

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Pneumatyczne wzmacniacze typu dysza-przysłona przyrządów do pomiaru ciśnień w organizmie człowieka

KRZYSZTOF TOMCZUK¹, RADOSŁAW WERSZKO²

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, ¹INSTYTUT INŻYNIERII LOTNICZEJ, PROCESOWEJ I MASZYN
ENERGETYCZNYCH, ²INSTYTUT KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN

Słowa kluczowe: pneumatyczne wzmacniacze, dysza-przysłona, ciśnienie wewnątrzczaszkowe, ciśnienie wewnątrzgałkowe, fala tętna krwi

STRESZCZENIE

Miniaturowy wzmacniacz typu dysza-przysłona jest głównym podzespołem przyrządów do pomiaru ciśnienia wewnątrzczaszkowego i wewnątrzgałkowego oraz fali tętna krwi. Wzmacniacz jest wyposażony w gumową membranę, spełniającą rolę przysłony. Dzięki temu wzmacniacz uzyskuje ujemne sprzężenie zwrotne. Stosunkowo mała średnica membrany (4,5 – 6,5 mm) stwarza pewne problemy przy projektowaniu wzmacniaczy, związane z zapewnieniem im zadowalającej dokładności statycznej i dynamicznej. Zostały one pokonane dzięki odpowiedniemu doborowi odsadzenia dyszy, oporności dławika i ciśnienia powietrza zasilającego.

Pneumatic nozzle-flapper amplifiers of the sensors for measuring pressures in a body of the man

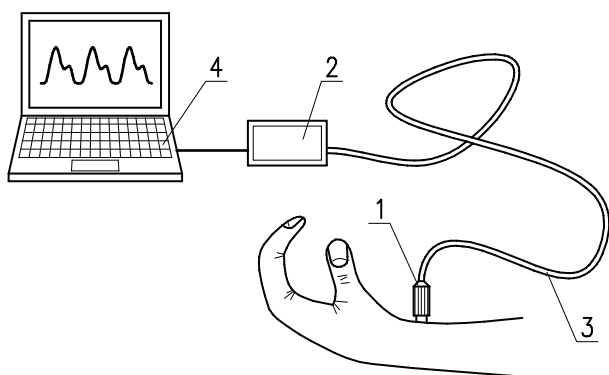
Keywords: pneumatic amplifier, nozzle-flapper, intracranial pressure, intraocular pressure, blood pressure waveform

ABSTRACT

A miniature nozzle-flapper amplifier is a main part of the sensors for measuring intracranial and intraocular pressures, as well as blood pressure waveform. The amplifier is equipped with a rubber membrane, which plays a role of the flapper. Thanks to this the amplifier gets a negative feedback. A small diameter of the membrane (4.5 – 6.5 mm) makes up some design problems, connected with a steady-state and dynamic accuracy. The problems have been overcome by adequate choice of the nozzle offset, capillary resistance, and supply pressure.

1. WSTĘP

Wzmacniacz typu dysza-przystona jest podstawowym podzespołem pneumo-elektrycznych przyrządów do pomiaru takich wielkości jak ciśnienie wewnątrzczaszkowe [1], fala tętna krwi [2] oraz ciśnienie wewnątrzgałkowe [3]. Przyrządy te charakteryzuje bardzo prosta budowa i nieskomplikowane wytwarzanie, całkowite bezpieczeństwo pod względem porażenia prądem elektrycznym, niewrażliwość na zmiany temperatury otoczenia i ciała pacjenta, zadowalająca dla praktyki lekarskiej dokładność pomiarów, zarówno statycznych, jak i dynamicznych. Jako przykład – na Rysunku 1 – przedstawiono opracowany w Politechnice Wrocławskiej przyrząd do pomiaru fali tętna krwi. Czujnik 1 jest zasilany sprężonym powietrzem z interfejsu 2 elastyczną rurką 3. W interfejsie tym następuje również przetwarzanie pneumatycznego sygnału pomiarowego na postać cyfrową i przekazywanie go do komputera 4, spełniającego rolę rejestratora i analizatora fali tętna krwi.



