ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: BUDOWNICTWO z. 93 Nr kol. 1514

Artur NOWOŚWIAT*
Politechnika Śląska

WYKORZYSTANIE FUNKCJI PRZENIESIENIA MODULACJI MTF SYGNAŁU W BADANIACH AKUSTYKI WNĘTRZ

Streszczenie. Opracowanie zawiera podstawowe definicje dotyczące tzw. „dobrej akustyki" pomieszczeń zamkniętych. Przedstawiono także analizę funkcji MTF opartą na rozważaniach zaproponowanych przez Houtgasta i Steenekena [3]. Przedstawiono koncepcję dotyczącą fizycznej oceny zrozumiałości mowy opierając się na wyznaczonej w pomieszczeniach funkcji przenoszenia modulacji amplitudowej MTF.

APPLICATION OF THE TRANSFER FUNCTION OF MTF MODULATIONS OF A SIGNAL IN INVESTIGATIONS CONCERNING INTERIOR ACOUSTICS

Summary. The paper deals with the fundamental definitions concerning the so-called "good acoustics" of interiors as well as with an analysis of the MTF function basing on considerations suggested by Houtgast and Steeneken [3]. A concept has been put forward concerning the physical assessment of the intelligibility of human speech basing on the transfer function of the amplitudinal modulation MTF.

1. Wprowadzenie

Funkcja MTF (Modulation Transfer Function) [2, 3, 4, 8] znajduje duże zastosowanie jako narzędzie matematyczne w badaniach akustyki sal o przeznaczeniu koncertowym i audytoryjnym z punktu widzenia dobrej słyszalności zarówno dźwięku słownego, jak również muzycznego. Może być ona stosowana zarówno do oceny akustycznej istniejących już sal, jak i w badaniach symulacyjnych, np. w fazie projektowania wnętrz o określonym charakterze.

Celem tego artykułu jest omówienie związku tej funkcji z funkcją odpowiedzi impulsowej pomieszczenia oraz z jej wykorzystaniem do oceny zrozumiałości mowy w pomieszczeniu. Przytoczono w nim wyniki badań nad wpływem zmian głębokości modulacji na zrozumiałość dźwięków mowy w pomieszczeniach, prowadzonych przez Houtgasta Steenekena [2, 3].

*Opiekun naukowy: Dr hab. Tadeusz Zakrzewski, prof. PŚl.

Przedstawili oni koncepcję dotyczącą fizycznej oceny zrozumiałości mowy, opierając się na wyznaczonej w pomieszczeniach funkcji przeniesienia modulacji amplitudowej MTF. Ograniczymy się tutaj tylko do omówienia wykorzystania MTF, uwzględniającej modulację amplitudową sygnałów, nie zajmując się wynikami interesujących badań dotyczących ich modulacji częstotliwościowej w pomieszczeniu [9]- funkcji FMTF (Frequency Modulation Transfer Function).

Do podstawowych wielkości fizycznych charakteryzujących własności akustyczne pomieszczeń zalicza się:

a) odległość źródła dźwięku od miejsca rejestracji (odbiornika) r ,

b) czas pogłosu T,

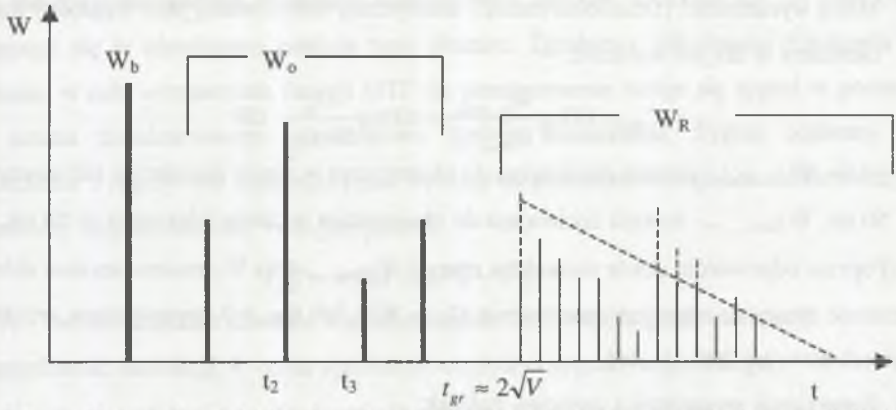
c) objętość sali V,

d) stosunek S/N (stosunek sygnału do szumu).

