

The use of the sound level measurement during tests of the resistance of motion in the assembly seat insert-valve-guide for the camless valve drive

Abstract: Experimental researches have been carried out on the research stand, which scheme has been given in the article. Driven magneto-electrically, steel and titanium valves mating with guides and seat inserts made of cast iron have been the object of investigations. The aim of the study has been to derive the parameters characterizing the work of the assembly seat insert - valve - guide. It has been studied the lift and acceleration of the valve, the valve impact force into seat insert, the friction force between valve stem and the guide, the temperature of the guide and of seat insert. The sound level from the impact of valve into its seat insert has been measured, either. Tests have been performed for different values of the valve lift, the frequency of excitation and the temperature for components. The graphs obtained by measuring the sound level as a function of frequency and time, have been included in the article. Also a model of the research stand has been developed using Finite Element Method. In this model it has been obtained distributions of sound pressure and of sound level, contained in the article. The results indicate the non-linear increase in noise levels as a function of excitation frequency, and sound pressure distributions suggest that the measurement microphone placement position during testing..

Key words: camless valvetrain, valve, guide, seat insert, resistance of friction, sounds level

Wykorzystanie pomiaru poziomu hałasu w czasie badań oporów ruchu w układzie gniazdo – zawór – prowadnica, dla bezkrzywkowego napędu zaworu

Streszczenie: Przeprowadzono badania eksperymentalne na stanowisku, którego schemat zamieszczono w artykule. Obiektem badań były napędzane magneto-elektrycznie zawory stalowe i tytanowe współpracujące z żeliwnymi prowadnicami i gniazdami. Celem badań było uzyskanie wartości parametrów charakteryzujących pracę układu gniazdo – zawór – prowadnica. Na stanowisku badano wznios i przyspieszenie zaworu, siłę uderzenia zaworu o gniazdo, siłę oporów tarcia trzonka zaworu o prowadnicę, temperaturę gniazda i temperaturę prowadnicy. Ponadto mierzono poziom hałasu uderzenia zaworu o gniazdo. Badania przeprowadzono dla różnych wartości wzniosu zaworu, częstotliwości wymuszenia oraz temperatury pracy elementów. W wyniku pomiarów uzyskano wykresy poziomu hałasu w funkcji częstotliwości i czasu, zamieszczone w artykule. Opracowano także model stanowiska badawczego z użyciem Metody Elementów Skończonych. W modelu tym uzyskano rozkłady ciśnienia akustycznego i poziomy hałas, zamieszczone w artykule. Uzyskane wyniki wskazują na nieliniowy wzrost poziomu hałasu w funkcji częstotliwości wymuszenia, zaś rozkłady ciśnienia akustycznego sugerują miejsce umiejscowienia mikrofonu pomiarowego w czasie badań.

Słowa kluczowe: rozrząd bezkrzywkowy, zawór, prowadnica, gniazdo, opory ruchu, poziom hałasu