Rysunek 1 Przyrząd do pomiaru i rejestracji fali tętna krwi
Figure 1 Blood pressure waveform monitoring device

Pomiar przeprowadza się w następujący sposób. Czujnik przykładają do ciała pacjenta w takim miejscu, gdzie bezpośrednio pod skórą przebiega tętnica z wyczuwalnym tętnem (np. nadgarstek). Następnie, upewniwszy się, że czujnik znajduje się dokładnie nad tętnicą, stopniowo dociska się go do tej tętnicy. Po jednorazowym docisku pomiar jest skończony, a na ekranie pojawia się zarejestrowany przebieg fali tętna krwi oraz charakteryzujące ten przebieg wielkości, którymi posługują się lekarze

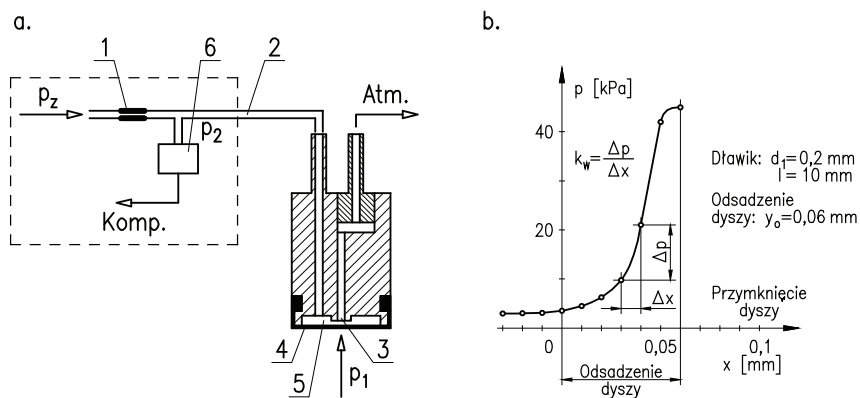
przy diagnozowaniu i określaniu ryzyka chorób układu krążenia. Pomiar jest bezkrwawy, a więc całkowicie bezpieczny. Nie jest też uciążliwy dla pacjenta, bo nie wstrzymuje przepływu krwi.

2. BUDOWA WZMACNIACZA

Na Rysunku 2a pokazano schemat konstrukcyjny wzmacniacza stosowanego przy pomiarach fali tętna krwi, ciśnienia wewnątrzgałkowego i ciśnienia ciemniaczkowego (u noworodków). Składają się na niego: dławik 1, przewód zasilający 2, dysza odpowietrzająca 3 i elastyczna membrana 4 w roli przystony.

Gdy ciśnienie mierzone p_1 , działające na membranę 4 z zewnątrz, jest równe ciśnieniu atmosferycznemu, powietrze zasilające przepływa przez dławik 1 oraz komorę pomiarową 5 i przez szczelinę (rzędu setnych części milimetra) pomiędzy krawędzią dyszy 3 i membraną 4 bez przeszkód uchodzi do atmosfery. Ciśnienie p_2 , jakie panuje w tej sytuacji w komorze pomiarowej 5 i na wejściu przetwornika 6, jest zbliżone do ciśnienia atmosferycznego. Natomiast, gdy ciśnienie mierzone p_1 wzrasta powyżej ciśnienia atmosferycznego, wówczas następuje ugięcie membrany 4 w kierunku dyszy odpowietrzającej 3 oraz jej przyamykanie. W wyniku tego ciśnienie p_2 w komorze pomiarowej wzrasta do takiej wartości, przy której wystąpi równowaga sił działających na membranę z obydwu stron. W praktyce, ciśnienie p_2 przyjmuje wartość zbliżoną do wartości ciśnienia mierzonego p_1 (jest to wynik ujemnego sprzężenia zwrotnego).

