



WIBRO

PROJEKT

Tłumienie w układach drgających

mgr inż. Paweł E. Okroj

WIBRO-PROJEKT
TYCHY

AGENDA.

- CEL WYSTĄPIENIA.
- SIŁA HARMONICZNA - DRGANIA HARMONICZNE - OSCYLATOR HARMONICZNY - UKŁAD DRGAJĄCY.
- NAJBARDZIEJ OGÓLNY PODZIAŁ UKŁADÓW DRGAJĄCYCH.
- SIŁA OPORU RUCHU I EFEKT JEJ ISTNIENIA: TŁUMIENIE.
- AH, TEN NEWTON.
- TEORIA TŁUMIENIA.
- „PRZYKŁAD”: ANALIZA ZACHOWANIA SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO, WE FUNKCJI POZIOMU TŁUMIENIA.
- BEZPOŚREDNIE PORÓWNANIE EFEKTU POZIOMU TŁUMIENIA, OBLICZANEGO W „PRZYKŁADZIE”.
- WERYFIKACJA TŁUMIENIA ZAŁOŻONEGO, Z FAKTYCZNYM.
- A CO Z ZASADĄ ZACHOWANIA ENERGII PRZY TŁUMIENIU?
- KIEDY I JAK DOBIERAĆ TŁUMIENIE?
- PODSUMOWANIE.

CEL WYSTĄPIENIA.

- PRZYBLIŻENIE ZJAWISKA TŁUMIENIA MOŻLIWIE UPRASZCZAJĄC JEGO STRONĘ OBLICZENIOWĄ, A BARDZIEJ BAZUJĄC NA OBSERWACJI OTOCZENIA.
- PRZYJĘCIE KRYTERIUM KIEDY MOŻNA / NALEŻY INTERWENIOWAĆ W TŁUMIENIE UKŁADU DRGAJĄCEGO, BY UCYWILIZOWAĆ UPORCZYWE DRGANIA.
- OCENA PRZYDATNOŚCI PROGRAMU „MIDAS GTS NX” DLA POTRZEB MODELOWANIA TŁUMIENIA UKŁADÓW DRGAJĄCYCH, ORAZ ANALIZY UZYSKANYCH WYNIKÓW.

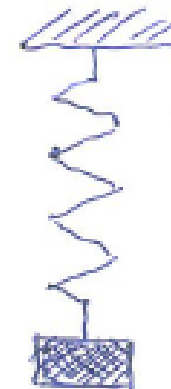
SIŁA HARMONICZNA – DRGANIA HARMONICZNE – OSCYLATOR HARMONICZNY – UKŁAD DRGAJĄCY.

- WYOBRAŹMY SOBIE CIĘŻAREK ZAWIESZONY NA SPRĘŻYNIE.
- PO WYTRĄCENIU CIĘŻARKA Z POŁOŻENIA RÓWNOWAGI I ZANIKNIĘCIU WPŁYWU „IMPULSU”, RUCH CIĘŻARKA PRZYBIERA FORMĘ DRGAŃ WYMUSZONYCH ZAKŁÓCENIEM, A WYCHYLENIA CIĘŻARKA SĄ PROPORCJONALNE DO AKTUALNEJ WARTOŚCI SIŁY, KTÓRA DZIAŁA NA TEN CIĘŻAREK.

Z CHWILĄ USTANIA WSPOMNIANEGO ZAKŁÓCENIA, RUCH CIĘŻARKA PRZYBIERA FORMĘ DRGAŃ WŁASNYCH, A WYCHYLENIA CIĘŻARKA SĄ (JAK WYŻEJ) PROPORCJONALNE DO AKTUALNEJ WARTOŚCI SIŁY, KTÓRA DZIAŁA NA TEN CIĘŻAREK.

NADMIENIONA W OBU PRZYPADKACH SIŁA ZWANA JEST SIŁĄ HARMONICZNĄ. POWODUJE ONA RUCH HARMONICZNY CIĘŻARKA, ZWANY DRGANIAMI HARMONICZNYMI.

- CIĘŻAREK OSCYLUJE WOKÓŁ SWEGO PUNKTU RÓWNOWAGI, ZATEM CAŁY UKŁAD ODPOWIEDNIO ZWANY JEST OSCYLATOREM HARMONICZNYM, BĘDĄC TEŻ JEDNYM Z NAJBARDZIEJ PROSTYCH UKŁADÓW DRGAJĄCYCH.



NAJBARDZIEJ OGÓLNY PODZIAŁ UKŁADÓW DRGAJĄCYCH.

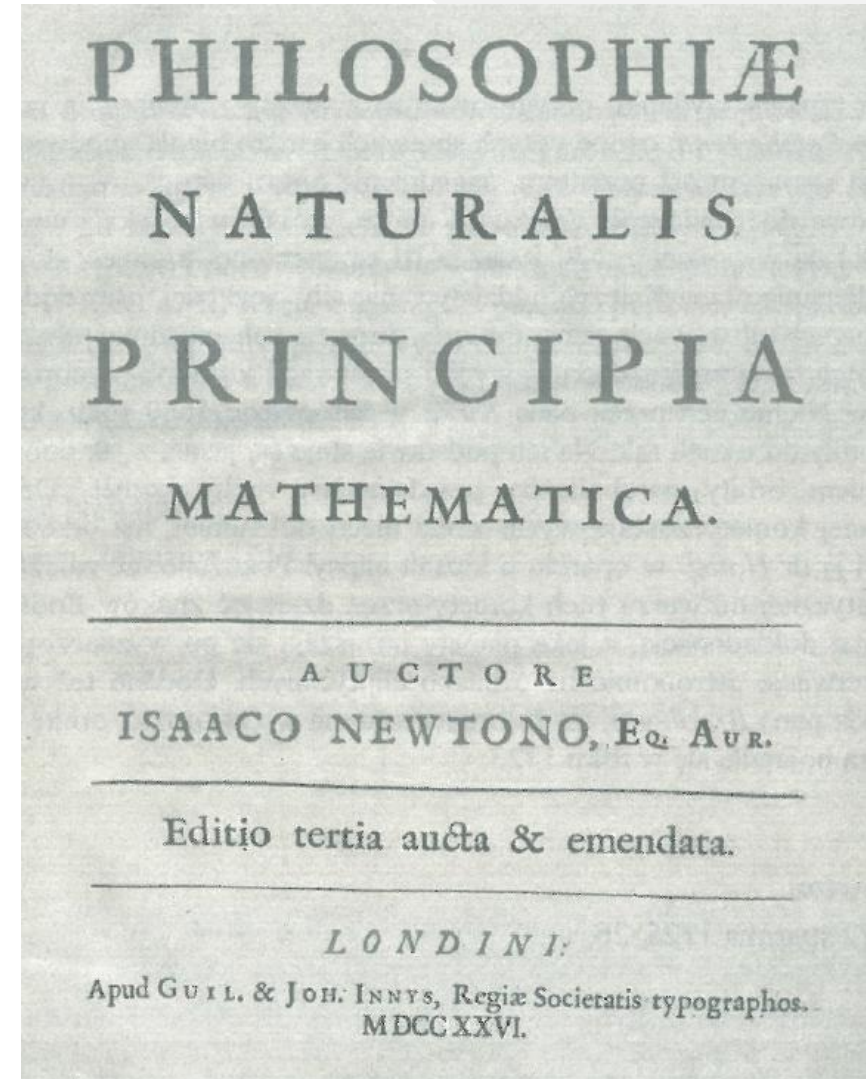
- UKŁAD DRGAJĄCY „MATEMATYCZNY”.
 - UKŁAD WYIDEALIZOWANY, NIE WYSTĘPUJĄCY W RZECZYWISTOŚCI.
 - ZACHOWANIE UKŁADU DETERMINUJE WYSTĘPOWANIE NASTĘPUJĄCYCH SIŁ
 - ISTNIENIE SIŁY HARMONICZNEJ.
 - BRAK ISTNIENIA OPORU, CZYLI „SIŁY OPORU RUCHU”, ZATEM NAWET PO USTĄPIENIU WYMUSZENIA, AMPLITUDA DRGAŃ UKŁADU JEST STAŁA.
- UKŁAD DRGAJĄCY „FIZYCZNY”.
 - UKŁAD REALNY.
 - ZACHOWANIE UKŁADU DETERMINUJE WYSTĘPOWANIE NASTĘPUJĄCYCH SIŁ
 - ISTNIENIE SIŁY HARMONICZNEJ.
 - ISTNIENIE OPORU, CZYLI „SIŁY OPORU RUCHU”, ZATEM PO USTĄPIENIU WYMUSZENIA, AMPLITUDA DRGAŃ UKŁADU JEST MALEJĄCA.