Opierając się na wyszczególnionych wielkościach charakteryzujących akustykę wnętrz utworzono wiele estymat akustycznych mających zastosowanie w rozważaniach teoretycznych, w których wykorzystywane są funkcje MTF.

2. Wielkości określające akustykę pomieszczenia zamkniętego

W badaniach dotyczących optymalizacji akustycznej pomieszczeń istotną rolę, obok przebiegu statystycznie zróżnicowanych odbić dźwięku od powierzchni ograniczających pomieszczenie, kształtujących czas pogłosu, odgrywa także stosunek energii akustycznej odbić początkowych W_o do energii akustycznej dźwięku bezpośredniego W_b. Aby pomieszczenie spełniało warunki dobrego odbioru dźwięku w każdym punkcie lokalizacji widowni należy zapewnić takie wielkości charakteryzujące akustykę wnętrz, aby dźwięk bezpośredni docierał do obserwatora możliwie najmniej zakłócony [1, 9, 13, 14, 15, 16,17]. Na rys.1. przedstawiony został echogram uzyskany w wyniku analizy geometrycznych odbić promieni akustycznych [9]. Poszczególne fale dźwiękowe docierają do odbiornika z określonymi opóźnieniami czasowymi t_1, t_2,..., t_i liczonymi od chwili, gdy w punkcie rejestracji pojawiła się fala bezpośrednia.



Rys. 1. Schemat ideowy odpowiedzi impulsowej pomieszczenia zamkniętego w warunkach generacji dźwięku [1,9]

Fig. 1. Diagram of impulse response of a closed space during the generation of sounds [1, 9]

Oznaczenia:

t_1 – czas pomiędzy dźwiękiem bezpośrednim a pierwszym odbiciem,

t_{gr} – czas graniczny (czas, po upływie którego stosunek energii dźwięku rozproszonego do energii dźwięku bezpośredniego jest bliski jedności),

V – objętość w m^3, W_b – energia dźwięku bezpośredniego, W_o – energia dźwięku odbić początkowych do czasu t_{gr}, W_R – energia dźwięku rozproszonego.

Do oceny kryterialnej stopnia zrozumienia poszczególnych zgłosek w akustyce wnętrz stosowane są różne miary jakości akustycznej pomieszczeń, wśród których za najważniejsze uważa się [7]:

- Wyrazistość D jest to stosunek energii akustycznej dochodzącej do punktu obserwacji w okresie czasu τ po wyłączeniu źródła do całkowitej energii, która dochodzi do tego punktu:

$$D = \frac{\int_0^{\tau} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt} \tag{1}$$

gdzie: p – chwilowa wartość ciśnienia akustycznego

- Wyrazistość według [1] określa się jako stosunek energii docierającej do punktu odbioru w czasie $\tau \leq 50$ ms po nadaniu sygnału do energii całkowitej w pomieszczeniu [1]:

$$D_{50} = \frac{W_{0...50ms}}{W_C} \tag{2}$$

➢ Miarą wyrazistości (Deutlichkeitsmaβ) akustycznej definiowanej jako względny parametr określany w dB jest wielkość:

$$C_{50} = 10\log\frac{W_{0...50ms}}{W_{50ms...\infty}} = 10\log\frac{D_{50}}{1-D_{50}} \text{ dB} \tag{3}$$

gdzie: $W_{0.....50ms}$ - energia docierająca do obserwatora w czasie mniejszym lub równym, 50 ms, $W_{50ms.....\infty}$ - energia docierająca do obserwatora w czasie większym od 50 ms.

Poprzez odpowiedni dobór stosunków energii $W_{50ms.....\infty}$ oraz W_C można uzyskać dobrą wyrazistość mowy ze stopniem zrozumienia $D_{50} > 50\%$ lub $C_{50} > 0$ zapewniającą zrozumienie zgłosek powyżej 70% [1 , 10].

