

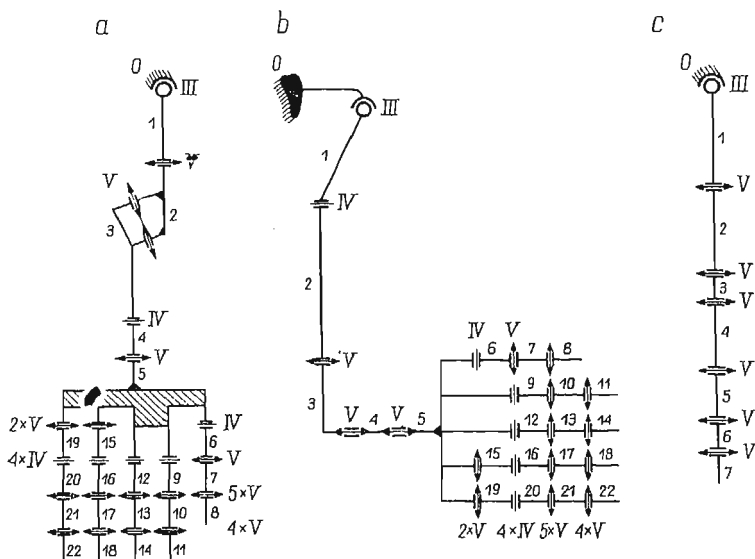
NIKTÓRE WŁASNOŚCI BIOMECHANIZMÓW O ZMIENNEJ STRUKTURZE

KAZIMIERZ FIDELUS, ADAM MORECKI (WARSZAWA)

Opisano niektóre zagadnienia związane ze strukturą i statyką napędów mięśniowych kończyn górnych i dolnych człowieka oraz konia. Zbadano kwestie zależności między klasą i funkcją mięśni a rodzajem i rozmieszczeniem stawów w kończynie. Wskazano na pewne prawidłowości ogólne, które należy uwzględnić przy syntezie biomechanizmów kończynopodobnych.

1. Wprowadzenie

Kończyna górna lub dolna człowieka rozpatrywana na gruncie mechanicznej teorii maszyn jest pewnym złożonym biomechanizmem. Traktując poszczególne kości jako człony sztywne, a stawy jako pary kinematyczne określonych klas otrzymujemy dla kończyny górnej i dolnej człowieka oraz przedniej konia schematy strukturalne przedsta-



Rys. 1. Schematy strukturalne kończyn: a) górnej człowieka, b) dolnej człowieka, c) przedniej konia

wione na rys. 1a, b i c. Stosując do tych schematów wzór strukturalny mechanizmów przestrzennych o postaci

$$(1) \quad w = 6n - \sum_3^5 ip_i,$$

gdzie n — liczba członów ruchomych, p_i — liczba par kinematycznych należących do odpowiednich pięciu klas ($i = 3, 4$ i 5), łatwo sprawdzić, że struktury pokazane na rys. 1a i 1b posiadają ruchliwość $w = 30$, a struktura na rys. 1c $w = 9$. Ruchliwość prawie wszystkich innych struktur kończyn kręgowców mieści się w tym przedziale.

Napędami omawianych biomechanizmów są mięśnie szkieletowe. Posiadają one tę własność iż mogą się wyłącznie skracać. Ich wydłużenie może nastąpić przez przyłożenie odpowiedniego obciążenia zewnętrznego do kończyny lub działanie mięśni antagonicznych.

Z teoretycznego punktu widzenia, do obsługi omawianych biomechanizmów należałoby zastosować w pierwszych dwóch przypadkach (rys. 1a i rys. 1b) 60 silników mięśniowych (po dwa na każdy stopień swobody), a w trzecim przypadku (rys. 1c) 18 takich silników. Bliższa analiza tego zagadnienia wskazuje, że rozkład napędów mięśniowych jest znacznie bardziej skomplikowany i działa według innych zasad niż zwykle przyjmuje się w mechanizmach technicznych.