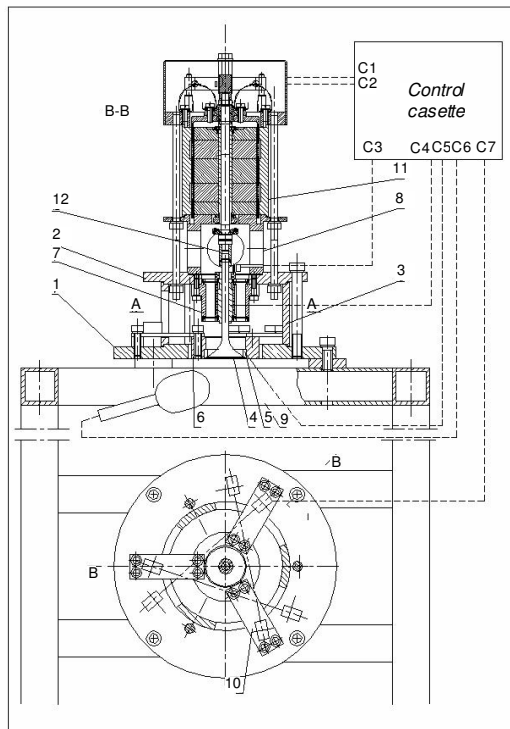
1. Wprowadzenie

Ostatnio w niektórych nowoczesnych silnikach spalinowych pojazdów zaczęto wykorzystywać bezkrzywkowy napęd zaworów rozrządu. Najczęściej wykorzystywany jest elektromechaniczny [1-4] i elektrohydrauliczny [5-7]. Podczas badań laboratoryjnych badane były także silniki z elektro-pneumatycznym [8] i magneto-elektrycznym [9] napędem. Oprócz badań silnikowych, prowadzone są intensywne badania pozasilnikowe takich rozrządów na specjalnych stanowiskach badawczych. Magneto-elektryczny siłownik był wykorzystywany do napędu zaworu podczas modelowych badań zjawisk tribologicznych zachodzących w układzie prowadnica –zawór - gniazdo. Obiektem badań były zawory stalowe i tytanowe współpracujące z żeliwnymi prowadnicami i gniazdami. Celem badań było uzyskanie wartości parametrów charakteryzu-

jących pracę układu gniazdo – zawór – prowadnica. Na stanowisku badano wznios i przyspieszenie zaworu, siłę uderzenia zaworu o gniazdo, siłę oporów tarcia trzonka zaworu o prowadnicę, temperaturę gniazda i temperaturę prowadnicy. Ponadto mierzono poziom hałasu uderzenia zaworu o gniazdo.

Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 1. . Na stanowisku tym podstawa 1, połączona była z pokrywą 2 i korpusem 3 za pomocą śrub. Zawór 4 uderzał w gniazdo 5 osadzone w specjalnej obudowie 6 związanej z układem trzech płaskich sprężyn pomiarowych 10, których ugięcia były mierzone za pomocą czujnik siły uderzenia zaworu o gniazdo. Na pokrywie 2 zamontowano zespół prowadnicy zaworu 7, z umieszczoną w nim termoparą C4 i cewką grzejną, a także wspornik 8 z otworami, na którym umocowano za pomocą śrub zespół napędu

11. Zespół napędu połączono z zaworem za pomocą łącznika 12. Całość zamontowano na ramie 9, posiadającą możliwość poziomowania. Czujnik wzniosu zaworu C1 i czujnik przyspieszenia zaworu C2 zamontowano w zespole napędu. Czujnik siły tarcia między trzonkiem zaworu i prowadnicą umieszczono w jednym z otworów wspornika 8. W otworach obejmy 6 były umieszczone termopary gniazda zaworu C5., C6 – sonometr, C7 – czujnik siły uderzenia zaworu o gniazdo



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego. 1 – podstawa, 2 – pokrywa, 3 – korpus, 4 – zawór, 5 – gniazdo zaworu, 6 – obejma gniazda zaworu, 7 – zespół prowadnicy zaworu, 8 – wspornik, 9 – rama, 10 – płaska sprężyna, 11 – zespół napędu, 12 – łącznik, C1 – czujnik wzniosu zaworu, C2 – czujnik przyspieszenia zaworu, C3 – czujnik siły tarcia między trzonkiem zaworu i prowadnicą, C4 – termopara prowadnicy, C5 – termopara gniazda zaworu, C6 – sonometr, C7 – czujnik siły uderzenia zaworu o gniazdo

2. Model rozchodzenia się fali akustycznej

Przyjęto następujące założenia:

- występujące w modelowanym obszarze powietrze jest płynem jest ściśliwym, nielepkiem, nie istnieje żaden wyróżniony przepływ, średnia gęstość i ciśnienie są jednorodne w całym obszarze powietrza.

- równanie fali akustycznej w powietrzu ma postać (1)

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0 \quad (1),$$

gdzie: P – ciśnienie akustyczne, $c = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}}$ – prędkość dźwięku w powietrzu, E – moduł sprężystości płynu, ρ_0 – gęstość powietrza, t – czas.