„SIŁA OPORU RUCH” I EFEKT JEJ ISTNIENIA – TŁUMIENIE.

- WSPOMNIANA W POPRZEDNIM PUNKCIE „SIŁA OPORU RUCHU” WYMIENIONA JAKO POJEDNYCZA, MOŻE BYĆ W RZECZYWISTOŚCI SUMĄ KILKU SKŁADOWYCH „SIŁ OPORU RUCHU”. SIŁY TE MAJĄ ODMIENNE POCHODZENIE I MOGĄ MIEĆ RÓŻNY CHARAKTER, LECZ KAŻDA Z NICH ODDZIAŁUJE NA UKŁAD DRGAJĄCY W SPOSÓB PODOBNY: ZMNIEJSZA AMPLITUDY TEGO RUCHU, ORAZ (MNIEJ SPEKTAKULARNIE) OPÓŹNIA TEN RUCH, CO ŁĄCZNIE OKREŚLAMY MIANEM TŁUMIENIA.
- W ZALEŻNOŚCI OD POCHODZENIA SKŁADOWYCH „SIŁ OPORU RUCHU”, SPECYFIKUJEMY NASTĘPUJĄCE RODZAJE TŁUMIENIA:
 - TŁUMIENIE MATERIAŁOWE, WYWOŁANE SIŁĄ OPORU MIĘDZYCZĄSTECZKOWEGO MATERIAŁU KONSTRUKCJI UKŁADU (ZBLIŻONE DO NIŻEJ OPISYWANEGO TŁUMIENIA „LEPKIEGO”).
 - TŁUMIENIE WEWNĘTRZNE, WYWOŁANE SIŁĄ OPORU TARCIA WZAJEMNEGO ELEMENTÓW KONSTRUKCJI UKŁADU (TARCIE „SUCHE”).
 - TŁUMIENIE ZEWNĘTRZNE, WYWOŁANE SIŁĄ OPORU ELEMENTÓW UKŁADU O MEDIUM ZEWNĘTRZNE:
 - TŁUMIENIE „LEPKIE”.
 - TŁUMIENIE „AERODYNAMICZNE” (ZBLIŻONE DO TŁUMIENIA „LEPKIEGO”).
 - TŁUMIENIE „HYDRODYNAMICZNE” (ZBLIŻONE DO TŁUMIENIA „LEPKIEGO”).

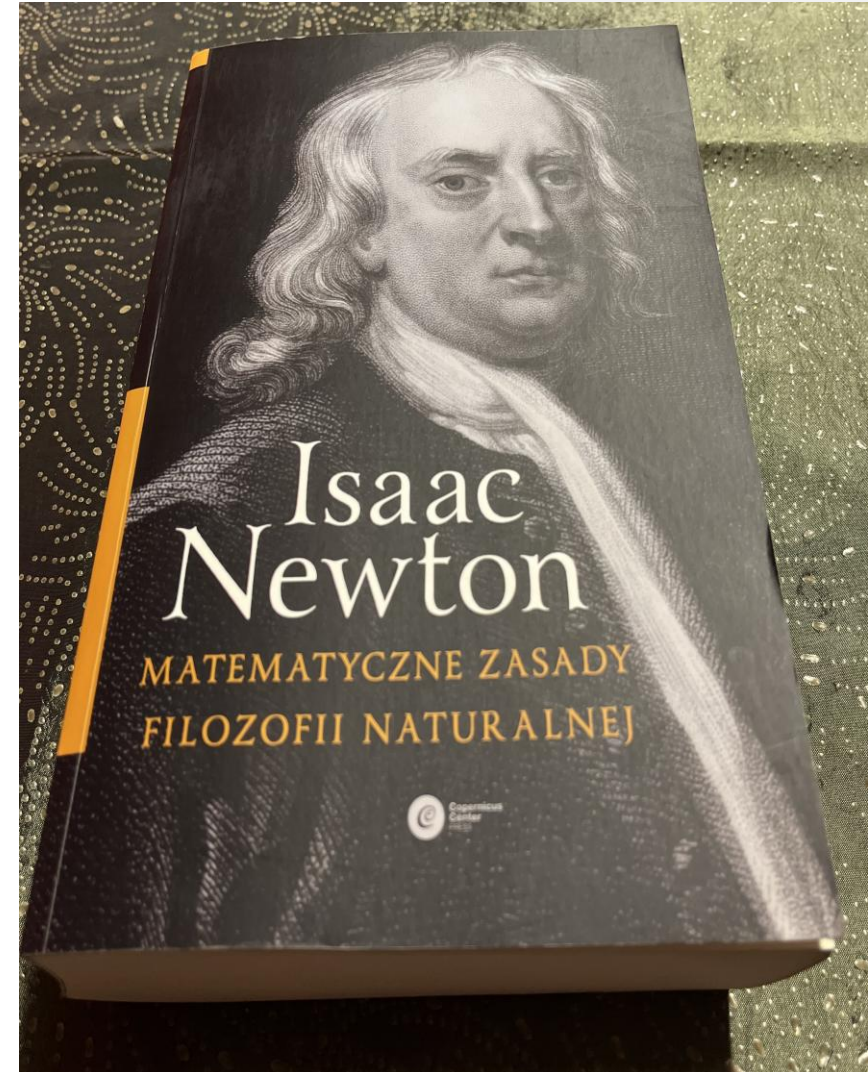
AH, TEN NEWTON (str. 1 z 4).

- KOLEJNE ROZDZIAŁY NINIEJSZEGO WYSTĄPIENIA BAZUJĄ NA JEDNYM Z WĄTKÓW PRACY WYBITNEGO ANGIELSKIEGO UCZONEGO: ISAACA NEWTONA, ŻYJĄCEGO I TWORZĄCEGO NA PRZEŁOMIE XVII, ORAZ XVIII WIEKU. REPREZENTOWAŁ ON WIELE ZAWODÓW, W TYM TAKŻE: FIZYK, MATEMATYK, FILOZOF. W RAMACH SWOJEJ TÓRCZOŚCI PODSUMOWAŁ XVII-WIECZNĄ NAUKĘ NA TEMAT PODSTAWOWYCH PRAW MECHANIKI I ZNACZNIE JĄ ROZBUDOWAŁ, OGŁASZAJĄC DZIEŁO O TYTULE: „PHILOSOPHIAE NATURALIS PRINCIPIA MATHEMATICA”, ZWANE ÓWCZEŚNIE, ORAZ TAKŻE TERAZ: „PRINCIPIA”. OBOK FOTKA WIERZCHNIEJ OBWOLUTY TEGO DZIEŁA.



AH, TEN NEWTON (str. 2 z 4).

- OBOK FOTKA WIERZCHNIEJ OBWOLUTY POLSKIEGO PRZEKŁADU WSPOMNIANEGO WCZEŚNIEJ DZIEŁA, KTÓREGO JESTEM DUMNYM WŁAŚCICIELEM.
- OWO DZIEŁO SKŁADA SIĘ Z CZTERECH CZĘŚCI:
 - AKSJOMATY, CZYLI PRAWA RUCHU.
 - KSIĘGA I: O RUCHU CIAŁ.
 - KSIĘGA II: O RUCHU CIAŁ W OŚRODKACH STAWIAJĄCYCH OPÓR.
 - KSIĘGA III: O UKŁADZIE SŁONECZNYM.



AH, TEN NEWTON (str. 3 z 4).