W tej pracy zbadano bliżej zagadnienia doboru i rozmieszczenia napędów mięśniowych ograniczając się do zagadnień typu strukturalnego a częściowo statycznego.

Omawiane struktury są przykładami struktur o określonej liczbie członów, par kinematycznych i napędów mięśniowych. Jednak przy realizacji różnych aktów ruchowych biorą udział pewne kombinacje tych parametrów, co powoduje, że są realizowane różne struktury, a więc zagadnienie można rozpatrywać jako należące do klasy zmiennych struktur. Typowa zmienność struktury sprowadza się do realizacji ruchu o określonej liczbie stopni swobody spośród 30, np. $w = 1, 2, 3$ lub 15, co ma miejsce w przypadkach unieruchamiania chwytu lub jednoczesnego zginania, pronacji i ruchu chwytowego.

2. Parametry strukturalne napędów mięśniowych kończyn

Wprowadzimy następujące określenia:

— *aktonem mięśniowym* będziemy nazywali tę część mięśnia, jego głowę lub mięsień, którego włókna są tak usytuowane, że rozwijają siłę w określonym kierunku (moment siły względem osi stawu),

— *klasą mięśnia* będziemy nazywali liczbę równą liczbie stawów, w których rozwijają one określone momenty sił,

— *liczbą funkcji* mięśnia będziemy nazywali liczbę składowych momentów sił rozwijanych przez mięsień względem osi stawów, ponad którymi przebiega.

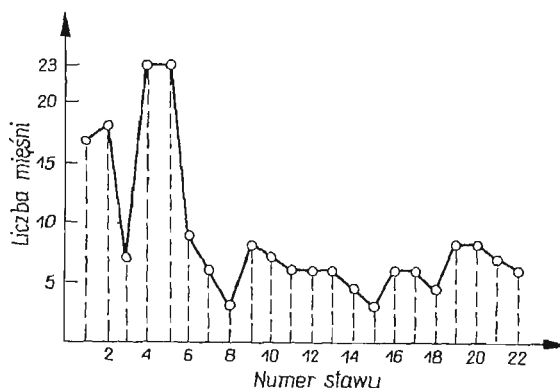
Oznaczenia innych parametrów podano w pracy [6]. Stosując te oznaczenia, na podstawie obszernych studiów anatomiczno-funkcjonalnych, sporządzono tablice 1, 2 i 3. W tych tablicach ujęto liczbowo podawane w anatomii werbalne opisy budowy i działania tych mięśni. W tablicy 1 podano strukturę i działanie 66 aktonów mięśni obsługi-