- równanie ruchu dla elementów stałych struktury są obliczane z zależności (2):

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

gdzie: $[M]$ - macierz mas struktury, $[C]$ - macierz tłumienia struktury, $[K]$ - macierz sztywności struktury, $\{\ddot{u}\}$ - wektor przyspieszenia w węzłach, $\{\dot{u}\}$ - wektor prędkości w węzłach, $\{u\}$ - wektor przemieszczeń w węzłach, $\{F\}$ - wektor obciążenia.

- dla harmonicznie zmieniającego się wymuszenia struktury, wywołane przez nie drgania ciśnienia akustycznego są opisane równaniem (3):

$$\frac{\omega^2}{c^2} \bar{P} - \nabla^2 \bar{P} = 0 \quad (3)$$

gdzie $\omega = 2\pi f$, a f – częstotliwość wymuszenia.

- dla styku elementów powietrza z elementami struktury obowiązuje następująca zależność (4):

$$\{n\}\{\nabla P\} = -\rho_0 \{n\}^T \left\{ \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{u\} \right\} \quad (4)$$

gdzie: $\{n\}$ – jednostkowy wektor normalny do powierzchni powietrza, ρ_0 – gęstość powietrza, $\{u\}$ – wektor przemieszczeń węzłów struktury, stykających się z powietrzem.

- na granicy płynu przyjęto pełną absorpcję dźwięku, według zależności (5):

$$\int_{vol} \delta P \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} d(vol) - \int_{vol} \delta P \nabla^2 P d(vol) + \int_S \delta P \left(\frac{r}{\rho_0 c} \right) \frac{1}{c} \nabla^2 P \frac{\partial P}{\partial t} d(S) = 0 \quad (5)$$

gdzie: r – współczynnik absorpcji na granicy powietrza.

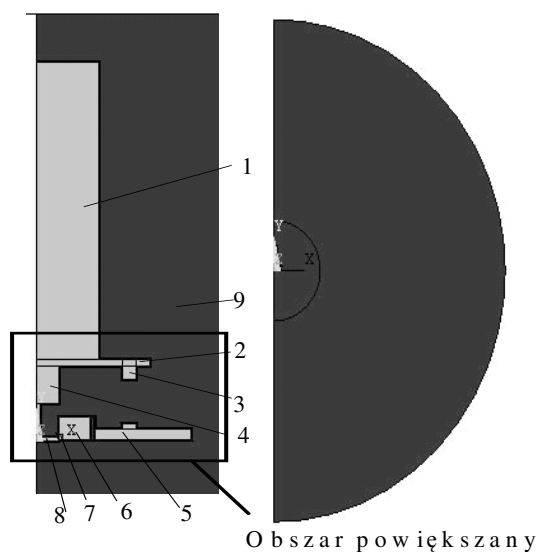
Obliczenia rozkładu ciśnienia akustycznego na stanowisku badawczym do pomiaru oporów ruchu między trzonkiem zaworu i prowadnicą, siły uderzenia zaworu o gniazdo, wzniosu i przyspieszenia układu zawór – ruchoma cewka napędu, poziomu hałasu wykonano w modelu tego stanowiska wykonanego przy użyciu elementów skończonych

nych. Geometrię tego modelu przedstawia rysunek 2.

Dla uproszczenia obliczeń przyjęto założenia:

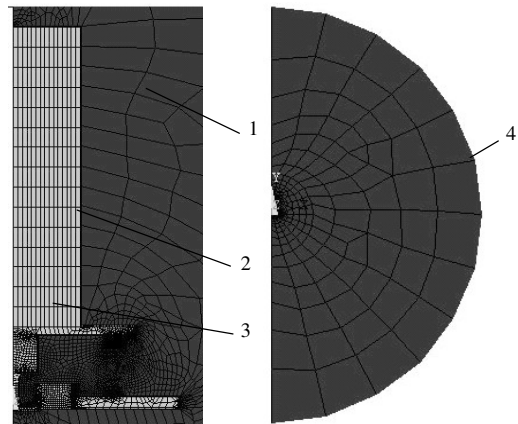
- model jest osiowoosymetryczny,
- pominięto istnienie trzech sprężyn pomiarowych łączących zespół gniazda z pokrywą dolną stanowiska,
- trzy rzeczywiste otwory we wsporniku rozciągają się na całym obwodzie wspornika,
- wszystkie modelowane struktury stałe są jednorodnymi bryłami.