- OBOK JEDNA ZE STRON OMAWIANEGO DZIEŁA, ZAWIERAJĄCA W CZĘŚCI „AKSJOMATY ...”, PRZEKŁAD ORYGINALNEJ TREŚCI „I ZASADY DYNAMIKI”, ZATEM PODSTAWOWEGO KAMIENIA MIŁOWEGO NAUKI O DYNAMICE (OZNACZYŁEM GO RAMKĄ). ZAPOZNAJĄC SIĘ Z NIĄ MOŻNA ODNIEŚĆ WRAŻENIE, ŻE UCZYMY SIĘ WPROST Z JEGO WYKŁADÓW !

AKSJOMATY czyli PRAWA RUCHU

Prawo I

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku albo ruchu jednostajnego wzdłuż prostej, dopóki przez siły do niego przyłożone nie zostanie zmuszone do zmiany tego stanu.

Pociski zachowują swój ruch pod warunkiem, że nie są hamowane przez opór powietrza albo przyciągane w dół przez siłę ciężkości. Obręcz²⁰, której powiązane ze sobą części ciągle odchylają się wzajemnie od swego prostoliniowego ruchu, nie zaprzestaje rotacji, chyba, że działa opór powietrza. Większe bryły planet i komet, napotykaające w pustej przestrzeni na znikomy opór, przez znacznie dłuższy czas zachowują zarówno swój ruch postępowy, jak i obrotowy²¹.

Prawo II

Zmiana pędu jest zawsze proporcjonalna do wywartej siły napędzającej i dokonuje się zgodnie z kierunkiem linii prostej, wzdłuż której ta siła działa.

Jeżeli jakakolwiek siła wytwarza pęd (*motus*), to siła dwukrotnie większa wytworzy pęd dwukrotnie większy, trzykrotnie większa siła – trzykrotnie większy pęd, niezależnie od tego, czy siła ta była wywarta łącznie i naraz, czy stopniowo i kolejno. Jeżeli ciało wcześniej poruszało się, to ten pęd, będąc zawsze skierowanym wzdłuż działającej siły, jest dodawany do

²⁰ W łacińskim oryginale: *trochus* – obręcz służąca do gry, podczas której obracała się wokół swojej osi symetrii (Cohen).

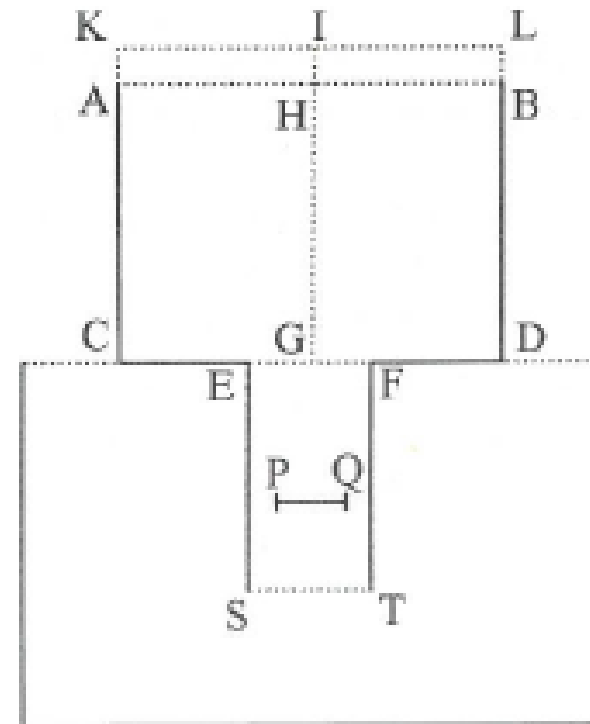
²¹ W liczącej w czasach Newtona dwa tysiące lat *Fizyce* Arystotelesa (Aristoteles, *Fizyka*, PWN 1968, przekład Kazimierza Leśniaka, Księga IV, 215a) znajdujemy takie oto zdanie: „A zatem ciało albo będzie się znajdować w spoczynku, albo będzie się poruszało w nieskończoność, jeżeli tylko nie stanie mu na drodze jakieś inne silniejsze ciało”. Jest mało prawdopodobne, aby Newton mógł nie znać tego tekstu.

AH, TEN NEWTON (str. 4 z 4).

- ABY PONOWNIE POKAZAĆ AKTUALNOŚĆ ÓWCZESNYCH ROZWAŻAŃ NEWTONA Z DZISIEJSZĄ NAUKĄ, NAWIAZUJĄC PRZY TYM DO ZASADNICZEGO MOTYWIU WYSTĄPIENIA PRZYTACZAM NIŻEJ WYTYPOWANE FRAGMENTY „PARAGRAFU I” KSIĘGI II („O RUCHU CIAŁ W OŚRODKACH STAWIAJĄCYCH OPÓR):
 - W OŚRODKACH POSIADAJĄCYCH SPOISTOŚĆ (OBECNIE: LEPKOŚĆ), RUCH CIAŁ JEST PODDANY OPOROWI PROPORCJONALNEMU DO PRĘDKOŚCI.
 - STANOWISKO TO JEST BAZĄ DZISIEJSZYCH ROZWAŻAŃ.
 - W OŚRODKACH CAŁKOWICIE POZBAWIONYCH SPOISTOŚCI (OBECNIE: LEPKOŚCI) RUCH CIAŁ JEST PODDANY OPOROWI PROPORCJONALNEMU DO KWADRATU PRĘDKOŚCI.
 - STANOWISKO TO JEST PRZYKŁADOWO BAZĄ OBECNEJ DEFINICJI OPORU STAWIANEGO PRZEZ KAROSERIĘ PORUSZAJĄCEGO SIĘ SAMOCHODU, OPŁYWAJĄCEMU GO POWIETRZU.
- PROROK !

TEORIA TŁUMIENIA (str. 1 z 3).

- ZJAWISKO TŁUMIENIA NIE JEST JESZCZE W PEŁNI ROZPOZNANE JAKKOLWIEK UZNAJE SIĘ, ŻE TŁUMIENIE „LEPKIE”, LUB ZBLIŻONE DO „LEPKIEGO” MOŻE MIEĆ ZASADNICZY WPŁYW NA ZACHOWANIE SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO. ZATEM KONTYNUACJA TEGO WYSTĄPIENIA BĘDZIE POŚWIĘCONA WŁAŚNIE WSPOMNIANEMU RODZAJOWI TŁUMIENIA.
 - IDEA „LEPKIEGO” TŁUMIENIA, REALIZOWANA PRZEZ TŁUMIK ZEWNĘTRZNY.
 - ROZWAŻMY NAJBARDZIEJ PROSTY RODZAJ TŁUMIKA „LEPKIEGO”, ZAPROPONOWANY PRZEZ NEWTONA, OBEJMUJĄCY TŁOK ZANURZONY W „NEWTONOWSKIM” PŁYNNIE (PŁYN DOSKONALE „LEPKI”).
 - PODCZAS RUCHU TŁOKA W PŁYNNIE POWSTAJE „LEPKI” OPÓR (ZGODNIE ZE WSPOMNIANĄ ZASADĄ, ŻE „SIŁA OPORU RUCHU” I PRĘDKOŚĆ SĄ PROPORCJONALNE). CHARAKTER TEGO RUCHU ŁATWO JEST PRZEDSTAWIĆ PRZEZ „WSPÓŁCZYNNIK OPORU RUCHU” $c \left[\frac{N \cdot s}{m} \right]$. ABY ZROZUMIEĆ SENS FIZYCZNY TEGO PARAMETRU NALEŻY PRZEKSZTAŁCIĆ JEGO JEDNOSTKI DO POSTACI $\left[\frac{N}{m} \right]$.



TEORIA TŁUMIENIA (str. 2 z 3).

