

Model i charakterystyki muskułów pneumatycznych

Ryszard Dindorf

Działanie muskułów pneumatycznych przyrównuje się do naturalnych mięśni, dlatego znajdują one zastosowanie w robotach mobilnych, antropomorficznych i humanoidalnych oraz protezach kończyn.

Muskuł pneumatyczny jest zbudowany z odkształcalnej membrany wykonanej z gumy, lateksu lub silikonu, oplecionej siatką elastyczną i rozciągliwą w kierunku promieniowym. Siatka przymocowana na końcach muskułu tworzy rodzaj sztucznych ścięgien. Po napełnieniu sprężonym powietrzem muskuł o dużej sztywności wzdłużnej odkształca się promieniowo (pęcznienie) i się skraca. Powstałe w muskule naprężenia odpowiadają zewnętrznemu obciążeniu osiowemu. Początkowa duża siła maleje do zera po osiągnięciu maksymalnego stopnia skrócenia. Poprzez zmiany ciśnienia można zmieniać skrócenie muskułu oraz wartość siły ciągnącej muskułu. Siła ciągnąca muskułu pneumatycznego w odniesieniu do jego przekroju poprzecznego jest dużo większa od siły muskułu biologicznego.

Muskuły pneumatyczne generują dużą siłę osiową w stosunku do ich masy i przekroju poprzecznego, wykonują płynne ruchy, odkształcają się w kierunku promieniowym, nie występuje w nich zjawisko *stick-slip* oraz wykazują naturalne właściwości tłumienia ruchu. W muskułach tych nie trzeba przestrzegać pasowania, gładkości powierzchni i stosować uszczelniania jak w siłownikach tłokowych.

Muskuł pneumatyczny MAS

Firma FESTO wytwarza muskuły pneumatyczne (*Fluidic Muscle*) typu MAS o trzech średnicach: 10, 20 i 40 mm [6]. Firma oferuje program MuscleSim do doboru i obliczania muskułu pneumatycznego MAS. Za pomocą tego programu można dobrać średnicę i długość początkową, następnie obliczyć stopień skrócenia i wartość siły ciągnącej muskułu. Charakterystyka siły ograniczona jest dopuszczalnym 20-procentowym skróceniem muskułu.

Sztuczny muskuł pneumatyczny McKibben

Sztuczny muskuł AM (*Artificial Muscle*) McKibben powstał w 1950 roku, jest on najlepszym ze znanych muskułów pneumatycznych [1]. Muskuł McKibben jest pneumatycznym elementem wykonawczym wykonanym z nadmuchiwanej gumowego pęcherza usztywnionego splecioną siatką z włókna nylonowego o dużej sztywności wzdłużnej. Sztuczne muskuły pneumatyczne McKibben mają właściwości podobne do biologicznych mięśni szkieletowych, dlatego są wykorzystane w budowie biorobotów przez firmy Bridgestone Rubber Company (Japonia) oraz Shadow Robot Group (Anglia).

Dr hab. inż. Ryszard Dindorf – Zakład Mechatroniki, Politechnika Świętokrzyska

Sztuczny muskuł pneumatyczny PLAM (*Plated Pneumatic Artificial Muscle*) jest zbudowany z elastycznej membrany w charakterystyczne promieniowe zagięcia, odkształcalnej w kierunku promieniowym i kurczącej się w kierunku osiowym. Membrana muskułu PLAM przenosi naprężenia wzdłużne umożliwiające generowanie dużej nieliniowej siły ciągnącej [4]. PLAM ma duży stosunek mocy do swojej masy oraz naturalną podatność przystosowaną do robotów antropomorficznych i dwunożnych robotów humanoidalnych. Napędy z muskułami PLAM są stosowane w robotach o masie do 30 kg i wysokości do 150 cm.