Siatka elementów skończonych została wykonana automatycznie przez program komercyjny i przedstawiona na rysunku 3. Przedstawiono też na nich warunki brzegowe. Dla struktur metalowych wykorzystano czterowęzłowe płaskie elementy skończone PLANE42 [10] o stopniach swobody ruchu w kierunku osi OX i OY. Dla obszaru powietrza, w którym obliczano rozkład ciśnienia akustycznego wykorzystano czterowęzłowy element FLUID29 [10], w którym stopniem swobody jest ciśnienie. Dla jednoelementowej warstwy powietrza bezpośrednio stykającej się z elementami metalowej struktury użyto czterowęzłowych elementów FLUID29, w których stopniami swobody były ciśnienie i przemieszczenia w kierunku osi OX i OY. Na granicy obszaru otaczającego powietrza wprowadzono dwuwęzłowe elementy FLUID129 [10] reprezentujące efekt absorpcji dźwięku przez obszar powietrza rozciągający się do nieskończoności, poza obszarem złożonym z elementów FLUID29. Jako obciążenie wprowadzono siły w węzłach leżących na linii styku gniazda i zaworu i działające w kierunku prostopadłym do tej linii. Przeprowadzono analizę harmoniczną w zakresie wymuszeń 3 – 30 Hz, co odpowiadało częstotliwościom wymuszeń używanych w czasie badań eksperymentalnych.



Rys. 2. Schemat geometrii modelu. 1 – napęd, 2 – pokrywa górna, 3 – wspornik, 4 – zespół prowad-

nicy, 5 – pokrywa dolna, 6 – zespół gniazda, 7 – gniazdo, 8 – zawór, 9 – powietrze



Rys. 3. Siatka elementów skończonych i warunki brzegowe. 1 – FLUID29, 2 – FLUID29, 3 – PLANE42, 4 – FLUID129.

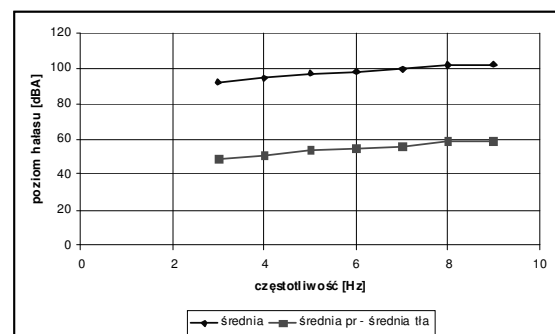
Jako wartość ciśnienia odniesienia przyjęto $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Pozwoliło to wyznaczyć poziom hałasu L_p w decybelach według zależności (6).

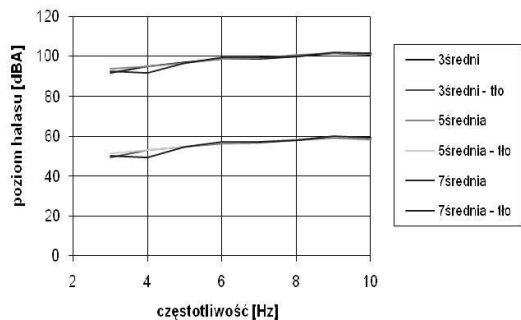
$$L_p(t) = 20 \log_{10} \frac{p_t}{p_{ref}} \quad (6)$$

3. Wyniki pomiarów hałasu na stanowisku eksperymentalnym

Na rysunku 4, pokazano wyniki badań poziomu hałasu w funkcji częstotliwości wymuszenia dla warunków: wznios zaworu 4 mm, zawór stalowy, temperatura przewodnicy i gniazda 293 K, zaś wyniki dla różnych wzniosów zaworu na rysunku 5.