Specyficznymi cechami rozpatrywanego wzmacniacza są bardzo małe, jak na warunki przemysłowe, wymiary oraz występowanie membrany



Rysunek 2 Wzmacniacz typu dysza-przystona: a) schemat konstrukcyjny, b) charakterystyka statyczna

Figure 2 Nozzle-flapper amplifier: a) design diagram, b) steady state characteristic

w charakterze przysłony. Jej średnica wynosi od 4,5 do 6,5 mm, podczas gdy przemysłowe urządzenia tego typu (np. reduktory lub zadajniki ciśnienia) mają membrany o średnicach 50-80 mm. Pierwszą konsekwencją tego stanu rzeczy jest zauważalnie mniejsza czynna powierzchnia membrany od strony ciśnienia kompensującego p_2 niż od strony ciśnienia mierzonego p_1 . Bierze się to stąd, że środkowa część membrany (w pobliżu dyszy odpowietrzającej 3) znajduje się praktycznie stale pod działaniem ciśnienia atmosferycznego, a nie ciśnienia p_2 .

Mniejsza czynna powierzchnia membrany po stronie ciśnienia p_2 oznacza, że do utrzymania membrany w stanie równowagi (w neutralnym położeniu) ciśnienie p_2 musi być większe od ciśnienia mierzonego p_1 . Aspekt ten w przyrządach przemysłowych nie jest brany pod uwagę, gdyż pole powierzchni dyszy (np. 4 mm²) stanowi około jednej tysięcznej pola czynnej powierzchni membrany. Drugą konsekwencją małej średnicy membrany jest jej stosunkowo duża sztywność i bardzo nieliniowa charakterystyka. Skutkiem tego jest zmniejszenie czynnej powierzchni membrany również od strony działania ciśnienia mierzonego p_1 .

3. SCHEMATY STRUKTURALNE I CHARAKTERYSTYKI WZMACNIACZA

Na Rysunku 3a pokazano uproszczony schemat strukturalny wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym. Człony proporcjonalne A_1 i A_2 reprezentują czynne powierzchnie membrany, na które działają odpowiednio ciśnienia p_1 i p_2 . Wywołane przez nie siły F_1 i F_2 skierowane są w przeciwnych kierunkach, w wyniku czego na membranę działa różnica sił ΔF powodując jej ugięcie x , proporcjonalne do odwrotności sztywności membrany $1/c$. Ugięcie membrany x jest sygnałem wejściowym wzmacniacza typu dysza-przysłona, a ciśnienie p_2 – jego sygnałem wyjściowym. Wzmacniacz opisany jest transmitancją członu inercyjnego, w której k_w jest zlinearyzowanym współczynnikiem wzmocnienia, a T_w – stałą czasową wzmacniacza. Ciśnienie p_2 , pojawiające się w wyniku przemykania dyszy oddziałuje na powierzchnię A_2 membrany i doprowadza ją do stanu równowagi. Jest to wynik wystąpienia ujemnego sprzężenia zwrotnego. Wzmacniacz w takim kształcie będziemy dalej nazywali pneumatycznym czujnikiem ciśnienia.

Schemat z Rysunku 3a można doprowadzić do prostszej postaci – pokazanej na rysunku 3b, z której wyznaczono transmitancję:

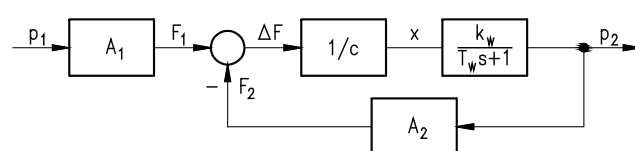
$$\frac{p_2(s)}{p_1(s)} = \frac{k_c}{T_c s + 1} \quad (1)$$

gdzie:

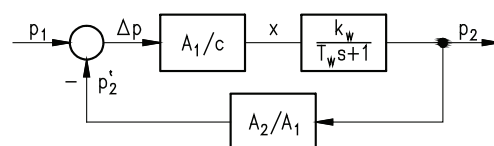
$$k_c = \frac{k_w}{\frac{c}{A_1} + \frac{A_2}{A_1} k_w} \quad \text{– współczynnik wzmocnienia}$$

$$T_c = \frac{\frac{c}{A_1} T_w}{\frac{c}{A_1} + \frac{A_2}{A_1} k_w} \quad \text{– stała czasowa czujnika}$$

a.



b.