➢ Pogorszenie wyrazistości wymowy zgłosek:

$$AI_{const} \approx 0{,}65\left(\frac{d}{r_s}\right)^2 T\ \% \tag{4}$$

gdzie: d – odległość pomiędzy źródłem dźwięku a obserwatorem w [m];

$r_s \cong 0{,}14\sqrt{A}$ - odległość graniczna [m], A - chłonność akustyczna pomieszczenia,

T - czas pogłosu w [s].

Aby uzyskać pożądaną zrozumiałość dźwięku słownego, wartość AI_{const} powinna być mniejsza od ok. 15%, natomiast dobrą zrozumiałość dźwięku uzyskuje się dla wartości AI_{const} mniejszej od 10%. Wartości te uzależnione są od stosunku odległości słuchacza do odległości granicznej. Wartości dla AI_{const} są szczególnie zalecane dla dużych odległości między mówcą a słuchaczem. Przy użyciu głośników emitujących dźwięk w szerokim paśmie przenoszenia, wartości AI_{const} mogą zostać znacznie polepszone. Uzupełnieniem wyżej opisanych miar akustycznych są dwie dodatkowe wielkości stosowane jako kryteria zrozumiałości związane z odpowiedzią impulsową pomieszczenia, wykorzystywane coraz częściej do oceny zrozumienia zarówno dźwięku słownego, jak również muzycznego, określane w literaturze jako STI (Speech Transmission Index) oraz RASTI (Rapid Speech Transmission Index).

3. Funkcja przenoszenia MTF i wskaźniki STI w akustyce pomieszczenia zamkniętego

Dźwięk słowny charakteryzuje się widmem ciągłym, którego struktura zmienia się szybko w czasie. Z modelowego punktu widzenia można przyjąć, że akustyczne własności pomieszczenia odnośnie do zrozumiałości dźwięku słownego są określone przez obszar, w

którym następują sinusoidalne modulacje intensywności dźwięku docierającego do odbiorcy znajdującego się w określonym punkcie tego obszaru. Zgodnie z założeniami Houtgasta i Steenekena, w celu wyznaczenia funkcji MTF do pomieszczenia nadaje się sygnał w postaci pasma szumu zmodulowanego amplitudowo funkcją sinusoidalną. Sygnał odebrany z pomieszczenia z reguły ma inną niż sygnał wysłany do pomieszczenia głębokość modulacji amplitudowej. Sygnał odebrany więc jest postaci:

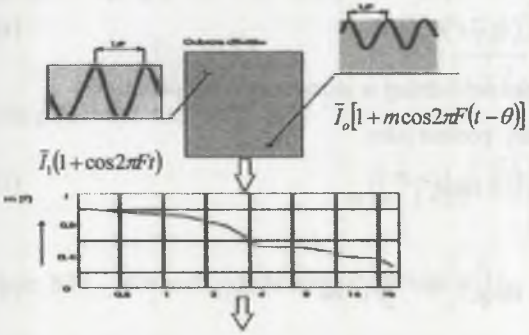
$$\overline{I_0}\left[1 + m\cos 2\pi\, F(t-\theta)\right] \tag{5}$$

gdzie: $\overline{I_o}$ – średnie natężenie dźwięku w pomieszczeniu , m – współczynnik modulacji, F – częstotliwość modulacji, θ – czas opóźnienia względem sygnału wejściowego,

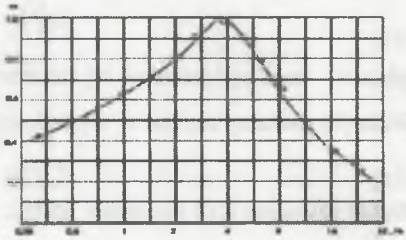
Przeniesienie modulacji amplitudowej Houtgast i Steeneken opisywali miarą logarytmiczną oznaczając ją jako MT (Modulation Transfer)

$$MT = 20\log m(F) \tag{6}$$

Pomiaru wartości współczynników MT dokonuje się w podobny sposób dla wielu częstotliwości modulacji w zakresie typowym dla zmian obwiedni dźwięków mowy, uzyskując w ten sposób przebieg funkcji MTF (rys.2). Zasadniczym osiągnięciem Houtgasta i Steenekena było znalezienie na bazie wartości MT wyznaczonych dla wybranych częstotliwości modulacji i częstotliwości środkowych pasm szumu, fizycznej miary obwiedni amplitudowej STI i jej uproszczonej wersji RASTI [2, 3, 4, 8]. Funkcję m(F) rozpatruje się dla pasma o szerokości Δf odnoszącego się do częstotliwości spotykanych podczas mowy. Pasmo to jest określone przez widmo dźwięku słownego zmieniające się w czasie. Na rys. 3 podano w sposób schematyczny dyskretne zmiany intensywności widma dźwięku słownego w procesie modulacji sygnału wejściowego