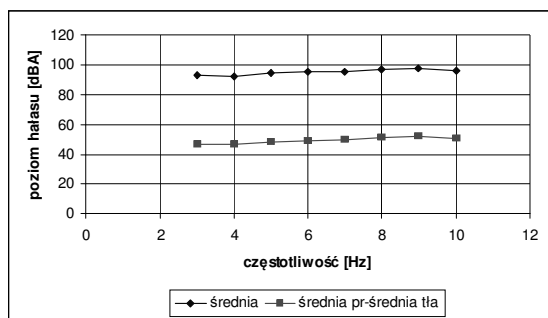


Rys. 4. Wykres średniego poziomu hałasu w funkcji częstotliwości (skok zaworu 4 mm). Skalę częstotliwości trzeba pomnożyć przez 3.2



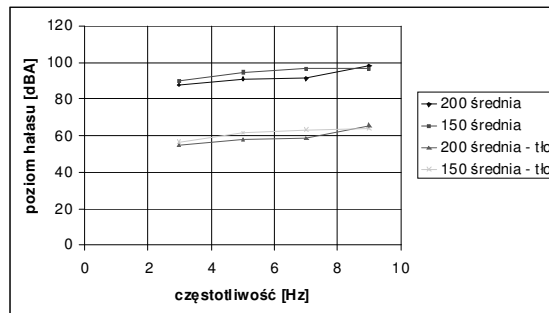
Rys. 5. Wykres średniego poziomu hałasu w funkcji częstotliwości, dla różnych wzniosów zaworu odpowiednio: 3 – 2.4 mm, 5 – 4 mm, 7 – 5.6 mm. Skalę częstotliwości trzeba pomnożyć przez 3.2

Na rysunku 6 pokazano wyniki badań poziomu hałasu w funkcji częstotliwości wymuszenia dla warunków: wznios zaworu 4 mm, zawór stalowy, temperatura zaworu i gniazda 293 K, temperatura przewodnicy 320 K.

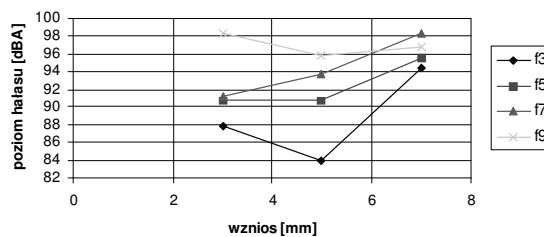


Rys. 6. Wykres średniego poziomu hałasu w funkcji częstotliwości. Skalę częstotliwości trzeba pomnożyć przez 3.2

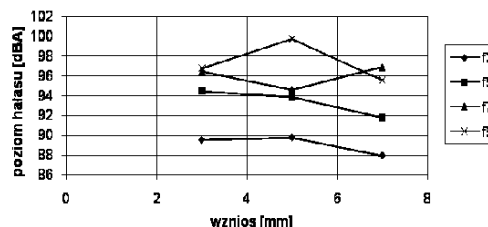
Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań poziomu hałasu w funkcji częstotliwości wymuszenia dla warunków: skok zaworu 4 mm, zawór stalowy, przewodnica i gniazdo żeliwne, temperatura przewodnicy 293 K, temperatura gniazda 440 i 490 K. Wyniki badań poziomu hałasu w funkcji wzniosu i częstotliwości, dla tych temperatur zamieszczono na rysunkach 8 – 9. Wykres średniego poziomu hałasu w funkcji częstotliwości, dla różnych wartości wzniosu zaworu tytanowego pokazano na rysunku 10.