Muskuł pneumatyczny PLAM

Sztuczny muskuł pneumatyczny PLAM (*Plated Pneumatic Artificial Muscle*) jest zbudowany z elastycznej membrany w charakterystyczne promieniowe zagięcia, odkształcalnej w kierunku promieniowym i kurczącej się w kierunku osiowym. Membrana muskułu PLAM przenosi naprężenia wzdłużne umożliwiające generowanie dużej nieliniowej siły ciągnącej [4]. PLAM ma duży stosunek mocy do swojej masy oraz naturalną podatność przystosowaną do robotów antropomorficznych i dwunożnych robotów humanoidalnych. Napędy z muskułami PLAM są stosowane w robotach o masie do 30 kg i wysokości do 150 cm.

Muskuł pneumatyczny obrotowy RPM

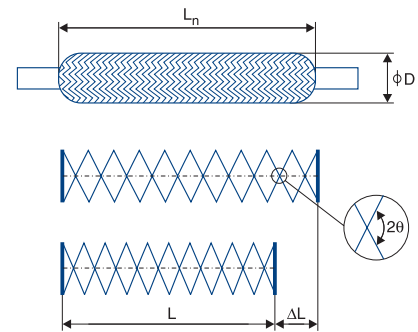
Nowością jest muskuł pneumatyczny obrotowy RPM (*Rotary Pneumatic Muscle*) [5] zbudowany z dwóch metalowych cylindrycznych elementów połączonych z podstawą. Elementy cylindryczne są połączone gumowym pęcherzem, który oplata siatka nylonowa. Po napełnieniu gumowego pęcherza powietrzem pod ciśnieniem powstają odkształcenia kątowe splotu nylonowej siatki, które powodują skręcenie elementów cylindrycznych i zmianę orientacji osiowej muskułu. Rezultatem ruchu obrotowego elementów cylindrycznych jest osiowe odkształcenie muskułu i zmiana siły ciągnącej.

Zastosowanie muskułów pneumatycznych

Właściwości muskułu pneumatycznego sprawiają, że jest on idealnym elementem napędowym w automatyzacji produkcji, robotach mobilnych, antropomorficznych i humanoidalnych oraz protezach kończyn gór-

Tabela 1. Zestawienie parametrów muskułów pneumatycznych [7]

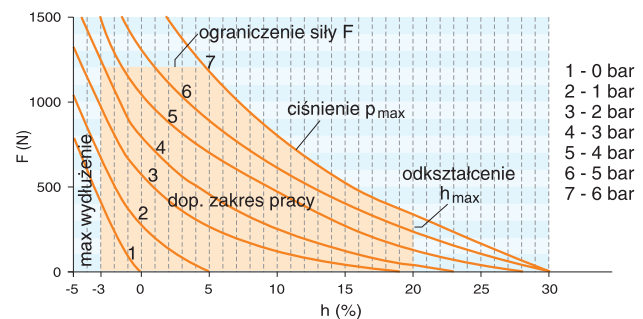
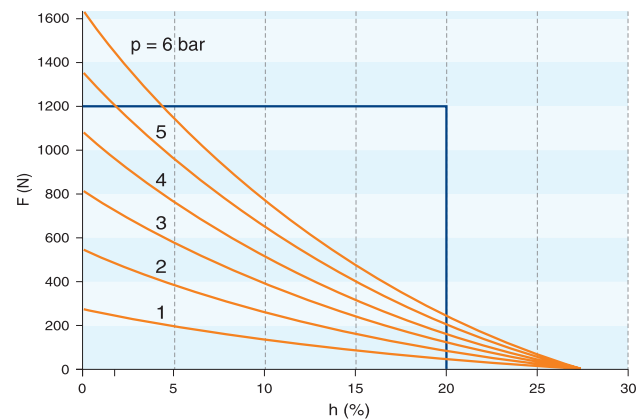
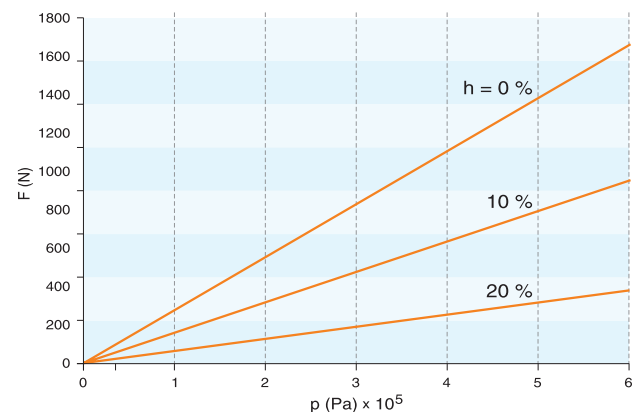
Parametry	Typ muskułu pneumatycznego		
	MAS-10	MAS-20	MAS-40
Średnica wewnętrzna D (mm)	10	20	40
Maksymalne dopuszczalne ciśnienie p (bar)	8	6	6
Maksymalny stopień skrócenia $h_{\max}$ (%)	20	20	25
Maksymalna siła $F_{\max}$ (N) dla $p = 6$ bar	400	1200	4000
Maksymalne obciążenie bezciśnieniowe G (kg)	30	60	120
Częstotliwość pracy f (Hz)	3	3	2
Dopuszczalne prędkości $v_{\min} - v_{\max}$ (m/s)	0,05–1,5	0,05–2	0,05–2
Maksymalna histereza	< 5 %		
Dopuszczalna temperatura	+5 °C ... +60 °C		
Maksymalne wydłużenie	< 5 % w temp. otoczenia		