Rys. 2. Schemat modulacji częstotliwościowej dźwięku słownego generowanego w pomieszczeniu zamkniętym w warunkach pobudzenia sygnałem modulowanym sinusoidalnie
Fig. 2. Diagram of the frequency modulation of a spoken sound generated in a closed room activated by a harmonic ally modulated signal



Rys. 3. Zmiany modulacyjne częstotliwości wywołane odpowiedzią impulsową układu
Fig. 3. Modulatory variations of frequency caused by the impulsive response of the system

Indeks funkcji MTF jako wykładnik wskaźnika STI

Funkcję m(F) określa się za pomocą odpowiedzi impulsowej układu i stosunku S/N (stosunek sygnał/szum). Zgodnie z teorią liniowych układów fizycznych o stałych parametrach, odpowiedź impulsową r(t) pomieszczenia stanowi jego reakcja na impuls o „kształcie" delta Diraca $\delta(t)$.

$$r(t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t')\delta(t-t')dt' \tag{7}$$

Impuls $\delta(t)$ ma nieskończenie szerokie widmo, które obejmuje wszystkie możliwe częstotliwość drgań własnych układu. Znajomość r(t) w celu pobudzenia pomieszczenia sygnałem wejściowym pozwala na obliczenie odpowiedzi pomieszczenia w punkcie rejestracji.

Pokażemy za autorami [3, 10], że funkcja przenoszenia m(F) oraz odpowiedź impulsowa pomieszczenia r(t) są związane przekształceniami Fouriera. W tym celu wykorzystuje się dwa podstawowe równania określające natężenie sygnału wejściowego i sygnału wyjściowego:

natężenie sygnału wejściowego nadanego do pomieszczenia

$$I_i(t) = \bar{I}_i(1+\cos 2\pi Ft) \tag{8}$$

natężenie sygnału wyjściowego odebranego w danym punkcie

$$I_0(t) = \bar{I}_0\{1+m\cos[2\pi F(t-\theta)]\} \tag{9}$$

gdzie: $m=m(F)$ jest funkcją przenoszenia modulacji.

Z drugiej strony natężenie fali dźwiękowej wyjściowej można wyrazić przez zależność:

$$I_0(t) = \int_0^{\infty} I_i(t-t')r(t')dt' \tag{10}$$

gdzie: t' – czas opóźnienia i- tej fali dźwiękowej odbitej w stosunku do fali padającej.

Wzór (8) możemy zapisać w wygodniejszej postaci jako:

$$I_i(t) = \bar{I}_i\left(1+\mathrm{Re}\left\{e^{2\pi jFt}\right\}\right) \tag{11}$$

Wtedy równanie (10) przyjmuje postać:

$$I_0(t) = \int_0^{\infty} \bar{I}_i\left(1+\mathrm{Re}\left\{e^{2\pi jF(t-t')}\right\}\right)r(t')dt' \tag{12}$$

albo

$$I_0(t) = \bar{I}_i\left[\int_0^{\infty} r(t')dt' + \mathrm{Re}\left\{e^{2\pi jFt}\int_0^{\infty} e^{-2\pi jFt'}r(t')dt'\right\}\right] \tag{13}$$

Wprowadzamy następujące oznaczenia:

$$a = \int_0^{\infty} r(t')dt', \quad b = \int_0^{\infty} e^{-2\pi jFt'} r(t')dt',$$

Wówczas równanie (13) przyjmuje następującą postać:

$$I_0(t) = a\bar{I}_i\left(1 + \frac{1}{a}\mathrm{Re}\left\{be^{2\pi jFt}\right\}\right) \tag{14}$$

Wykorzystując następnie równania (9) i (14) otrzymujemy przez porównanie współczynników wyrażenie określające własności funkcji przenoszenia:

$$m = \frac{\mathrm{mod}|b|}{a} \tag{15}$$

albo

$$m(F) = \frac{\left|\int_0^{\infty} e^{2\pi jFt} r(t)dt\right|}{\int_0^{\infty} r(t)dt} \tag{16}$$

Wynika stąd, że m(F) równa się modułowi znormalizowanej całki Fouriera przyporządkowanej odpowiedzi impulsowej r(t).