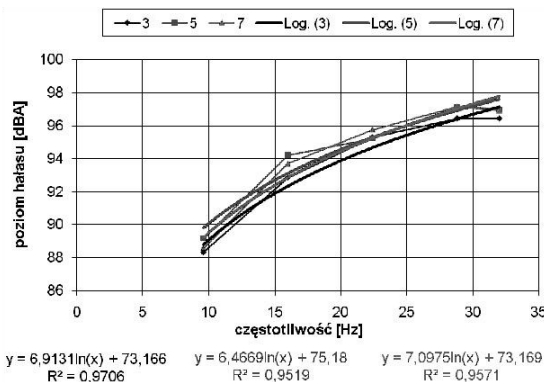
Rys. 7. Wykres średniego poziomu hałasu w funkcji częstotliwości, dla różnych wartości temperatury gniazda 200 C ~ 490 K, 150 C ~ 440 K.



Rys. 8. Wykres średniego poziomu hałasu w funkcji wzniosu i częstotliwości, dla wartości temperatury gniazda 200 C ~ 490 K. Skalę wzniosu trzeba pomnożyć przez 0.8. Częstotliwość wymuszenia odpowiednio: f3 - 9.6 Hz, f5 - 16 Hz, f7 - 22.4 Hz, f9 - 28.8 Hz



Rys. 9. Wykres średniego poziomu hałasu w funkcji wzniosu i częstotliwości, dla wartości temperatury gniazda 150 C ~ 440 K. Skalę wzniosu trzeba pomnożyć przez 0.8. Częstotliwość wymuszenia odpowiednio: f3 - 9.6 Hz, f5 - 16 Hz, f7 - 22.4 Hz, f9 - 28.8 Hz



Rys. 10. Wykres średniego poziomu hałasu w funkcji częstotliwości, dla różnych wartości wzniosu zaworu odpowiednio: 3 – 2.4 mm, 5 – 4 mm, 7 – 5.6 mm, dla zaworu tytanowego

Ze wzrostem częstotliwości wymuszenia mierzony poziom hałasu wzrastał nieliniowo, w przybliżeniu logarytmicznie.

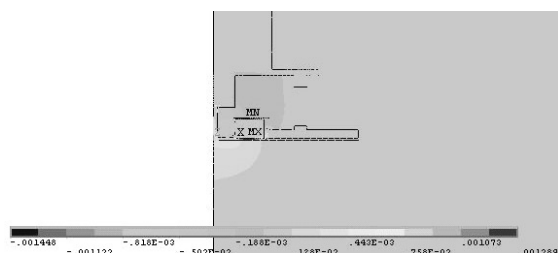
Wzrost ten występował dla wszystkich mierzonych wartości temperatury, choć w różnym stopniu.

Wpływ wzniosu zaworu na poziom hałasu był praktycznie niezauważalny. Wynikało to ze stabilności algorytmu sterującego ruchem zaworu, dzięki któremu było możliwe wystarczająco dokładne i powtarzalne wyhamowanie zaworu, przed osiadaniem w gnieździe.

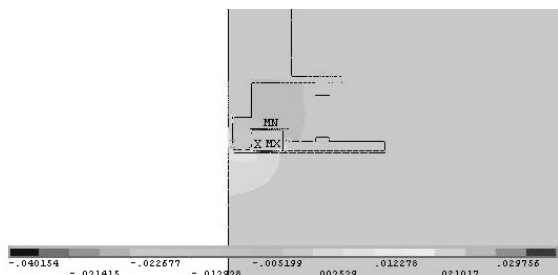
Wpływ temperatury nie był jednoznaczny. W niższych temperaturach gniazda (293 i 440 K) obserwowano raczej niewielki spadek poziomu hałasu, ze wzrostem wzniosu zaworu. Z kolei przy wyższej temperaturze gniazda (490 K) poziom hałasu nieco wzrastał wraz ze wzniosem zaworu. Prawdopodobnie mógł mieć tu wpływ rozszerzalność cieplna elementów stanowiska.