Tablica 3. Parametry mięśni i stawów kończyny przedniej konia

| Lp. | Nazwa mięśni (aktonów) | 1 2 3 4 5 6 7 | | | | | | | k _m | s _m | f _m | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|---------|---|---|---|---|---|---|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | Nazwa stawu | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Ramienny | | łokc. | prom. | nadg. | śródr. | śródr. | | | | między- | | | | | | | | | |
| | | Nazwa funkcji | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| zgin. prost. | odwodz. przyw. | prom. supin. | zgin. prost. | zgin. prost. | zgin. prost. | zgin. prost. | zgin. prost. | zgin. prost. | zgin. prost. | zgin. prost. | | | | | | | | | | | |
| 1 | Najszerszy grzbietu | + | + | + | | | | | | | 1 | 3 | 3 | | | | | | | | |
| 2 | Obły większy | + | + | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 3 | Nadgrzebieniowy gł.przyśrodkowa | | + | + | | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 4 | Nadgrzebieniowy gł.boczna | | + | | + | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 5 | Poogrzebieniowy | + | | | + | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 6 | Obły mniejszy | + | | | + | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 7 | Podłopatkowy | + | + | + | | | | | | | 1 | 3 | 3 | | | | | | | | |
| 8 | Naramienny | + | | | | | | | | | 1 | 3 | 1 | | | | | | | | |
| 9 | Ramiennogłowy | + | | | | | | | | | 1 | 3 | 1 | | | | | | | | |
| 10 | Piersiowy powierzchowny | + | + | + | | | | | | | 1 | 3 | 3 | | | | | | | | |
| 11 | Piersiowy głęboki | + | + | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 12 | Kruczoramienny | + | + | | | | | | | | 1 | 3 | 2 | | | | | | | | |
| 13 | Dwugłowy ramienia | + | | | + | | | | | | 2 | 4 | 2 | | | | | | | | |
| 14 | Napinacz powięzi podramienia | + | | | + | | | | | | 2 | 4 | 2 | | | | | | | | |
| 15 | Napinacz gł.długa | + | + | | + | | | | | | 2 | 4 | 3 | | | | | | | | |
| 16 | Napinacz gł.przyśrodkowa | | | | + | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 17 | Napinacz gł.boczna | | | | + | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 18 | Ramienny | | | | + | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 19 | Nawracacz obły | | | | + | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 20 | Zginacz nadgarśnika promien. | | | | + | + | + | | | | 3 | 3 | 3 | | | | | | | | |
| 21 | Zginacz palcowy powierzchwn. | | | | ++ | + | + | + | | | 5 | 5 | 5 | | | | | | | | |
| 22 | Zginacz nadgarstka łokciowy | | | | ++ | | | | | | 2 | 2 | 2 | | | | | | | | |
| 23 | Zginacz głęboki palcowy | | | | ++ | + | + | + | + | | 6 | 6 | 6 | | | | | | | | |
| 24 | Prostownik nadgarstka promien. | | | | + | + | + | | | | 3 | 3 | 3 | | | | | | | | |
| 25 | Prostownik palcowy wspólny | | | | + | + | + | + | + | + | 6 | 6 | 6 | | | | | | | | |
| 26 | Prostownik nadgarstka łokciowy | | | | + | + | + | | | | 3 | 3 | 3 | | | | | | | | |
| 27 | Prostownik palcowy dodatkowy | | | | | + | + | + | + | + | 5 | 5 | 5 | | | | | | | | |
| 28 | Odwodziciel palca I | | | | | + | + | | | | 2 | 2 | 2 | | | | | | | | |
| 29 | Międzykostny śródkowy | | | | | | | + | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| Liczba mięśni wykonujących daną funkcję | | 5 | 8 | 2 | 7 | 4 | 3 | 7 | 7 | 6 | 3 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | k ₁ =17 | s ₁ =7 | f ₁ =7 |
| Liczba funkcji obsługujących dany staw | | | 29 | | | | | 14 | 9 | 8 | 5 | 4 | 3 | | | | | | k ₂ =5 | s ₂ =2 | f ₂ =11 |
| Liczba funkcji obsług.dany stopień swob. | | 13 | 9 | 7 | | | | 14 | 9 | 8 | 5 | 4 | 3 | | | | | | k ₃ =3 | s ₃ =15 | f ₃ =7 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | k ₄ =0 | s ₄ =3 | f ₄ =0 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | k ₅ =2 | s ₅ =2 | f ₅ =2 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | k ₆ =2 | s ₆ =2 | f ₆ =2 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 58 | 88 | 72 |

jących 22 stawy kończyny górnej człowieka; podano tam również klasy mięśni oraz rodzaj i liczbę funkcji rozwijanych przez nie w stawach. Takie ujęcie pozwala na bliższą analizę działania napędów mięśniowych oraz na wyciągnięcie pewnych wniosków o prawidłowości ich rozmieszczenia. W analogiczny sposób postępując w tablicach 2 i 3 ujęto parametry mięśni obsługujących kończynę dolną człowieka i przednią konia.

Na podstawie danych tablicy 1 sporządzono wykres pokazany na rys. 2, który ujmuje zależność pomiędzy liczbą mięśni a określonym stawem. Numerację stawów przyjęto, podobnie jak w anatomii, od stawu proksymalnego (ramiennego) aż do dystalnego stawu piątego palca, tzn. w kolejności zgodnej z numeracją podaną na rys. 1.