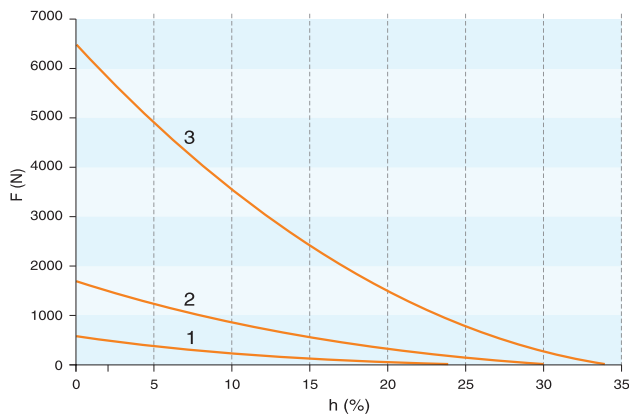
**Rys. 1.** Schemat obliczeniowy muskułu pneumatycznego

nych i dolnych. W robotach i manipulatorach spotyka się system BMDs (*Bi-Muscular Driving System*) – napęd złożony z dwóch przeciwstawnie działających muskułów, porównywalny do pracy mięśni biologicznych [2]. Muskuły pneumatyczne jako elementy wykonawcze mogą być stosowane również w manipulatorach i robotach o strukturze równoległej oraz w urządzeniach do automatyzacji produkcji, w których jest wymagana duża dynamika ruchu przy małym skoku [6]. Niekonwencjonalne projekty Axela Thallemera zastosowania muskułów pneumatycznych (*Fluidic Muscle*) firmy FESTO przedstawiono w serii Moderne Klassiker [8], projekty te dotyczą m.in. maszyny powietrznej, elementów przestrzennych konstrukcji architektonicznych, napędu pojazdu miejskiego, amortyzatorów skateboardu. Niektóre z tych projektów zostały już zrealizowane, np. lekki pojazd napędzany trzema muskułami pneumatycznymi [8].

