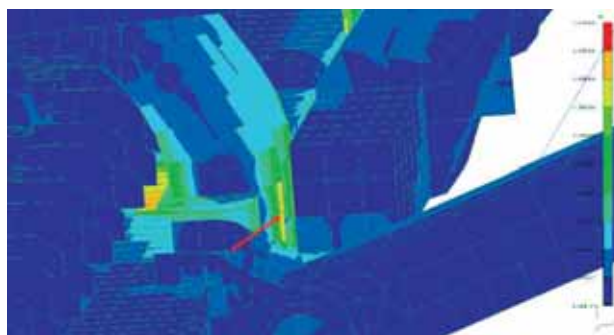
Analiza zmęczeniowa dla stanu „praca” (LC5) agregatu uprawowo-siewnego przedstawia się następująco. Na rys. 8-10 przedstawiono wyniki obliczeń w postaci rysunków map naprężeń. Podobnie jak w przypadku wcześniejszym, w tab. 2 zestawiono węzły, dla których wyznaczono ograniczoną trwałość zmęczeniową. Otrzymane wyniki przedstawiono graficznie na wykresie Smitha (rys. 11).

W opracowaniu [3] przedstawiono pozostałe przypadki dla agregatu uprawowo-siewnego.



Rys. 8 Naprężenia zredukowane [Pa], przypadek LC5, widok na belkę nośną sekcji wysiewającej [3]

Fig. 8. Reduced stresses [Pa], LC5 case, view of the supporting beam of sowing unit [3]



Rys. 9. Naprężenia zredukowane [Pa], przypadek LC5, widok na uchwyt belki regulacji [3]

Fig. 9. Reduced stresses [Pa], LC5 case, view of the control beam handle [3]

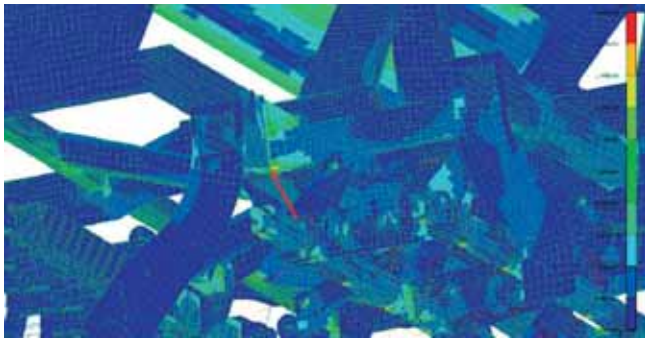
Tab. 1. Wykaz węzłów konstrukcji przeanalizowanych dla przypadku LC1 z wyznaczonymi naprężeniami amplitudowymi [3]

Tab. 1. List of construction nodes analyzed for LC1 case at determined amplitude stresses [3]

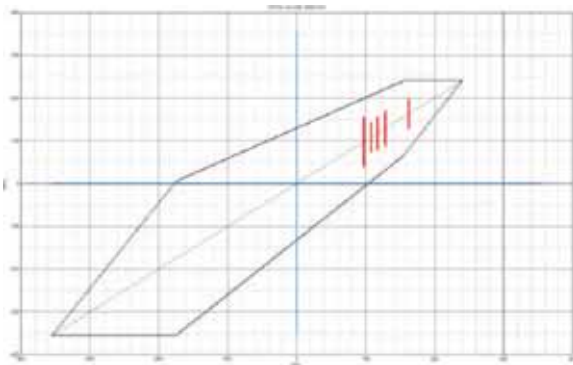
Numer węzła	Naprężenia dla przypadku obciążenia pionowego [MPa]		Naprężenia dla przypadku transportu po drogach [MPa]		Różnica naprężeń pomiędzy przypadkiem transportu po drogach a obciążeniem pionowym [MPa]		Materiał
	Warstwa dolna elementów	Warstwa górna elementów	Warstwa dolna elementów	Warstwa górna elementów	Warstwa dolna elementów	Warstwa górna elementów	
	LC01		LC1		Amplituda	Amplituda	
119826	97	112	146	162	49	50	S355
1080161	59	121	82	170	23	49	S355
807565	93	127	123	166	30	39	S355
763396	143	85	187	111	32	26	S355
125642	103	105	145	147	42	42	S355