WIDZIMY WTEDY, ŻE W LICZNIKU WYSTĘPUJE SIŁA (TU: „SIŁA OPORU RUCHU”), A W MIANOWNIKU SZYBKOŚĆ ZMIANY POŁOŻENIA (TU: PRĘDKOŚĆ RUCHU),

CZYLI: $c \left[\frac{N \cdot s}{m} \right] = \frac{Q [N]}{v \left[\frac{m}{s} \right]}$. JAK WIDAĆ, PRĘDKOŚĆ RUCHU: v , ORAZ ODPOWIADAJĄCY

JEJ „WSPÓŁCZYNNIK OPORU RUCHU”: c SĄ ODWROTNIE PROPORCJONALNIE (WZROST PRĘDKOŚCI RUCHU, POWODUJE SPADEK WARTOŚCI „WSPÓŁCZYNNIKA OPORU RUCHU”). WSPOMNIANY TU „WSPÓŁCZYNNIK OPORU RUCHU”: c BĘDZIEMY UZNAWAĆ JAKO TŁUMIENIE, GENEROWANE PRZEZ TŁUMIK.

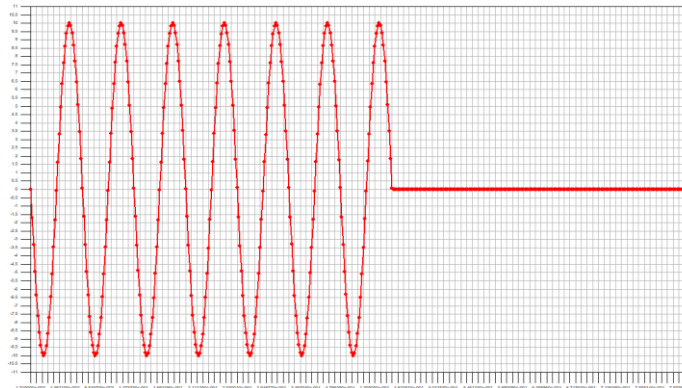
- TREŚĆ POPRZEDNIEGO PODPUNKTU POMAGA PRZEDSTAWIĆ TAKŻE WZÓR NA „SIŁĘ OPORU RUCHU”: $Q [N] = -c \left[\frac{N \cdot s}{m} \right] * v \left[\frac{m}{s} \right]$ INFORMUJĄCY, ŻE „SIŁA OPORU RUCHU” JEST WPROST PROPORCJONALNA DO PRĘDKOŚCI TEGO RUCHU (WZROST PRĘDKOŚCI RUCHU, POWODUJE WZROST „SIŁY OPORU RUCHU”). MOŻNA INTUICYJNIE WYCZUĆ, ŻE OPÓR HAMUJE RUCH, CZYLI CIĄGNIE PRZECIWNIE DO ZWROTU RUCHU, ZATEM WE WZORZE TYM, MUSI POJAWIĆ SIĘ ZNAK UJEMNY.
- PODSUMOWUJĄC CECHY „SIŁY OPORU RUCHU” MOŻNA PRZYJAĆ, ŻE:
 - MA ONA KIERUNEK ZGODNY Z PRĘDKOŚCIĄ RUCHU I PRZECIWNY ZWROT.
 - JEST ZALEŻNA OD RODZAJU OŚRODKA W KTÓRYM ODBYWA SIĘ RUCH.
 - JEST ZALEŻNA OD PRĘDKOŚCI RUCHU CIAŁA.

TEORIA TŁUMIENIA (str. 3 z 3).

- ZACHOWANIE SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO, WE FUNKCJI POZIOMU TŁUMIENIA.
 - KILKA OZNACZEŃ I WZORÓW.
 - $m(g)$ [kg] – MASA OBCIĄŻAJĄCA UKŁAD.
 - ω [$\frac{rad}{s}$] – PRĘDKOŚĆ KĄTOWA DRGAŃ WŁASNYCH.
 - c [$\frac{N*s}{m}$] – „WSPÓŁCZYNNIK OPORU RUCHU”.
 - $c(kr)$ [$\frac{N*s}{m}$] – TŁUMIENIE KRYTYCZNE , $c(kr) = 2*m(g)*\omega$.
 - $\omega(d)$ [$\frac{rad}{s}$] – PRĘDKOŚĆ KĄTOWA DRGAŃ TŁUMIONYCH , $\omega(d) = \omega \sqrt{1 - (\frac{c}{c(kr)})^2}$.
 - WPŁYW TŁUMIENIA NA RUCH UKŁADU DRGAJĄCEGO.
 - $c < c(kr)$ – TŁUMIENIE „PODKRYTYCZNE” (RUCH DRGAJĄCY).
 - $c = c(kr)$ – TŁUMIENIE „KRYTYCZNE” (GRANICA POMIĘDZY RUCHEM DRGAJĄCYM, ORAZ NIEDRGAJĄCYM).
 - $c > c(kr)$ – TŁUMIENIE „NADKRYTYCZNE” (RUCH NIEDRGAJĄCY).

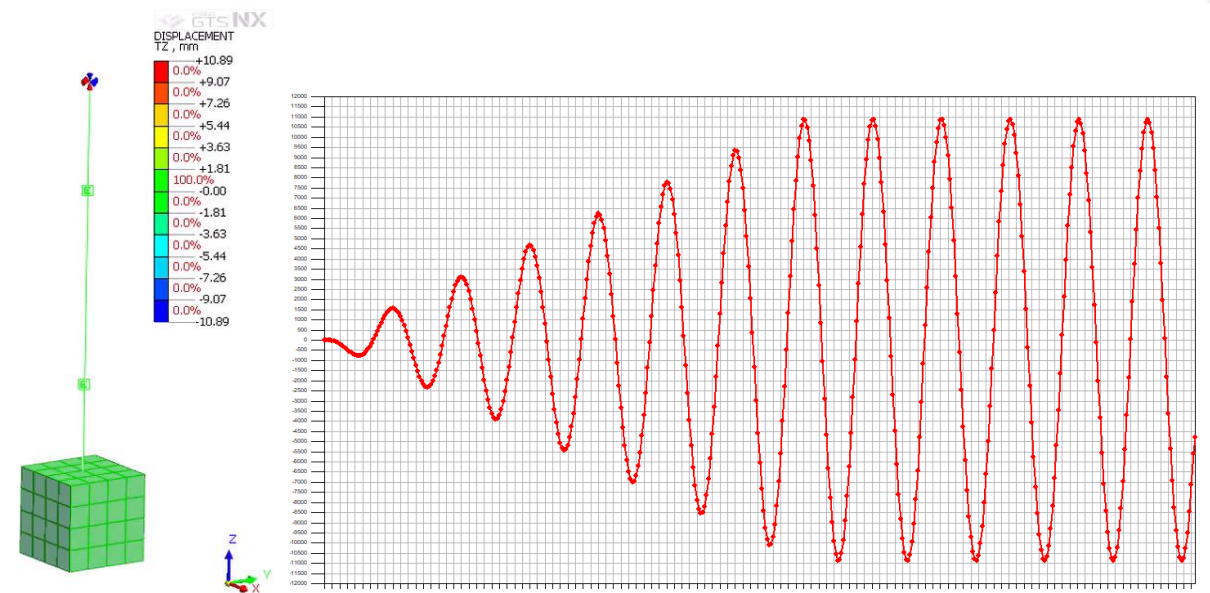
„PRZYKŁAD”: ANALIZA ZACHOWANIA SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO, WE FUNKCJI POZIOMU TŁUMIENIA (str. 1 z 6).

- SZKIC MODELU I JEGO CHARAKTERYSTYKA.
 - $\omega = 100.0 \left[\frac{rad}{s} \right]$.
 - $c(kr) = 400 \left[\frac{N*s}{m} \right]$.
- CHARAKTERYSTYKA WYMUSZENIA.
 - STAŁA LICZBA OBROTÓW WAŁU, OBROTOWEGO, BEZ ZMIANY WARTOŚCI SIŁY DYNAMICZNEJ.
 - $\lambda = 100.0 \left[\frac{rad}{s} \right]$ W CZASIE: $0 \div 0.443s$.
 - UWAGA. WYMUSZENIE REZONANSOWE.
- METODA ANALIZY OBLICZENIOWEJ:
 - LTH.
 - CZAS TRWANIA ANALIZY: $0.800s$.



„PRZYKŁAD”: ANALIZA ZACHOWANIA SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO, WE FUNKCJI POZIOMU TŁUMIENIA (str. 2 z 6).