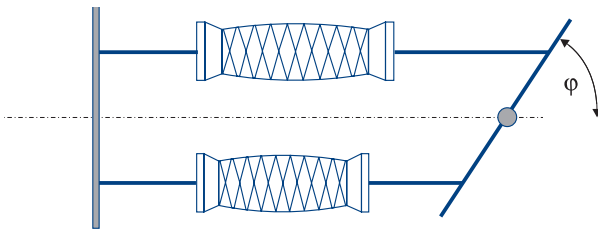
Charakterystyki statyczne muskułów pneumatycznych typu MAS

Model i charakterystyki statyczne muskułów pneumatycznych MAS zostaną wyznaczone na podstawie związków geometrycznych przedstawionych na rys. 1. Firma FESTO zachęca przy doborze i obliczaniu parametrów muskułu pneumatycznego MAS do korzystania z diagramów lub programu komputerowego MuscleSIM. Na osi pionowej diagramu oznacza się siłę F (N), a na osi poziomej stopień skrócenia h (%) muskułu pneumatycznego (rys. 2). Diagram przedstawia charakterystyki statyczne otrzymane dla różnych ciśnień p (0–6 bar). Charakterystyki te zostały ograniczone obszarami wyznaczonymi przez: maksymalną dopuszczalną siłę ciągnącą $F_{\max}$ muskułu, maksymalne skrócenie h muskułu, maksymalną dopuszczalną wartość ciśnienia $p_{\max}$ wewnątrz muskułu, maksymalne dopuszczalne wydłużenie muskułu. Tak ograniczone pole diagramu wskazuje zalecany obszar doboru parametrów muskułu pneumatycznego typu MAS. Podstawowe parametry takich muskułów pneumatycznych zestawiono dodatkowo w tabeli 1.

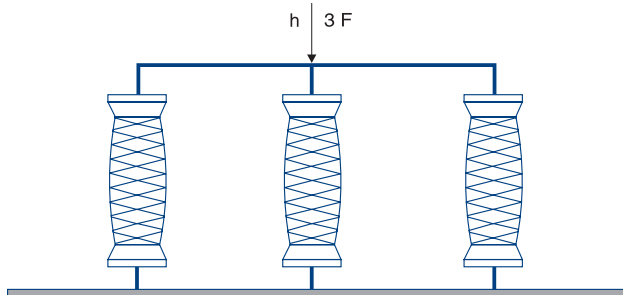
**Rys. 2.** Przykładowy diagram doboru parametrów muskułu pneumatycznego [7]**Rys. 3.** Charakterystyki statyczne siły $F(h)$ muskułu MAS-20**Rys. 4.** Charakterystyki statyczne siły $F(p)$ muskułu MAS-20



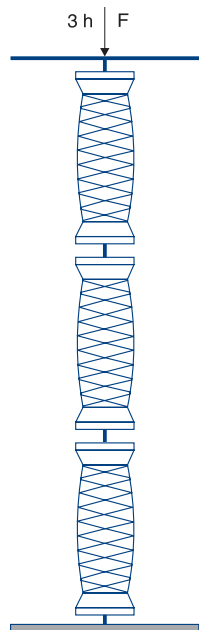
Rys. 5. Porównanie charakterystyk statycznych $F(h)$ mięśni: 1 – MAS-10, 2 – MAS-20, 3 – MAS-40 dla $p = 0,6$ MPa



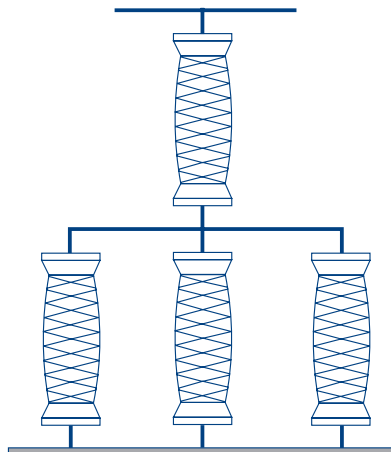
Rys. 6. Przeciwstawne połączenie mięśni pneumatycznych



Rys. 7. Równoległa struktura połączenia mięśni pneumatycznych



Rys. 8. Szeregowa struktura połączenia mięśni pneumatycznych



Rys. 9. Szeregowo-równoległa struktura połączenia mięśni pneumatycznych

Do obliczania siły F mięśni typu MAS wykorzystano ogólną zależność dla mięśni McKibben wyznaczoną w [4, 5], przedstawioną następnie w postaci ogólnej:

$$F = p D^2 \left[\alpha (1-h)^n - \beta \right] \quad (1)$$

gdzie: D – wewnętrzna średnica mięśnia, p – ciśnienie wewnątrz mięśnia, n – wykładnik potęgowy, najlepszego dopasowania charakterystyki, α , β – stałe mięśnia,

$$\alpha = \frac{3}{4} \pi \tan^2 \theta \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\pi}{4 \sin^2 \theta} \quad (3)$$