W przypadku zakłócenia szumem o natężeniu I_s pojawia się dodatkowy czynnik modulacji m_s, zależny od stosunku $\bar{I}_0/I_s$. Sumaryczne natężenie w obecności szumu będzie więc:

$$\begin{aligned} I_C = I_0(t) + I_s &= \bar{I}_0(1 + m\cos 2\pi F(t-\theta)) + I_s = \\ &= \left(\bar{I}_0 + I_s\right)\left(1 + m\frac{\bar{I}_0}{\bar{I}_0 + I_s}\cos 2\pi F(t-\theta)\right) \end{aligned} \tag{17}$$

Widać, że m_s – głębokość modulacji z uwzględnieniem szumu wynosi

$$m_s = m\frac{\bar{I}_0}{\bar{I}_0 + I_s} \tag{18}$$

a dla głębokości modulacji m=1

$$m_s = \left(1 + 10^{\frac{(-S/N)}{10}}\right)^{-1} \tag{19}$$

gdzie: S/N – stosunek sygnał/szum = $(10\log \bar{I}_0/I_s)$.

Uwzględniając powyższe zależności wyrażamy funkcje modulacji przenoszenia m(F) w postaci [3]:

$$m_s(F) = \frac{\left|\int_0^{\infty} e^{2\pi jFt} r(t)dt\right|}{\int_0^{\infty} r(t)dt} \left(1 + 10^{\frac{-S/N}{10}}\right)^{-1} \tag{20}$$

Następnym etapem prowadzącym do określenia wskaźnika STI rodziny funkcji m(F) jest wyznaczenie każdej wartości funkcji m(F) w danym punkcie, gdzie występuje określony stosunek S/N.

$$m_s = \left(1 + 10^{\frac{(-S/N)}{10}}\right)^{-1} \tag{21}$$

Bezpośrednio z powyższego równania możemy wyznaczyć w sposób elementarny zależność:

$$\left(S/N\right) = 10\log\left(\frac{m_s(F)}{1 - m_s(F)}\right) \tag{22}$$

Wprowadzamy teraz następującą definicję:

$$STI \equiv \left(\frac{S}{N}\right)_{app} \tag{23}$$

gdzie „app" – oznacza z angielskiego „apparent", czyli pojawiający się jako wynik przyporządkowania jednej wartości liczbowej wielu funkcjom z rodziny $m_s(F)$.

Celem uzyskania normalizacji wprowadzonego wskaźnika STI należy wykorzystać następujące warunki ograniczające w zakresie dźwięku słownego:

$$\left(S/N\right) > 15\ dB \Rightarrow \left(S/N\right)' = 15\ dB$$

$$\left(S/N\right) < -15\ dB \Rightarrow \left(S/N\right)' = -15\ dB$$

Uwzględniając wyżej przyjęte założenia można określić średnią wartość stosunku sygnał/szum:

$$\overline{\left(S/N\right)} = \frac{1}{18}\sum_{F=0.4}^{20}\left(S/N\right) \tag{24}$$

Wówczas w wyniku znormalizowania średniego stosunku $\overline{\left(S/N\right)}$ otrzymujemy wskaźnik STI wahający się w przedziale od 0 do 1, postaci:

$$STI = \frac{\overline{\left(S/N\right)} + 15}{30} \tag{25}$$

Wskaźnik STI jest wielkością pozwalającą na operatywne liczbowe scharakteryzowanie zachowania się wielu możliwych realizacji funkcji $m_s(F)$ [5, 12].