4. Wyniki obliczeń z badań symulacyjnych poziomu hałasu

Rozkład rzeczywistej części ciśnienia akustycznego, dla częstotliwości 5.7 Hz pokazano na rysunku 11, a dla częstotliwości 30 Hz na rysunku 12. Przemieszczenie dla częstotliwości 30 Hz przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 11. Ciśnienie akustyczne, część rzeczywista dla częstotliwości wymuszenia 5.7 Hz



Rys. 12. Ciśnienie akustyczne, część rzeczywista dla częstotliwości wymuszenia 30 Hz

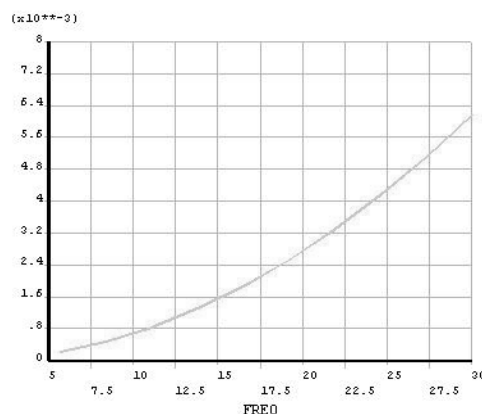


Rys. 13. Przemieszczenie, część rzeczywista dla częstotliwości wymuszenia 30

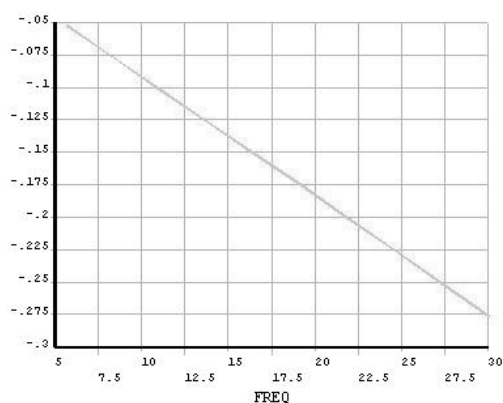
Jak można było oczekiwać, największe przemieszczenia, o charakterze zanikających drgań, występujące w czasie uderzenia zaworu o gniazdo, dotyczyły grzybka zaworu i obejmy z gniazdem współpracującej z układem sprężyn pomiarowych. Obliczona amplituda tych ruchów osiągała wartość 0.05 mm.

Jeszcze około 3 cm od uderzającego zaworu o gniazdo, można obserwować zwiększone natężenie poziomu hałasu.

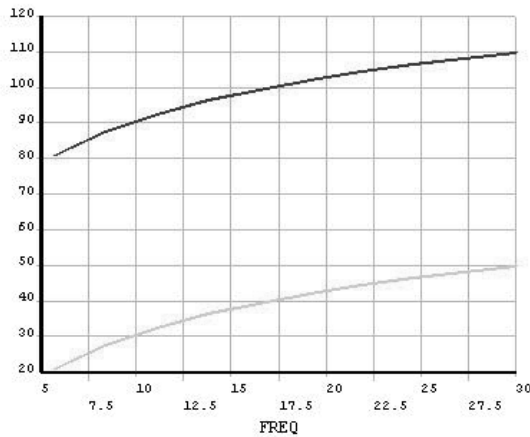
Obliczone ciśnienie akustyczne i poziom hałasu w funkcji częstotliwości wymuszenia pokazano na rysunkach 14 – 17.



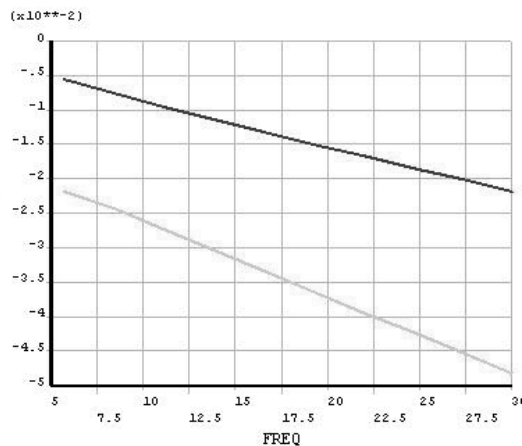
Rys. 14. Ciśnienie akustyczne w funkcji częstotliwości wymuszenia - amplituda sygnału