θ – kąt splotu,

Ponieważ trudno jest dokładnie oszacować wartość kąta splotu θ mięśnia MAS, dlatego stałe mięśnia α i β występujące we wzorze (1) będą określane bądź na podstawie obliczeń przy użyciu programu komputerowego MuscleSim bądź na podstawie badań doświadczalnych z uwzględnieniem warunków:

$$\begin{cases} F = F_{\max} & \text{dla } h = 0 \\ F = 0 & \text{dla } h = h_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

korzystając przy tym ze wzoru na stopień skrócenia mięśnia:

$$h = \frac{L_n - L}{L_n} \quad (5)$$

oraz wzoru na długość mięśnia przy maksymalnym jego skróceniu:

$$L_0 = L_n (1 - h_{\max}) \quad (6)$$

gdzie: h – stopień skrócenia mięśnia, L – długość mięśnia, $h_{\max}$ – maksymalny stopień skrócenia mięśnia, L_n – nominalna długość mięśnia, L_0 – długość mięśnia przy maksymalnym skróceniu.

Na podstawie wzoru (1) i wyników obliczeń stałych mięśnia α i β za pomocą programu MuscleSim, wyznaczono charakterystyki statyczne mięśnia typu MAS-20 o długości nominalnej $L_n = 0,40$ mm: charakterystyki statyczne $F(h)$ dla różnych wartości ciśnienia p (rys. 3) i charakterystyki statyczne $F(p)$ dla różnych wartości stopnia skrócenia h (rys. 4). Natomiast na rys. 5 porównano charakterystyki statyczne $F(h)$ mięśni typu MAS-10, MAS-20 i MAS-40 przy ciśnieniu $p = 6$ bar i długości nominalnej $L_n = 0,40$ mm.

Wykorzystanie mięśni pneumatycznych w urządzeniach automatyzacji produkcji, robotach i protezach wymaga ich łączenia w różne struktury kinematyczne: przeciwstawne, szeregowo, równoległe i szeregowo-równoległe. Strukturę przeciwstawną tworzą dwa mięśnie agonistyczny (współdziałający) i antagonistyczny (odciągający). Na rys. 6 przedstawiono przeciwstawny

system dwumięśniowy z dźwignią, który tworzy węzeł kinematyczny bio-robot, biochwytaka, protezy nogi lub ręki. Kąt obrotu takiego węzła kinematycznego zależy od stosunku ciśnień panujących w obu mięśniach. Ze względu na ograniczony stopień skrócenia mięśnia pneumatycznego uzyskuje się w takim systemie kąt obrotu $\varphi = \pm 30^\circ$. Poprzez równoległe lub szeregowe połączenie mięśni pneumatycznych można zwielokrotnić siłę lub przemieszczenie (skok) systemu napędowego. Na rys. 7 przedstawiono równoległe połączenie trzech mięśni tego samego typu o jednakowej długości nominalnej, co daje zwielokrotnienie siły $F_w = 3 F$ przy stopniu skrócenia h . Natomiast na rys. 8 przedstawiono szeregowe połączenie trzech mięśni tego samego typu o jednakowej długości nominalnej, co daje zwielokrotnienie stopnia skrócenia $h_w = 3 h$ przy sile F . Zwielokrotnienie siły i stopnia skrócenia systemu napędowego z mięśniami pneumatycznymi umożliwia struktura szeregowo-równoległa przedstawiona na rys. 9.