4. Podsumowanie

Omówione w tym artykule związki funkcji MTF z własnościami akustycznymi pomieszczenia, w szczególności jego funkcji odpowiedzi impulsowej oraz z zrozumiałością mowy, świadczą o tym, że jest ona charakterystyką, której analiza może być użyteczna w praktyce do określania „dobrej akustyki" pomieszczeń. Badania literaturowe dotyczące przeniesienia przez pomieszczenie zmian obwiedni amplitudowej, do których omówienia się tutaj ograniczyliśmy, obejmowały wyłącznie sygnały zmodulowane amplitudowo (częstotliwość lub pasma częstotliwości sygnału nośnego były stałe). Badania te były podstawą do oszacowania metody STI pozwalającej na powiązanie zmian obwiedni amplitudowej w pomieszczeniu, opisanych funkcją MTF, ze zrozumiałością mowy. Przyjęcie przez Houtgesta i Steenekena pasm szumu jako sygnału nośnego i ograniczenie się do modulacji amplitudowej jest jednak w świetle nowych badań [9] uwzględniających modulację częstotliwościową w modyfikacji sygnału w pomieszczeniu (funkcja FMTF- Frequency Modulation Transfer Function) pewnym uproszczeniem rzeczywistych stosunków czasowo-częstotliwościowych sygnałów występujących w nagłośnionym pomieszczeniu. Uproszczenia te nie umniejszają jednak przydatności metod STI w zastosowaniach o charakterze praktycznym (inżynierskim) [5, 12].

LITERATURA

1. Fasold W., Veres E.,: Schallschutz+Raumakustik in der Praxis, Verlag für Brauwesen, Berlin 1998.
2. Houtgast T. Steeneken H.J.M.: The Modulation Transfer Function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility, Acustica **28**, 1973, 66 - 73.
3. Houtgast T. Steeneken H.J.M, Plomp R.: Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function I. General Room Acoustics, Acustica **46**, 1980, 60 - 72.
4. Houtgast T. Steeneken H.J.M: A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in audytoria, J. Acoust. Soc. Am. 77 (3), March 1985, 1069 – 1077.
5. Houtgast T., Steeneken H.J.M.: The Modulation Transfer Function in Room Acoustics, Brüel – Kjaer Techn. Rev. **3**, 1985, 3- 12.

6. Kürer R.: Untersuchungen zur Ausewertung von Impuls messungen in der Raumakustik. Dissertation, Technische Universität, Berlin 1972..
7. Malecki J.: Teoria fal i układów akustyki, PWN, Warszawa 1964.
8. Plomp R., Houtgast T. Steeneken H.J.M: Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function II. Mirror Image Computer Model Applied to Rectangular Rooms, Acustica **46**, 1980, 73 - 81.
9. Rutkowski L: Modyfikacja dźwięków o zmiennej częstotliwości w pomieszczeniach, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1999.
10. Thiele R.: Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen, Acustica **3**, 1953, s. 297.
11. Schroeder M. R.: Modulation Transfer Functions. Definition and Measurement, Acustica **49**, No3, 1981, 179 – 182.
12. Steeneken H.J.M., Houtgast T.: RASTI: a Tool for Avaluating Auditoria, Brüel– Kjaer Techn. Rev. **3**, 1985, 13- 30.
13. Śliwiński A., Brzózka G.: Metody korelacyjne w akustyce, Wydawnictwo UG, Gdańsk 1974.
14. Środecki K., Śliwiński A., Application of correlation methods for an investigation of the acoustic field in a room. Archives of Acoustics 16,2, 1991, 355 – 367.
15. Zakrzewski T.: Projekt akustyki sali Państwowej Szkoły Muzycznej w Kędzierzynie-Koźlu, Ekspertyza badawcza, Gliwice 1998.
16. Zakrzewski T.: Badania własności akustycznych sali widowiskowej w Miejskim Domu Kultury w Czyżowicach, Ekspertyza badawcza, Gliwice 1998.
17. Zakrzewski T.: Akustyka budowlana. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.

Recenzent: Prof. dr hab. Antoni Śliwiński

Abstract

The paper presents an analysis of the MTF function basing on considerations suggested by Houtgast and Steeneken. It also provides fundamental definitions concerning interior acoustics as well as a definition of the STI- index, which is applied to asses the intelligibility of human speech.