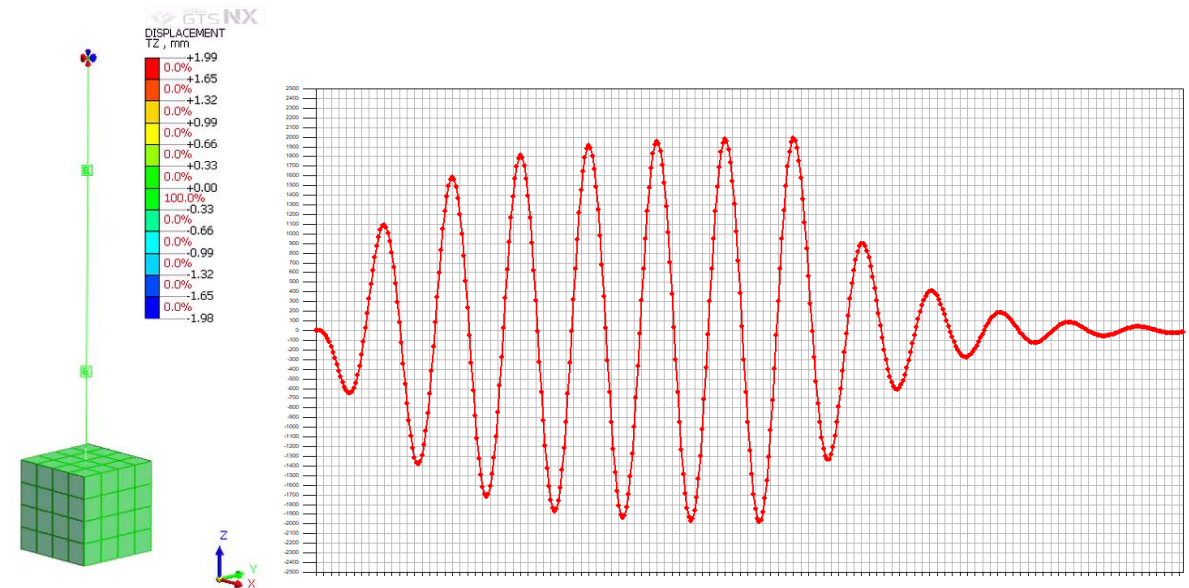
- TŁUMIENIE ZEROWE: $c=0 \left[\frac{N*s}{m} \right] \lll c(kr)=400 \left[\frac{N*s}{m} \right] \rightarrow \omega(d)=100.0 \left[\frac{rad}{s} \right]$.
- WZROST AMPLITUD, AŻ DO OSIĄGNIĘCIA NIETŁUMIONEGO REZONANSU. PO ZDJĘCIU OBCIĄŻENIA RUCH DRGAJĄCY (DRGANIA WŁASNE O STAŁYCH, NIEGASNĄCYCH AMPLITUDACH).
- PRZEMIESZCZENIA (MAKSYMALNA WARTOŚĆ: $\approx 11\text{mm}$), NIŻEJ WE FORMIE RUCHU, ORAZ SZKICU.



[DATA] LTH(D)-011---m(g)1_15.92Hz_D(O)-T.Zerowe., Linear Time History(Direct), INCR=1 (TIME=1.745e-003), [UNIT] N, mm

„PRZYKŁAD”: ANALIZA ZACHOWANIA SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO, WE FUNKCJI POZIOMU TŁUMIENIA (str. 3 z 6).

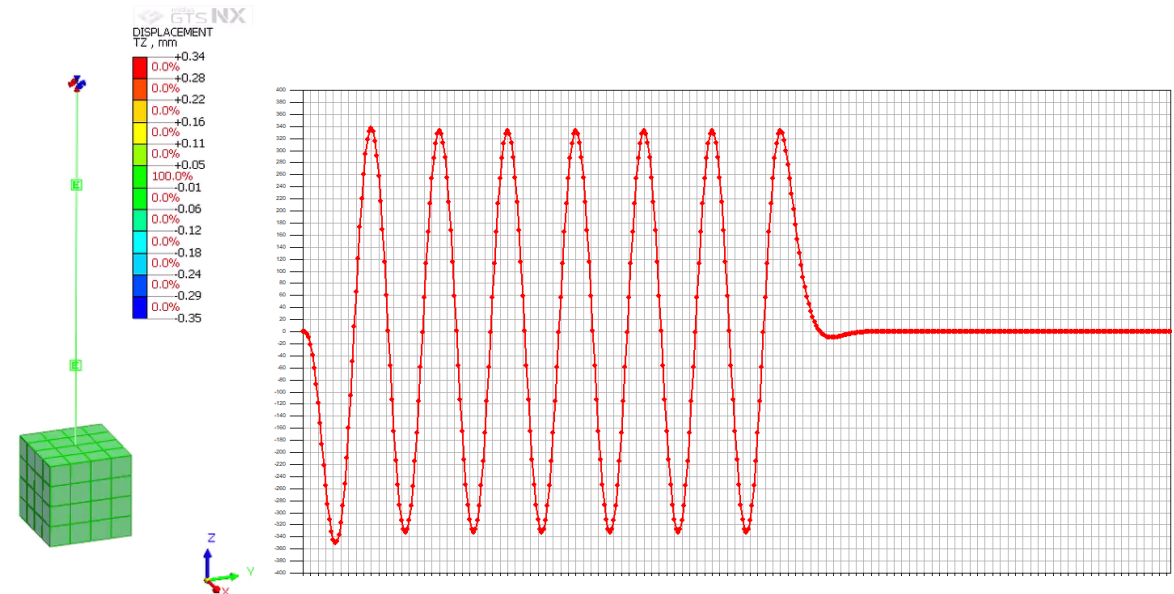
- TŁUMIENIE PODKRYTYCZNE „MAŁE”: $c=50 \left[\frac{N*s}{m} \right] \ll c(kr)=400 \left[\frac{N*s}{m} \right] \rightarrow \omega(d)=99.22 \left[\frac{rad}{s} \right]$.
 - WZROST AMPLITUD, AŻ DO OSIĄGNIĘCIA TŁUMIONEGO REZONANSU. PO ZDJĘCIU OBCIĄŻENIA RUCH DRGAJĄCY (DRGANIA WŁASNE O STAŁYCH, GASNĄCYCH AMPLITUDACH).
 - PRZEMIESZCZENIA (MAKSYMALNA WARTOŚĆ: $\approx 2\text{mm}$), NIŻEJ WE FORMIE RUCHU, ORAZ SZKICU.



[DATA] LTHD-012 A---m(g)1_15.92Hz_D(O)-T.Podkryt.A, Linear Time History(Direct), INCR=1 (TIME=1.745e-003), [UNIT] N, mm

„PRZYKŁAD”: ANALIZA ZACHOWANIA SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO, WE FUNKCJI POZIOMU TŁUMIENIA (str. 4 z 6).