Rysunek 3 Schematy strukturalne pneumatycznego wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym:

a) schemat rozwinięty, b) schemat uproszczony

Figure 3 Block diagram of pneumatic amplifier with feedback: a) full diagram, b) simplified diagram

Charakterystyka statyczna czujnika wynika z transmitancji (1). Jest ona opisana zależnością:

$$p_2 = \frac{1}{\frac{c}{A_1 k_w} + \frac{A_2}{A_1}} p_1 \quad (2)$$

Charakterystykę teoretyczną:

$$p_2 = p_1 \quad (3)$$

uzyskuje się przy idealnie wiotkiej membranie ($c = 0$) i równości czynnych jej powierzchni ($A_1 = A_2$). Natomiast rzeczywiste charakterystyki mogą przebiegać powyżej lub poniżej teoretycznej. Decyduje o tym wartość mianownika w równaniu (2) – gdy jest ona mniejsza od jedności:

$$\frac{c}{A_1 k_w} + \frac{A_2}{A_1} < 1 \quad (4)$$

to charakterystyka przebiega powyżej teoretycznej, w przeciwnym przypadku – poniżej. Zatem

przez odpowiedni dobór wartości poszczególnych składników równania (4), przebieg charakterystyki może być zbliżony do przebiegu idealnego.

Wszystkie omawiane czujniki (z wyjątkiem czujnika ciśnienia wewnątrzgałkowego) miały membranę o wymiarach: średnica $d = 6,5$ mm, grubość $g = 0,15$ mm. Tak zwana sztywność ciśnieniowa c/A_1 przyjmowała wartości w granicach 2,5-15 kPa/mm, w zależności od punktu pracy. Natomiast stosunek czynnych powierzchni membrany A_2/A_1 wahał się w zależności od średnicy dyszy w przedziale 0,82-0,98.

Występujący w równaniu (4) współczynnik wzmocnienia wzmacniacza k_w był wyznaczany z jego doświadczalnej charakterystyki statycznej, przy czym wyznaczono ją przy zasilaniu wzmacniacza przez króciec odpowietrzający (Rys. 2a).

W przypadku czujnika fali tętna krwi, przybliżone ciśnienie zasilania wynosiło $p_z = 50$ kPa, a dławik miał średnicę $d = 0,2$ mm i długość 10 mm. Natomiast ciśnienie zasilania pozostałych czujników wynosiło około 15 kPa, a ich dławiki były dwa razy dłuższe przy tej samej średnicy. Rozpatrywane wzmacniacze miały w punkcie pracy współczynnik k_w w granicach 250-1250 kPa/mm. Widać więc, że dobierając odpowiedni współczynnik wzmocnienia k_w można wpływać na przebieg charakterystyki statycznej. Na przykład, jeżeli we wzmacniaczu stosunek A_2/A_1 wynosi 0,98, a sztywność ciśnieniowa membrany $c/A_1 = 15$ kPa/mm, to najlepszy przebieg charakterystyki statycznej można uzyskać, gdy współczynnik k_w spełni równanie:

$$\frac{c}{A_1 k_w} + \frac{A_2}{A_1} = 1 \quad (5)$$

czyli:

$$k_w = \frac{c}{A_1 \left(1 - \frac{A_2}{A_1}\right)} = \frac{15}{1 - 0,98} = 750 \text{ kPa/mm}$$