Rys. 15. Ciśnienie akustyczne w funkcji częstotliwości wymuszenia - przesunięcie fazowe sygnału ciśnienia względem wymuszenia



Rys. 16. Poziom hałasu wypadkowy (czarna linia) i różnicowy (szara linia), z uwzględnieniem poziomu tła, w funkcji częstotliwości wymuszenia - amplituda sygnału



Rys. 17. Poziom hałasu wypadkowy (czarna linia) i różnicowy (szara linia), z uwzględnieniem poziomu tła, w funkcji częstotliwości wymuszenia - przesunięcie fazowe sygnału ciśnienia względem wymuszenia

Można stwierdzić, że ze wzrostem częstotliwości wymuszenia obliczeniowy poziom hałasu narasta nieliniowo, w sposób logarytmiczny.

5. Podsumowanie

Ze wzrostem częstotliwości wymuszenia ciśnienie akustyczne rośnie w przybliżeniu eksponencjalnie, a poziom hałasu mierzony i obliczeniowy narasta nieliniowo, w sposób zbliżony do logarytmicznego.

W czasie pomiaru poziomu hałasu w przypadku otwartej przestrzeni, na przykład, na stanowisku pozasilnikowym, mikrofon również powinien być umieszczony w pewnej odległości, około 3 cm od zaworu uderzającego w gniazdo.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

$[M]$	macierz mas struktury,
$[C]$	macierz tłumienia struktury,
$[K]$	macierz sztywności struktury,
$\{\ddot{u}\}$	wektor przyspieszenia w węzłach,
$\{\dot{u}\}$	wektor prędkości w węzłach,
$\{u\}$	wektor przemieszczeń w węzłach,
$\{F\}$	wektor obciążenia,

$\{n\}$	jednostkowy wektor normalny do powierzchni powietrza,
f	częstotliwość wymuszenia,
r	współczynnik absorpcji na granicy powietrza.
ρ_0	gęstość powietrza.
L_p	poziom hałasu

Bibliography/Literatura

- [1] Boie C., Kemper H., Kather L., Corde G.: Method for Controlling a Electromagnetic Actuator for Achieving a Gas Exchange Valve On a Reciprocating Internal Combustion Engine, US Patent 6340008, 2000
- [2] Haskara I., Mianzo L., Kokotovic V.: Method of Controlling an Electromagnetic Valve Actuator, US Patent 6644253, 2001
- [3] Schneider L.: Electromagnetic Valve Actuator with Mechanical End Position Clamp or Latch, US Patent 6267351, 2001

-
- [4] Theobald M., Lequesns B., Henry R.: Control of Engine Load via Electromagnetic Valve Actuators, SAE 940816, 1994
- [5] Sturman O.: Hydraulic Actuator for an Internal Combustion Engine, US Patent 5638781, 1994
- [6] Sun Z., Cleary D.: Dynamics and Control of an Electro-Hydraulic Fully Flexible Valve Actuation System, Proceedings of American Control Conference, Denver, Colorado, June, 2003
- [7] Wright G., Schechter N., Levin M.: Integrated Hydraulic System For Electrohydraulic Valvetrain and Hydraulically Assisted Turbocharger, US Patent 5375419, 1994
- [8] Ma J., Schock H., Carlson U., Høglund A., Hedman M.: Analysis and Modelling of an Electronically Controlled Pneumatic Hydraulic Valve for Automotive Engine, SAE 2006-01-0042
- [9] Zbierski K.: Bezkrzywkowy magnetoelektryczny rozrząd czterosuwowego silnika spalinowego. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź, listopad 2007
- [10] ANSYS v. 11.0 - documentation on-line

Mr Siczek Krzysztof, DEng. – in the Mechanical Faculty at the Technical University of Lodz.

Dr inż. Krzysztof Siczek – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej