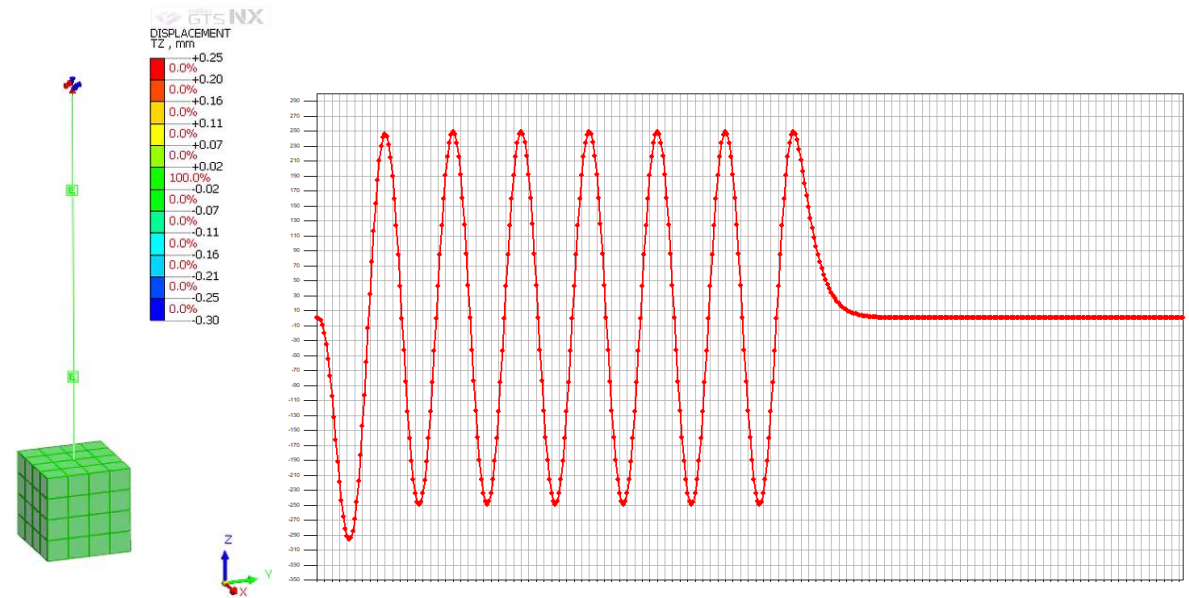
- TŁUMIENIE PODKRYTYCZNE „DUŻE”: $c=300 \left[\frac{N*s}{m} \right] < c(kr)=400 \left[\frac{N*s}{m} \right] \rightarrow \omega(d)=66.14 \left[\frac{rad}{s} \right]$.
- WZROST AMPLITUD, AŻ DO OSIĄGNIĘCIA TŁUMIONEGO REZONANSU. PO ZDJĘCIU OBCIĄŻENIA RUCH „CHWILOWO” DRGAJĄCY, DAŻĄCY ASYMPTOTYCZNIE DO RÓWNOWAGI.
- PRZEMIESZCZENIA (MAKSYMALNA WARTOŚĆ: $\approx 0.34\text{mm}$), NIŻEJ WE FORMIE RUCHU, ORAZ SZKICU.



[DATA] LTH(D)-012 B---m(q)1_15.92Hz_D(O)-T.Podkryt.6, Linear Time History(Direct), INCR=1 (TIME=1.745e-003), [UNIT] N, mm

„PRZYKŁAD”: ANALIZA ZACHOWANIA SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO, WE FUNKCJI POZIOMU TŁUMIENIA (str. 5 z 6).

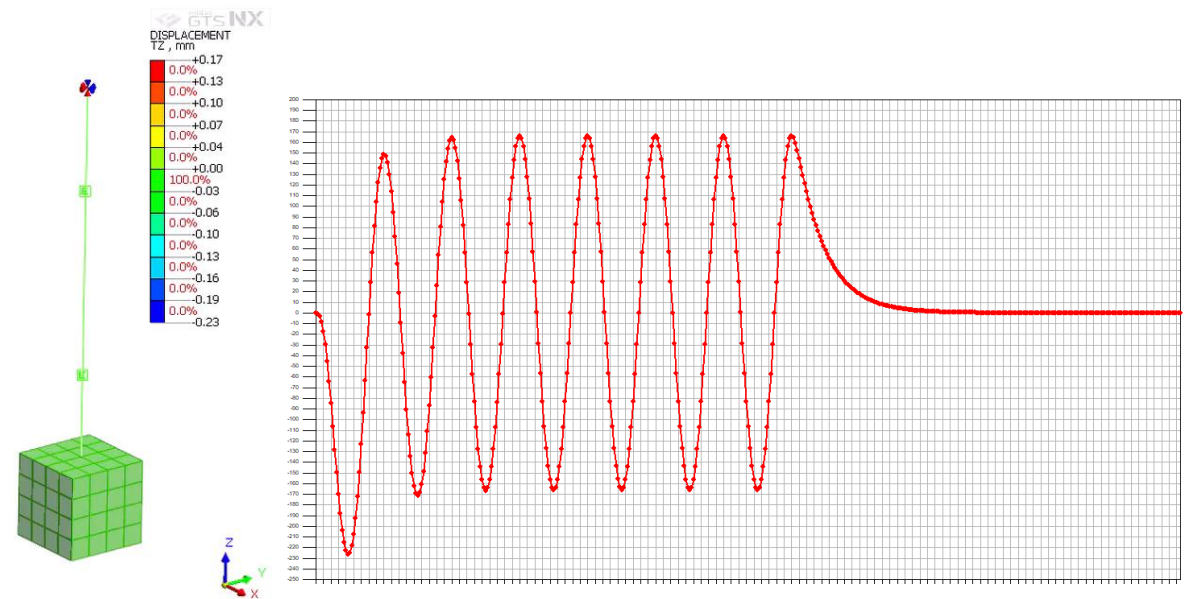
- TŁUMIENIE KRYTYCZNE: $c=400 \left[\frac{N*s}{m} \right] = c(kr)=400 \left[\frac{N*s}{m} \right] \rightarrow \omega(d)=0 \left[\frac{rad}{s} \right]$.
- WZROST AMPLITUD, AŻ DO OSIĄGNIĘCIA TŁUMIONEGO REZONANSU. PO ZDJĘCIU OBCIĄŻENIA RUCH NIEDRGAJĄCY, GWAŁTOWNIE DĄŻĄCY ASYMPTOTYCZNIE DO RÓWNOWAGI.
- PRZEMIESZCZENIA (MAKSYMALNA WARTOŚĆ: $\approx 0.25\text{mm}$), NIŻEJ WE FORMIE RUCHU, ORAZ SZKICU.



[DATA] LTH(D)-013---m(g)1_15.92Hz_D(O)-T.Kryt., Linear Time History(Direct), INCR=1 (TIME=1.745e-003), [UNIT] N, mm

„PRZYKŁAD”: ANALIZA ZACHOWANIA SIĘ UKŁADU DRGAJĄCEGO, WE FUNKCJI POZIOMU TŁUMIENIA (str. 6 z 6).

- TŁUMIENIE NADKRYTYCZNE: $c=600 \left[\frac{N*s}{m} \right] > c(kr)=400 \left[\frac{N*s}{m} \right] \rightarrow \omega(d) < 0 \left[\frac{rad}{s} \right]$.
- WZROST AMPLITUD, AŻ DO OSIĄGNIĘCIA TŁUMIONEGO REZONANSU. PO ZDJĘCIU OBCIĄŻENIA RUCH NIEDRGAJĄCY, DAŻĄCY (ŁAGODNIEJ NIŻ DLA $c(kr)$) ASYMPTOTYCZNIE DO RÓWNOWAGI.
- PRZEMIESZCZENIA (MAKSYMALNA WARTOŚĆ: $\approx 0.17\text{mm}$), NIŻEJ WE FORMIE RUCHU, ORAZ SZKICU.



[DATA] LTH(D)-014---m(g)1_15.92Hz_D(O)-T.NadKryt., Linear Time History(Direct), INCR=1 (TIME=1.745e-003), [UNIT] N, mm