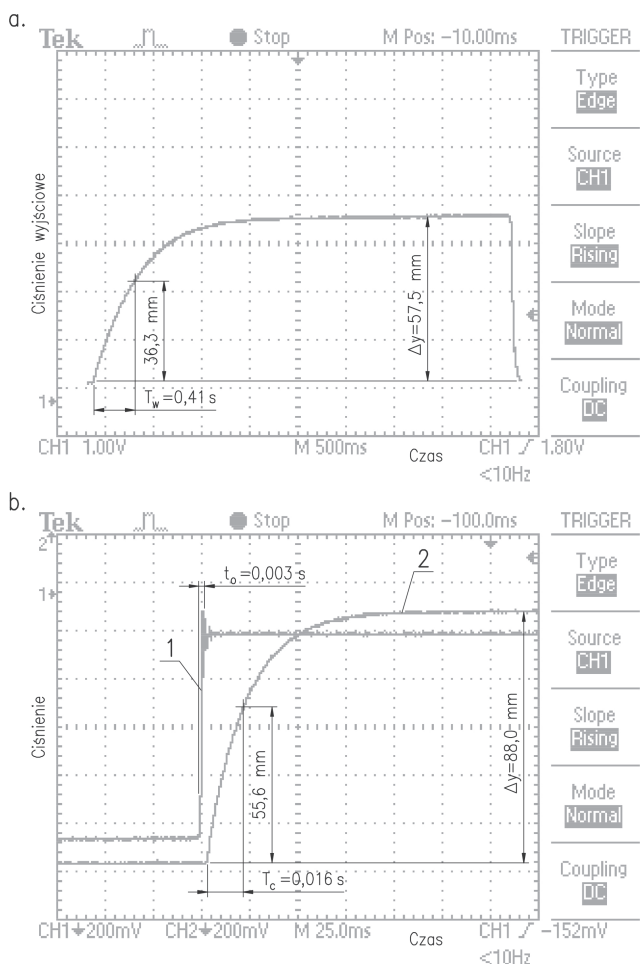
Przytoczone wyżej zabiegi nie zawsze są możliwe do przeprowadzenia z uwagi na konieczność zapewnienia wzmacniaczowi także odpowiednich właściwości dynamicznych. Charakterystyki dynamiczne wzmacniaczy zależą głównie od oporności dławika 1, pojemności pneumatycznej przewodu zasilającego 2 i ciśnienia zasilania p_z (Rys. 2a). Badania doświadczalne wykazały, że stałe czasowe T_c wzmacniaczy ze sprzężeniem zwrotnym są znacznie krótsze od stałych T_w wzmacniaczy bez sprzężenia zwrotnego, czyli bez membrany. Fakt ten ma odbicie we wzorze (1), w którym:

$$T_c = \frac{1}{1 + \frac{A_1}{c} \cdot \frac{A_2}{A_1} k_w} T_w \quad (6)$$

Dla przykładu rozważmy wzmacniacz stosowany do pomiaru fali tętna krwi, którego stała czasowa, wyznaczona z doświadczalnej charakterystyki skokowej (Rys. 4a), wynosi $T_w = 0,41$ s. Pozostałe parametry są równe: $c/A_1 = 15$ kPa/mm, $A_2/A_1 = 0,82$, $k_w = 1000$ kPa/mm. Podstawiając te wartości do wzoru (6) otrzymujemy:

$$T_c = \frac{1}{1 + (1/15) \cdot 0,82 \cdot 1000} \cdot 0,41 = 0,0074 \text{ s} \quad (7)$$

Natomiast stała czasowa T_c wyznaczona z doświadczalnej charakterystyki skokowej (Rys. 4b) wynosi: $T_c = 0,016$ s. Mimo istniejącej rozbieżności wyników widać, że dzięki sprzężeniu zwrotnemu stała czasowa wzmacniacza zmalała około 25 razy.



Rysunek 4 Charakterystyki skokowe wzmacniacza:

a) bez sprzężenia zwrotnego, b) ze sprzężeniem zwrotnym
1 – skok ciśnienia, 2 – odpowiedź na skok

Figure 4 Amplifier step characteristic: a) without feedback, b) with feedback (1 – pressure step, 2 – response)

Stała czasowa czujnika T_c ma ścisły związek z jego częstotliwością przenoszenia f_p . Związek ten jest określony modułem transmitancji czujnika i w przypadku rozważanych czujników, opisywanych transmitancją członu inercyjnego pierwszego rzędu, mamy:

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{\sqrt{T_c^2 \omega^2 + 1}} \quad (8)$$

gdzie:

a i b – amplitudy sygnałów: odpowiednio wejściowego i wyjściowego,

$\omega = 2\pi f$ – pulsacja sygnału (1/s), f – częstotliwość sygnału (Hz).

Stosunek amplitud b/a określa względny błąd dynamiczny pomiaru δ , zależny od stałej czasowej T_c czujnika i częstotliwości f mierzonych sygnałów:

$$\delta = \frac{a-b}{a} \cdot 100 = \left(1 - \frac{b}{a}\right) \cdot 100 \% \quad (9)$$

Obliczmy zatem zniekształcenie podstawowej harmonicznej fali tętna krwi, której częstotliwość u człowieka wynosi około $f = 1,25$ Hz (75 uderzeń serca na minutę), a stała $T_c = 0,016$ s:

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{\sqrt{0,016^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 1,25)^2 + 1}} = 0,992 \quad (10)$$

Wtedy błąd dynamiczny wynosi:

$$\delta = (1 - 0,992) \cdot 100 = 0,8\% \quad (11)$$

W rutynowych pomiarach fali tętna krwi przyjmuje się, że czwarta harmoniczna ma jeszcze istotny wpływ na kształt tej fali. Zobaczmy więc, jakie jest tłumienie (zniekształcenie) tej harmonicznej, czyli składowej o częstotliwości $f = 1,25 \cdot 4 = 5$ Hz:

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{\sqrt{0,016^2 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 5,0)^2 + 1}} = 0,894 \quad (12)$$

Błąd dynamiczny:

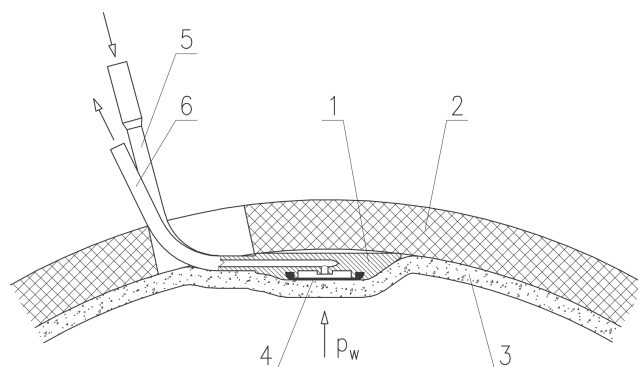
$$\delta = (1 - 0,894) \cdot 100 = 10\% \quad (13)$$

Można więc stwierdzić, że przy rutynowych pomiarach fali tętna krwi, czujnik pneumatyczny spełnia stawiane mu wymagania.

4. ODMIANY STOSOWANYCH WZMACNIACZY

Do pomiaru ciśnienia wewnątrzczaszkowego opracowano i stosowano w kilku szpitalach klinicznych tak zwany czujnik kapsułkowy. Jest to czujnik jednorazowego użytku, wytwarzany z tworzywa sztucznego. Podczas operacji neurochirurgicznych jest on wprowadzany pomiędzy oponę twardą i kość czaszki (Rys. 5).

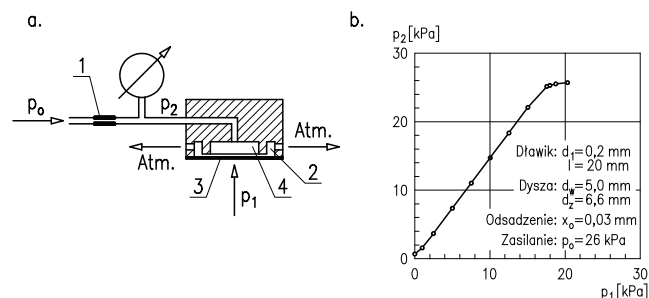
gicznych jest on wprowadzany pomiędzy oponę twardą i kość czaszki (Rys. 5).



Rysunek 5 Pneumatyczny czujnik ciśnienia wewnątrzczaszkowego typu kapsułkowego: 1 – czujnik, 2 – kość czaszki, 3 – opona twarda, 4 – membrana czujnika, 5 – przewód zasilający, 6 – przewód odpowietrzający

Figure 5 Intracranial pressure pneumatic sensor: 1 – sensor, 2 – skull cap, 3 – dura mater, 4 – sensor membrane, 5 – supply tube, 6 – exhaust tube

Inną odmianą wzmacniacza typu dysza-przysłona jest wzmacniacz z dyszą pierścieniową (Rys. 6), stosowany głównie do budowy czujnika ciśnienia wewnątrzgałkowego [4].