Rys. 2. Liczba mięśni obsługujących poszczególne stawy kończyny górnej człowieka

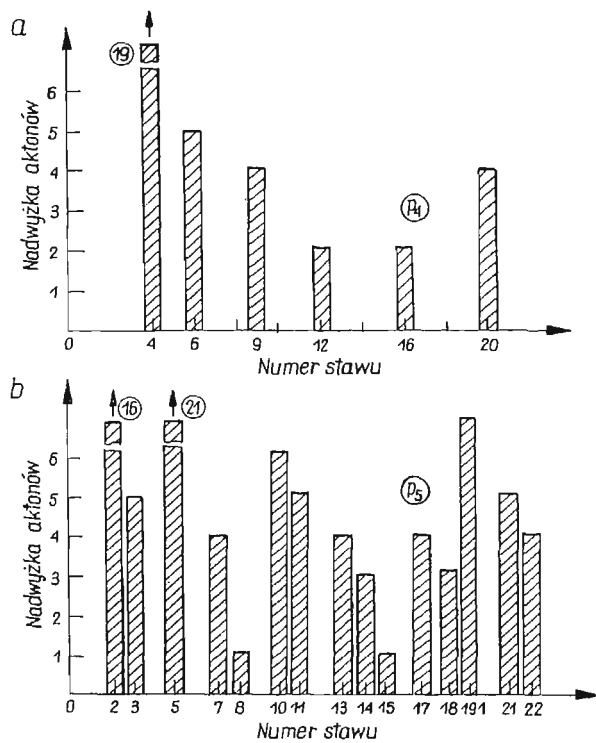
Biorąc pod uwagę, że w kończynach występują pary kinematyczne (stawy) o klasach piątej (p_5), czwartej (p_4) i trzeciej (p_3), liczba ich napędów mięśniowych, przez analogię do układów technicznych, powinna wynosić odpowiednio 2, 4 i 6 mięśni. W kończynach liczby napędów mięśniowych są jednak większe i mogą być potraktowane jako nadwyżka w porównaniu do rozwiązań technicznych. Na rys. 3a i 3b podano nadwyżki napędów mięśniowych występujące w stawach o klasie p_4 i p_5 . Jak wynika z tych przebiegów minimum nadwyżek mięśniowych (50%) ma miejsce w stawach o najmniejszej amplitudzie i niezależności ruchu oraz przenoszonych momentach sił. Maksimum nadwyżek mięśniowych występuje w stawach łokciowym i promieniowo-nadgarstkowym.

Na podstawie danych tablicy 1 sporządzono diagram przedstawiony na rys. 4.¹⁾ Na tym diagramie podano rozkład wskazujący na to jaka liczba mięśni różnych klas obsługuje dany staw. Np. staw nr 2 jest obsługiwany przez mięśnie wszystkich siedmiu klas (1 do 7).

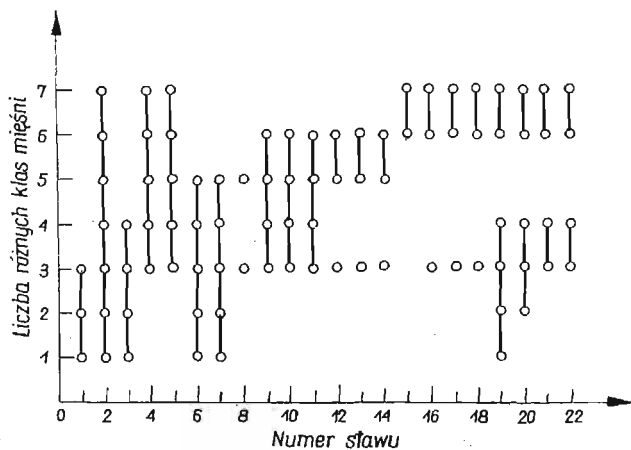
Korzystając z rys. 4 podano rozkład udziału liczbowego mięśni różnych klas przypadających na określoną liczbę stawów (rys. 5). Jak wynika z rys. 4 i 5 dominują wyraźnie stawy, ponad którymi przebiegają mięśnie należące do klas 3, 4 i 5 ($\sim 83\%$).

W celu zbadania wpływu liczby różnych funkcji poszczególnych mięśni w stawach sporządzono diagramy pokazane na rys. 6a, b i c, odpowiednio dla kończyny górnej i dolnej człowieka oraz przedniej konia. Na tej podstawie opracowano rozkłady podane

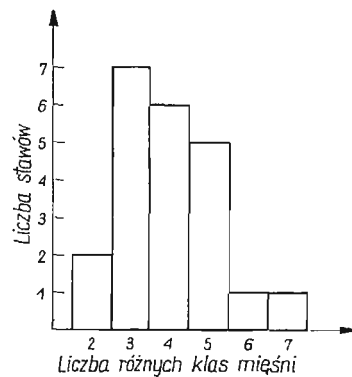
¹⁾ Autorzy wyrażają podziękowanie Pani Prof. dr ZOFII MORECKIEJ za pomoc przy opracowywaniu niektórych tablic i wykresów.



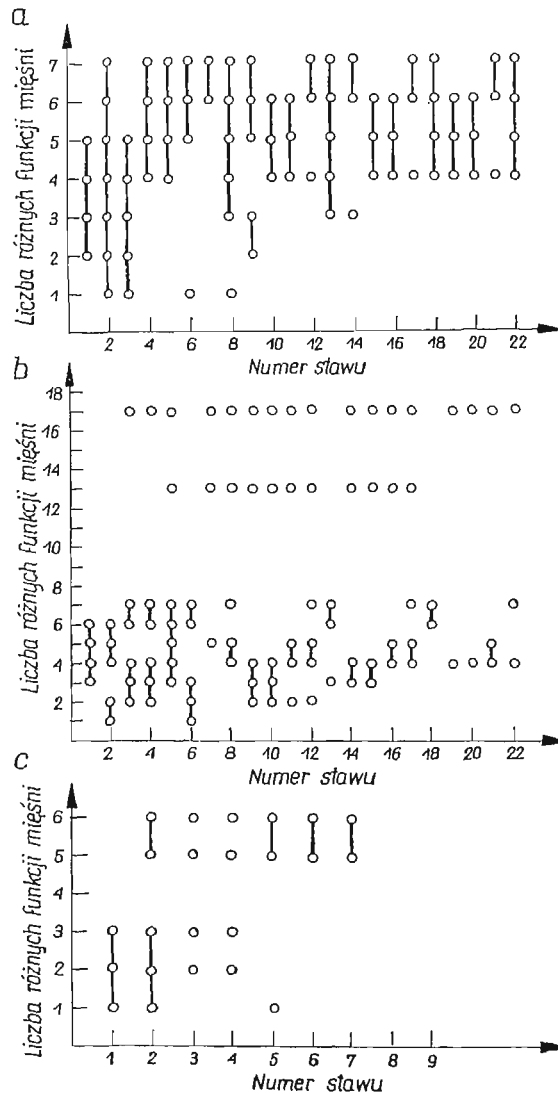
Rys. 3. Nadwyżka aktonów przypadająca na stawy: a) klasy czwartej p_4 , b) klasy piątej p_5



Rys. 4. Liczba różnych klas mięśni obsługujących dany staw kończyny górnej człowieka



Rys. 5. Rozkłady liczby różnych klas mięśni przypadających na liczbę stawów kończyny górnej człowieka

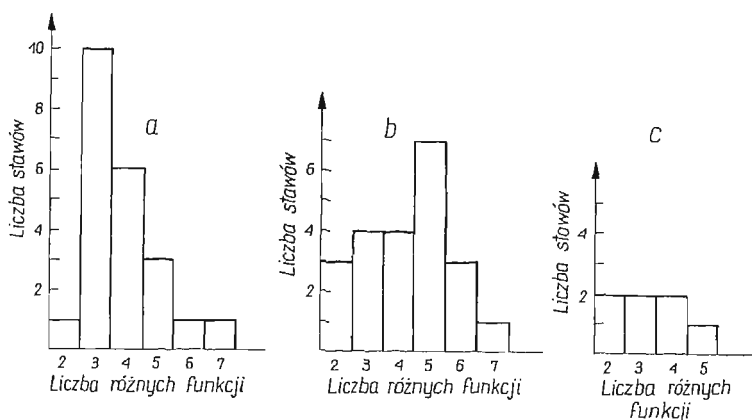


Rys. 6. Diagramy liczb różnych funkcji aktonów mięśni w zależności od numeru stawu: a) dla kończyny górnej człowieka, b) dla kończyny dolnej człowieka, c) dla kończyny przedniej konia

na rys. 7a, b i c. Wskazują one na pewną określoną kierunkowość zmian tych rozkładów wraz ze zmianą funkcji kończyny. W przypadku kończyny górnej człowieka, która jest przystosowana do wykonywania najbardziej wszechstronnych funkcji, jak np. roboczych, bytowych, obronnych itp. notuje się występowanie zespołów mięśni o wszystkich siedmiu funkcjach, z jedną dominantą, tj. mięśni o trzech różnych funkcjach, względem osi stawów, ponad którymi one przebiegają (rys. 7a).

W miarę postępującej specjalizacji kończyny, tzn. ograniczenia liczby wykonywanych przez nią aktów ruchowych, zauważa się wyraźną zmianę rozkładu funkcji mięśni (rys. 7b).

Kierunek zmian wykazuje tendencję bardziej równomiernego rozkładu liczby stawów obsługiwanych przez zespoły mięśni o różnych funkcjach. W kończynie dolnej dominują stawy, ponad którymi przebiegają mięśnie o pięciu różnych funkcjach. Dalej idącą tendencję notujemy w przypadku kończyny przedniej konia (rys. 7c). W konsekwencji po-



Rys. 7. Rozkłady liczb różnych funkcji mięśni przypadających na liczbę stawów: a) dla kończyny górnej, człowieka, b) dla kończyny dolnej człowieka, c) dla kończyny przedniej konia

woduje to występowanie bardziej sprzężonych ruchów między poszczególnymi stawami w kończynie dolnej człowieka i przedniej konia.

Inny rodzaj analizy napędów mięśniowych omawianych kończyn zaprezentowano w tablicach 4, 5 i 6. W tablicach 4a i 4b podano rozkład mięśni według klas i funkcji oraz klas obsługiwanych stawów kończyny górnej. Jak wynika z tablicy 4a dla stawów obsługiwanych przez mięśnie o wyższych klasach występują pewne prawidłowości, mianowicie ustala się określony związek między liczbą obsługiwanych stawów i ich klasą o postaci

$$(2) \quad k_m = p_4 + p_5,$$

gdzie $p_4 = 2$ i $p_5 = 1, 2, 3, 4, 5$. Wydaje się, że można stąd wyciągnąć pewne wnioski ogólne przy konstrukcji manipulatorów kończynopodobnych.

Podobne prawidłowości notuje się w tablicy 4b. Przeprowadzona analiza kończyny dolnej człowieka i przedniej konia wskazuje również na występowanie podobnych związków. Dla kończyny dolnej człowieka otrzymujemy

$$(3) \quad k_m = p_4 + p_5,$$

gdzie $p_4 = 1, 4, 5$ i $p_5 = 2, 3, 4, 5, 6$ i 13.

Przeprowadzona analiza kończyny przedniej konia prowadzi do następujących spostrzeżeń (tablice 6a i 6b)

$$(4) \quad k_m = p_5,$$

gdzie $p_5 = 1, 2, 3, 4, 5$ i 6.