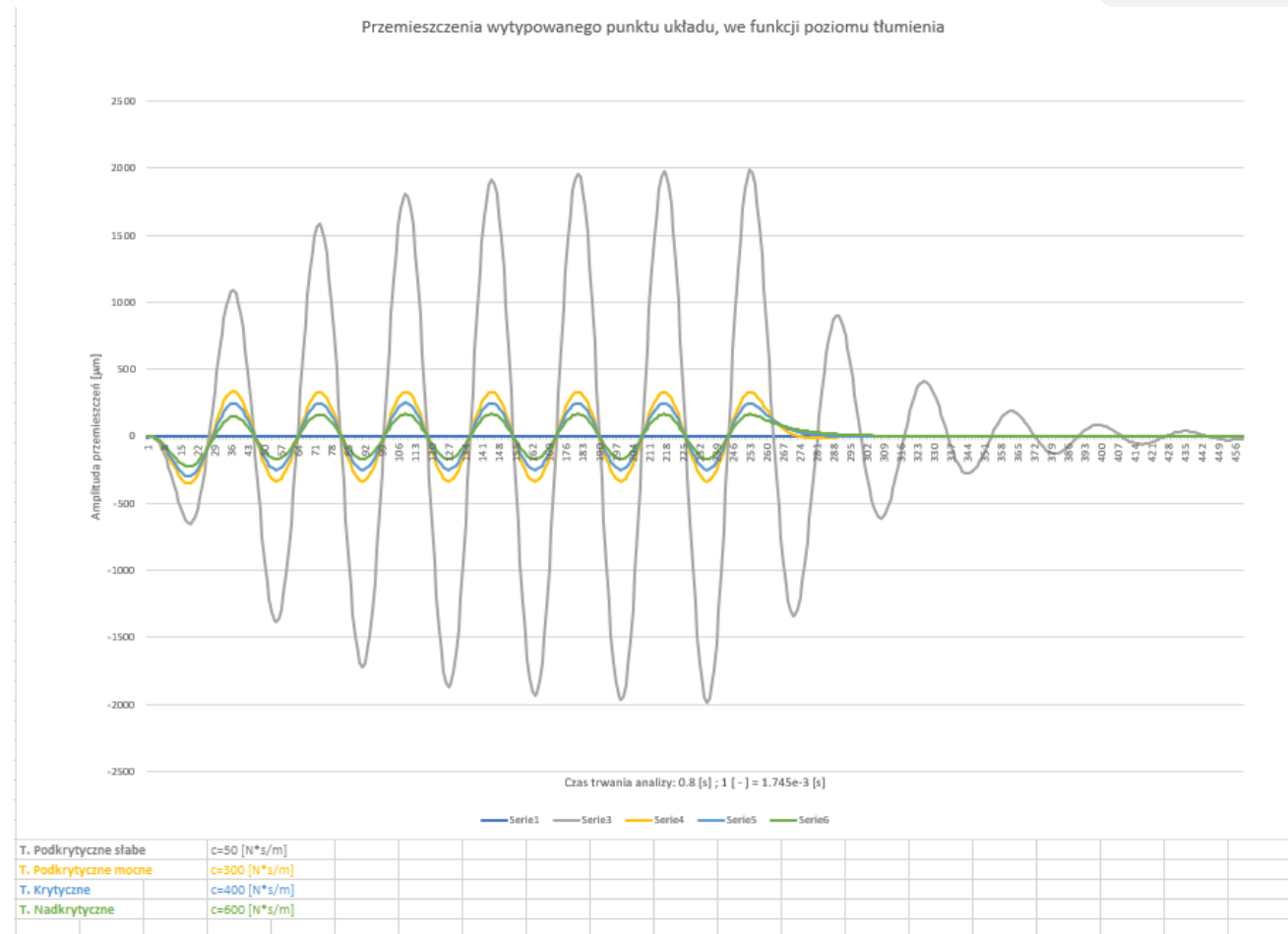
BEZPOŚREDNIE PORÓWNANIE EFEKTU POZIOMU TŁUMIENIA, OBLICZANEGO W „PRZYKŁADZIE” (str. 1 z 3).

- TŁUMIENIE: $c=0, 50, 300, 400, 600 \left[\frac{N*s}{m} \right]$.



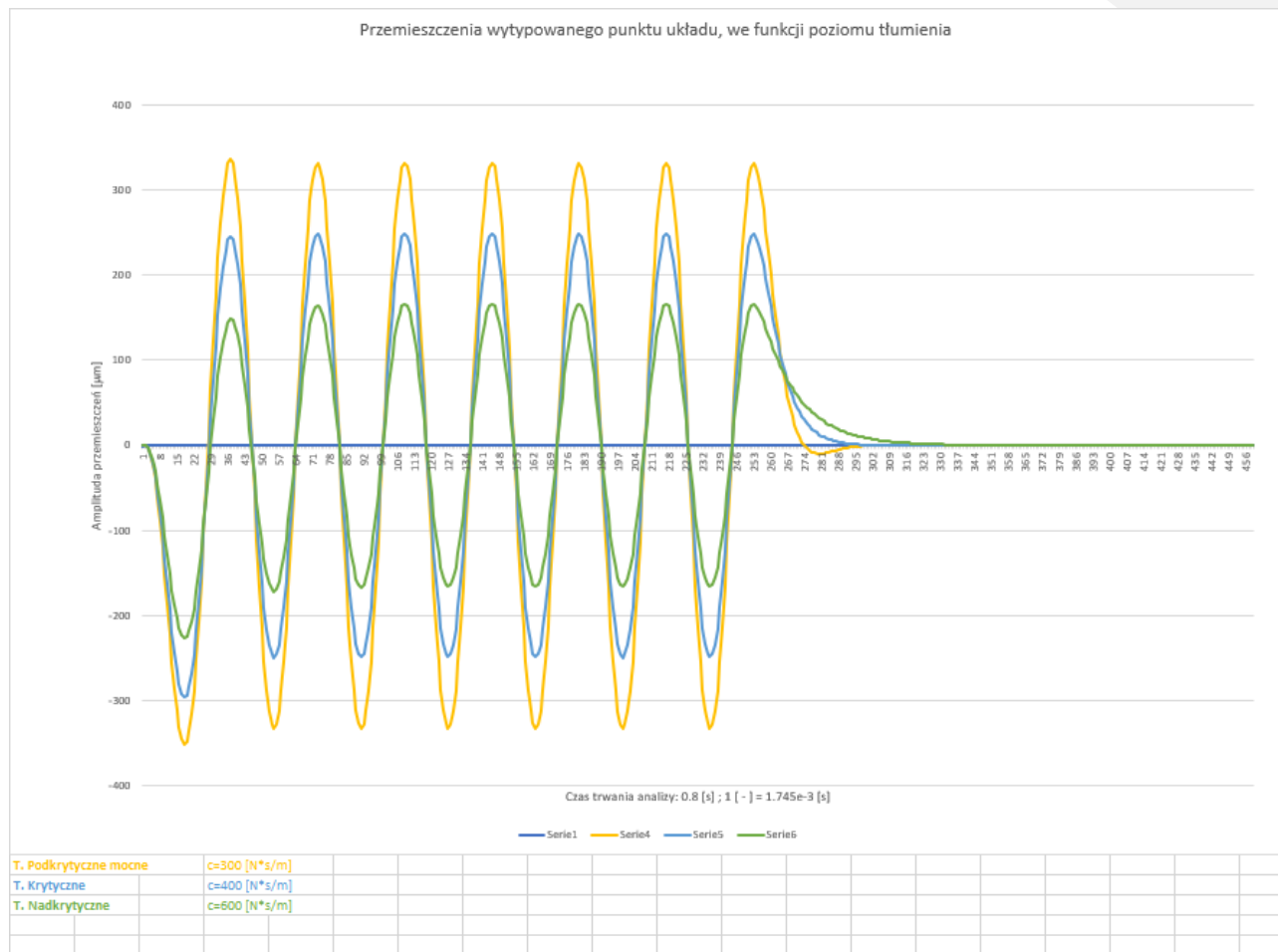
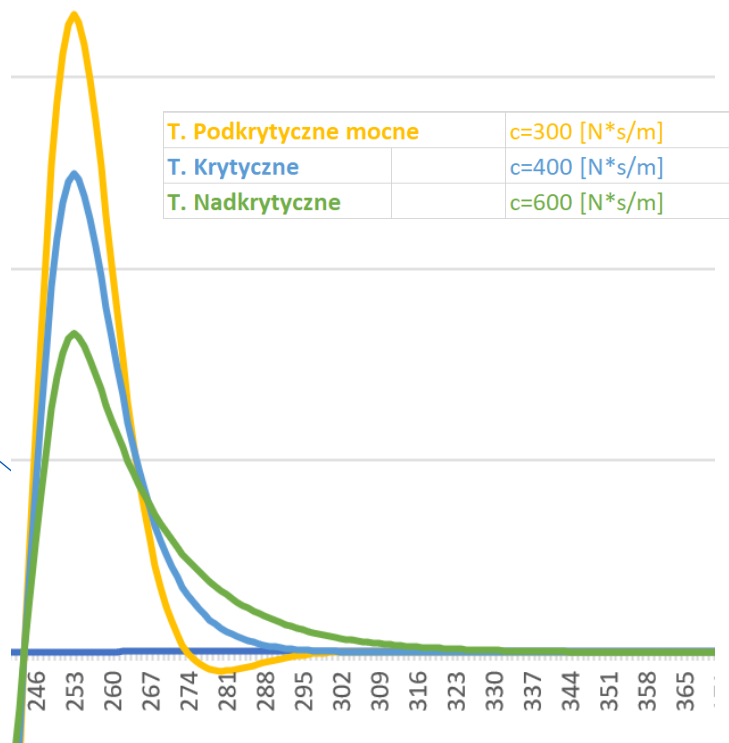
BEZPOŚREDNIE PORÓWNANIE EFEKTU POZIOMU TŁUMIENIA, OBLICZANEGO W „PRZYKŁADZIE” (str. 2 z 3).