Podsumowanie

Mięśnie pneumatyczne są elementami napędowymi, które można scharakteryzować jako: lekkie, elastyczne, mocne i tanie. Dzięki swoim charakterystycznym właściwościom mięśnie znalazły zastosowanie jako elementy napędowe w urządzeniach automatyzacji, a także jako sztuczne mięśnie w robotach humanoidalnych i antropomorficznych oraz protezach kończyn. Analiza statyczna umożliwiła wyznaczenie charakterystyk statycznych siły ciągnącej F mięśnia typu MAS w funkcji długości (L), stopnia skrócenia (h) i ciśnienia (p). Przedstawiony wzór (1) przydatny jest do doboru stopnia skrócenia mięśnia oraz określenia charakterystyk statycznych siły ciągnącej mięśnia po wcześniejszym określeniu na podstawie programu MuscleSim stałych mięśnia a i b . Przedstawiona analityczno-obliczeniowa metoda określania charakterystyk statycznych mięśni pneumatycznych jest podyktowana tym, że właściwości materiałowe mięśni są zastrzeżone i niepublikowane przez ich producentów. Przedstawiona metoda może być wykorzystana do wyznaczenia charakterystyk statycznych wypadkowych układu napędowego z mięśniami pneumatycznymi o różnej strukturze kinematycznej, a także do analizy dynamicznej i syntezy układu napędowego z mięśniami pneumatycznymi.

Bibliografia

1. Chou C-P, Hannaford B.: Measurement and Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles. University of Washington, Washington (USA) 2002.
2. Dindorf R.: Static and dynamic models of pneumatic muscle actuator. Proc. The 18th International Conference on Hydraulics and Pneumatics, Prague, (Czech Republic) September 30 – October 1, 2003.
3. Dindorf R.: Mięsień pneumatyczny jako element napędowy. Napędy i Sterowanie 7-8/2003.
4. Verrelst B., Van Ham R.: Design of a Biped Actuated by Pleated Pneumatic Artificial Muscles. Vrije University Brussels, Department of Mechanical Engineering, Brussels (Belgium) 2002.
5. Yee N., Coghill G. 2002. Modelling of a novel rotary pneumatic muscle. Proc. Australian Conference on Robotics and Automation. 27-29 November, Auckland (Australia).
6. Katalog FESTO. Muscle for automation. Info 501, 2003.
7. Dale-Hampstead A.: Der Pneumatische Muskel von Axel Thallemer. Verlag form GmbH, Frankfurt am Main 2001.
8. Schwarz S.: Entwicklung eines Zukunftsantriebs auf der Basis Fluidic Muscle zum Einsatz in Leichtfahrzeugen. Diplomarbeit FHTE, Esslingen 2000.

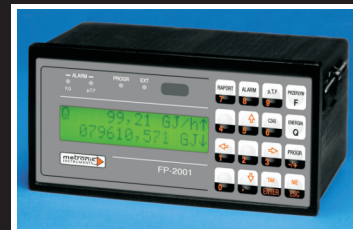
APARATURA POMIAROWA Z REJESTRACJĄ WYNIKÓW

MPI-16



16-kanalowy skaner do pomiaru temperatury i innych wielkości fizycznych

FP-2001



Przeliczniki do pomiaru energii pary, wody oraz przepływu gazów

FP-2001D



5-kanalowy monitor przepływu z funkcjami matematycznymi i dozowaniem

FP-210



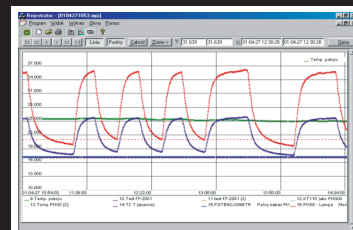
Monitor przepływu

IM-8



8-kanalowy moduł wejść analogowych (RTD, TC, 0/4-20 mA, 0/2-10 V)

R 30



Program do wizualizacji wyników pomiarów

METRONIC INSTRUMENTS

31-261 Kraków, ul. Wybickiego 7
tel./fax (012) 632-32-82, tel. 632-89-06
www.metronic.com.pl, e-mail: biuro@metronic.com.pl