Rysunek 6 Czujnik ze wzmacniaczem z dyszą pierścieniową: a) schemat konstrukcyjny, b) charakterystyka

1 – dławik, 2 – dysza pierścieniowa, 3 – membrana, 4 – komora

Figure 6 Sensor with ring nozzle amplifier:

a) design diagram, b) characteristic

1 – restrictor, 2 – ring nozzle, 3 – membrane, 4 – chamber

Wzmacniacz taki składa się z dławika 1, dyszy pierścieniowej 2 i przysłony w postaci membrany 3. Powietrze zasilające o ciśnieniu p_0 przepływa przez dławik 1 i trafia do komory 4, skąd, poprzez pierścieniową szczelinę pomiędzy krawędzią komory 4 i membraną 3, uchodzi do atmosfery. Przedstawiony wzmacniacz, podobnie jak poprzednio opisane, ma ujemne sprzężenie zwrotne, a jego struktura odpowiada schematowi na Rysunku 3b. Ciśnienie mierzone p_1 , działające na zewnętrzną powierzchnię membrany 3 o polu A_1 , wywołuje siłę F_1 , której przeciwdziała siła F_2 ,

wywołana działaniem ciśnienia p_2 na membranę od strony komory 4 o polu A_2 .

Jeżeli siła F_2 jest mniejsza od siły F_1 , wówczas membrana 3 przymyka dyszę pierścieniową powodując wzrost ciśnienia p_2 w komorze 4 i wzrost siły F_2 , aż do momentu zrównania się z siłą F_1 . Ponieważ pole membrany A_1 (od strony działania ciśnienia p_1) jest zdecydowanie większe od pola A_2 (od strony działania ciśnienia p_2), współczynnik wzmocnienia wzmacniacza $k = \Delta p_2 / \Delta p_1$ jest większy od jedności. Czujnik pomiarowy z takim wzmacniaczem ma większą czułość, ale jego wskazania są bardziej narażone na wahania ciśnienia zasilania i inne zakłócenia zewnętrzne. Charakterystykę statyczną badanego czujnika pokazano na Rysunku 6b. Wynika z niej, że współczynnik wzmocnienia czujnika wynosi $k = 1,34$, natomiast orientacyjna wartość tego współczynnika, obliczona jedynie w oparciu o stosunek pól A_1/A_2 wynosi $k = 1,45$.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Bardzo prosta konstrukcja i nieskomplikowane wytwarzanie pneumatycznych wzmacniaczy typu dysza-przysłona są zachętą do stosowania ich w przyrządach pomiarowych ciśnienia. Ich cechy takie jak bezpieczeństwo pod względem porażenia prądem elektrycznym oraz niewrażliwość na zmiany temperatury otoczenia są szczególnie cenne przy pomiarach ciśnień w organizmie człowieka.

Pomimo że małe wymiary wzmacniacza stwarzają pewne problemy przy ich projektowaniu, przeprowadzone przez autorów prace wskazują, iż przez odpowiedni dobór takich parametrów wzmacniacza jak sztywność membrany, odległość odsadzenia dyszy oraz wartość ciśnienia zasilania można zapewnić przyrządom pomiarowym zadowalającą dla praktyki lekarskiej dokładność – zarówno statyczną, jak i dynamiczną.

LITERATURA

- [1] Werszko M., Werszko R. (1999), Wrocławskie czujniki ciśnienia wewnątrzczaszkowego, *Pomiary Automatyka Kontrola* nr 7/99, s. 5-7.
- [2] Werszko M., Werszko R. (2002), Pneumatyka w pomiarach ciśnienia krwi, *Pneumatyka* nr 3/2002, s. 14-16.
- [3] Hachoł A., Werszko M. (2004), Tonometry pneumatyczne do ciągłego pomiaru ciśnienia wewnątrzgałkowego, VI Sympozjum nt.: Modelowanie i Pomiary w Medycynie. Krynica 2004, s. 175-182.
- [4] Massey A. D. i inni (1999), Pneumatic pressure prob, Patent USA nr 5857969/1999.