- TŁUMIENIE: $c=50, 300, 400, 600 \left[\frac{N*s}{m} \right]$.



BEZPOŚREDNIE PORÓWNANIE EFEKTU POZIOMU TŁUMIENIA, OBLICZANEGO W „PRZYKŁADZIE” (str. 3 z 3).

- TŁUMIENIE: $c=300, 400, 600 \left[\frac{N*s}{m} \right]$.



WERYFIKACJA TŁUMIENIA ZAŁOŻONEGO, Z FAKTYCZNYM.

- W PRZYPADKU, GDY W EFEKCIE ISTNIENIA TŁUMIENIA, OBLICZENIA / POMIAR DRGAŃ WYKAZUJE GASNĄCE AMPLITUDY, ISTNIEJE METODA OSZACOWANIA WARTOŚCI TEGO TŁUMIENIA BAZUJĄC NA STWIERDZENIU, ŻE MIARĄ TŁUMIENIA JEST PROCENTOWY ZANIK AMPLITUDY PO KAŻDYM KOLEJNYM OKRESIE DRGAŃ. KONIECZNE PRZY TYM JEST JEDNAK OSZACOWANIE WARTOŚCI LOGARYTMICZNEGO DEKREMENTU TŁUMIENIA Δ [-], ORAZ WYLICZENIE UŁAMKA TŁUMIENIA KRYTYCZNEGO ξ [-].
- WERYFIKACJĘ TAKĄ PRZEPROWADZONO DLA PRZYPADKU TŁUMIENIA PODKRYTYCZNEGO „MAŁEGO”, WCZEŚNIEJ PRZEDSTAWIONEGO. SKRÓTOWE OBLICZENIA PRZEDSTAWIONO PONIŻEJ.
 - WARTOŚĆ LOGARYTMICZNEGO DEKREMENTU TŁUMIENIA $\Delta = 0.74$ [-].
 - WARTOŚĆ UŁAMKA TŁUMIENIA (LICZONA Z Δ) $\xi = 0.12$ [-].
 - ZAŁOŻONA WARTOŚĆ UŁAMKA TŁUMIENIA $\xi' = \frac{c}{c(kr)} = 0.13$ [-] $\approx \xi = 0.12$ [-] !

KIEDY I JAK DOBIERAĆ TŁUMIENIE?

- NALEŻY PAMIĘTAĆ, ŻE NA ISTNIENIE WIĘKSZOŚCI RODZAJÓW TŁUMIENIA (TŁUMIENIE MATERIAŁOWE, A TAKŻE WEWNĘTRZNE), MAMY JAKO PROJEKTANCI NIEWIELKI WPŁYW. ISTOTNE NATOMIAST JEST, BY PRZED PODJĘCIEM DECYZJI O WPROWADZANIU DODATKOWEGO TŁUMIENIA, NAJPIERW OSZACOWAĆ ISTNIEJĄCE TŁUMIENIE, BAZUJĄC NA STOSOWNYCH OBLICZENIACH.
- INGERENCJA W TŁUMIENIE WINNA BYĆ REALIZOWANA W PRZYPADKU UKŁADÓW DRGAJĄCYCH PRACUJĄCYCH W STREFIE REZONANSU NOMINALNEGO (CHOĆ STROJENIE TAKIE JEST BARDZO RYZYKOWNE). KORZYSTNE JEST TEŻ ZWERYFIKOWANIE TŁUMIENIA DLA UKŁADU Z REZONANSAMI PRZEJŚCIOWYMI.
- ISTOTNĄ KOREKTĘ ZACHOWANIA SIĘ UKŁADU MOŻEMY OSIĄGNAĆ, WPROWADZAJĄC DO UKŁADU TŁUMIENIE ZEWNĘTRZNE „LEPKIE”. NALEŻY DĄŻYĆ, BY ŁĄCZNE TŁUMIENIE OSIĄGNĘŁO POZIOM TŁUMIENIA PODKRYTYCZNEGO „MAŁEGO”.

A CO Z ZASADĄ ZACHOWANIA ENERGII PRZY TŁUMIENIU?

- WARTO JESZCZE NAWIĄZAĆ DO ZNAJOMEJ KAŻDEMU ZASADY ZACHOWANIA ENERGII, W ŚWIETLE DEFINICJI ZJAWISKA TŁUMIENIA:
„MIANEM TŁUMIENIA NAZYWAMY ZMNIEJSZANIE SIĘ AMPLITUD DRGAŃ SWOBODNYCH Z UPŁYWEM CZASU AŻ DO ICH ZANIKNIĘCIA, CO SPOWODOWANE JEST STRATAMI ENERGII”.
- NA PIERWSZY RZUT OKA WYDAJE SIĘ, ŻE ZASADA ZACHOWANIA ENERGII JEST TUTAJ PODWAŻONA. PAMIĘTAJMY JEDNAK, ŻE „CAŁKOWITA ENERGIA NIE ZMIENIA SIĘ, ALE MOŻE ZMIENIAĆ FORMĘ”. ZATEM JEŚLI AMPLITUDA DRGAŃ SWOBODNYCH GAŚNIE TO NIE ZNACZY, ŻE ODPOWIEDNIA ILOŚĆ ENERGII GINIE, LECZ NA SKUTEK INTERAKCJI UKŁADU Z OTOCZENIEM PRZETWORZONA JEST DO INNEJ POSTACI, PRZYKŁADOWO WYDZIELAJĄC SIĘ W FORMIE CIEPŁA, Z RACJI TARCIA.

PODSUMOWANIE.

- W RAMACH NINIEJSZEGO DOKUMENTU STARANO SIĘ PRZEDSTAWIĆ INŻYNIERSKIE PODEJŚCIE DO TEMATU TŁUMIENIA, STOSOWNIE DLA POTRZEB JEGO WYKORZYSTANIA W CODZIENNEJ PRACY.
- TRAKTOWANIE ZAGADNIENIA MA CHARAKTER AUTORSKI. UZNANO, ŻE WSZELKIE GRAFIKI, CZY WIZUALIZACJE UŻYTE NA POTRZEBY DOKUMENTU, WINNY BYĆ PRODUKTEM WŁASNYCH DZIAŁAŃ, A NIE POCHODZIĆ Z LITERATURY OBCEGO AUTORSTWA. JEDYNYM WYJĄTKIEM JEST SZKIC MODELU TŁUMIKA NEWTONA, LECZ ZASYGNALIZOWANO JEGO POCHODZENIE, ORAZ WYKORZYSTANO GO TYLKO PO TO, BY ODDAĆ HOŁD DZIEŁU, KTÓRE POWSTAŁO OKOŁO 350 LAT TEMU I NADAL JEST AKTUALNE. MAM WIĘC NADZIEJĘ, ŻE SIR NEWTON NIE BĘDZIE MIAŁ ŻALU O TĘ KRADZIEŻ....
- PROGRAM „MIDAS GTS NX” ZAPEWNIŁ PEŁNĄ FUNKCJONALNOŚĆ W ZAKRESIE MODELOWANIA TŁUMIENIA UKŁADÓW DRGAJĄCYCH, ORAZ ANALIZY UZYSKANYCH WYNIKÓW.



Dziękuję za uwagę.



Paweł Okroj 



601 064 858



biuro@wibro-projekt.com



www.wibro-projekt.com