Tab. 2. Wykaz węzłów konstrukcji przeanalizowanych dla przypadku LC5 z wyznaczonymi naprężeniami amplitudowymi [3]  
 Tab. 2. List of construction nodes analyzed for LC1 case at determined amplitude stresses [3]

Numer węzła	Naprężenia dla przypadku obciążenia pionowego [MPa]		Naprężenia dla przypadku pracy [MPa]		Różnica naprężeń pomiędzy przypadkiem pracy a obciążeniem pionowym [MPa]		Materiał
	Warstwa dolna elementów	Warstwa górna elementów	Warstwa dolna elementów	Warstwa górna elementów	Warstwa dolna elementów	Warstwa górna elementów	
	LC02		LC5		Amplituda	Amplituda	
120361	141	163	174	198	33	35	S355
125642	128	129	166	171	38	42	S355
756493	87	128	122	164	35	36	S355
756517	68	97	110	155	42	58	S355
1350789	12	108	19	143	7	35	S355
1080161	117	69	156	91	39	22	S355



Rys. 10. Naprężenia zredukowane [Pa], przypadek LC5, widok z boku na agregat uprawowy [3]  
 Fig. 10. Reduced stresses [Pa], LC5 case, side view of the tilling unit [3]



Rys. 11. Wykres Smitha dla stali S355, graficzne przedstawienie wyników największego naprężenia dla pracy [3]  
 Fig. 11. Smith graph for S355 steel, graphic illustration of the results of the biggest stress for operation [3]

## Podsumowanie

Komputerowa analiza złożonych konstrukcji pozwala na szeroką i wyczerpującą analizę występujących wartości naprężeń już na wczesnym etapie projektowania. Zaprezentowany w artykule końcowy model konstrukcji nośnej agregatu uprawowo-siewnego stanowi ostateczną formę wyników analizy zmęczeniowej. W procesie projektowania przeprowadzono analizę wielu wariantów rozwiązań poszczególnych elementów i dobór elementów konstrukcyjnych, optymalnych pod względem wytrzymałościowym, oraz ponowną ich weryfikację dla przyjętych przypadków obciążeń maszyny. Analiza wytrzymałościowa konstrukcji nośnej agregatu pozwoliła na identyfikację najbardziej wyczerpanych węzłów konstrukcyjnych po każdej modyfikacji - najpierw modelu bryłowego, a następnie modelu obliczeniowego.

Ważnym elementem potwierdzającym prawidłowość przeprowadzonej analizy oraz przyjętych założeń jest weryfikacja eksperymentalna konstrukcji. Uzyskane wyniki naprężeń konstrukcji uzyskanych w różnych przypadkach obciążenia stanowią podstawę do planowania oraz przygotowania programu badań tensometrycznych prototypu.

## Bibliografia

- [1] Zienkiewicz O. C., Taylor R.: The Fine Element Method. Vol. 2, Solid Mechanics. V edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] Lorencowicz E.: Poradnik użytkownika techniki rolniczej w tabelach, APRA sp. z o.o., Bydgoszcz, 2002.
- [3] Szczepaniak J., Rogacki R., Szczepaniak M., Mac J., Wasieczko P., Grzechowiak R., Wojciechowski J., Pawłowski T.: Agregat uprawowo-siewny z mechatronicznym układem sterowania umożliwiającym zwiększenie prędkości roboczej i podwyższenie dokładności wysiewu. Zadanie 10, PIMR, Poznań, 2014.
- [4] I-DEAS. Help library bookshelf. Tutorials. Pliki pomocy do systemu I-DEAS.
- [5] Dreszer K., Pawłowski T., Szczepaniak J., Szamanek M., Tanaś W.: Maszyny Rolnicze, PIMR, Poznań 2008.

## MULTIVARIANT ENDURANCE ANALYSIS OF THE SUPPORTING FRAME CONSTRUCTION ON THE EXAMPLE OF TILLING AND SOWING UNIT WITH MECHATRONIC CONTROL SYSTEM

### Summary

The article presents a computational model and the course of the strength calculations of tilling and sowing combined machine. Calculations enabled verification of assumed constructional solution. The state of the exertion of the construction for assumed operating conditions (load cases) was identified (with particular emphasis on critical nodes of the machine - welded joints, units supporting frame joints). The results of calculations allowed to determine the mean values and the stress amplitude, which were marked in the Smith graph for S355 steel.

**Key words:** tilling and sowing combined machine, construction, endurance analysis, Smith graph