Tablica 4a. Rozkład miesięni według klas liczby obsługiwanych stawów kończyny górnej człowieka

| Klasa miesięnia | Liczba miesięni | Rozkład miesięni według klas i liczby obsługiwanych stawów | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--|----------------|----------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | P ₃ | P ₄ | P ₅ | 2P ₅ | P ₃ +P ₄ | P ₅ +P ₃ | P ₅ +2P ₄ | 2P ₅ +P ₄ | 2P ₅ +P ₃ | 2P ₅ +2P ₄ | 3P ₅ +P ₄ | 3P ₅ +2P ₄ | 4P ₅ +2P ₄ | 5P ₅ +2P ₄ |
| 1 | 21 | 14 | 1 | 6 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 6 | | | | 2 | 3 | 1 | | | | | | | | |
| 3 | 19 | | | | | | | 2 | 15 | 2 | | | | | |
| 4 | 5 | | | | | | | | | | 3 | 2 | | | |
| 5 | 6 | | | | | | | | | | | | 6 | | |
| 6 | 7 | | | | | | | | | | | | | 7 | |
| 7 | 2 | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| | 66 | 14 | 1 | 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 15 | 2 | 3 | 2 | 6 | 7 | 2 |

Tablica 4b. Rozkład miesięni według funkcji i liczby klas obsługiwanych stawów kończyny górnej człowieka

| Funkcja miesięnia | Liczba miesięni | Rozkład miesięni według funkcji i liczby obsługiwanych stawów | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------|---|----------------|----------------|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | | P ₃ | P ₄ | P ₅ | 2P ₅ | P ₃ +2P ₄ | P ₃ +P ₅ | P ₃ +2P ₅ | P ₄ +P ₅ | P ₄ +2P ₅ | P ₄ +3P ₅ | 2P ₄ +P ₅ | 2P ₄ +2P ₅ | 2P ₄ +3P ₅ | 2P ₄ +4P ₅ | 2P ₄ +5P ₅ |
| 1 | 7 | | 1 | 6 | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 3 | 1 | | | 1 | | | 1 | | | | | | | | |
| 3 | 10 | 5 | | | 1 | | | 2 | 1 | | | | | | | |
| 4 | 24 | 7 | | | | | 1 | 2 | 13 | | | | 1 | | | |
| 5 | 11 | 1 | | | | 1 | | | | 2 | 1 | 2 | 4 | | | |
| 6 | 7 | | | | | | | | | | | | | 7 | | |
| 7 | 4 | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 2 |
| | 66 | 14 | 1 | 6 | 2 | 1 | 1 | 1 | 5 | 14 | 2 | 1 | 3 | 5 | 8 | 2 |

Tablica 5a. Rozkład miesięni według klas i liczby klas obsługiwanych stawów kończyny dolnej człowieka

| Klasa miesięnia | Liczba miesięni | Rozkład miesięni według klasy i liczby klas obsługiwanych stawów | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|--|----------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---|
| | | P ₃ | P ₄ | P ₅ | P ₃ +P ₄ | P ₄ +P ₅ | 2P ₅ | 3P ₅ | 2P ₅ +P ₄ | 3P ₅ +P ₄ | 4P ₅ +P ₄ | 5P ₅ +P ₄ | 6P ₅ +P ₄ | 6P ₅ +5P ₄ | 13P ₅ +4P ₄ | |
| 1 | 36 | 20 | 16 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 11 | | | | 7 | 3 | 1 | | | | | | | | | |
| 3 | 13 | | | | | | 3 | 10 | | | | | | | | |
| 4 | 4 | | | | | | | | 4 | | | | | | | |
| 5 | 1 | | | | | | | | | 1 | | | | | | |
| 6 | 2 | | | | | | | | | | 2 | | | | | |
| 7 | 1 | | | | | | | | | | | | 1 | | | |
| 11 | 1 | | | | | | | | | | | | | 1 | | |
| 17 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| | 71 | | | | | | | | | | | | | | | |

Tablica 5b. Rozkład miesięni według funkcji i klasy liczb obsługiwanych stawów kończyny dolnej człowieka

| Funkcja miesięnia | Liczba miesięni | Rozkład miesięni według funkcji i liczby klas obsługiwanych stawów | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------------|--|----------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | | P ₃ | P ₄ | P ₅ | 2P ₅ | 3P ₅ | P ₅ +P ₄ | 2P ₅ +P ₄ | P ₃ +P ₄ | 3P ₅ +P ₄ | 5P ₅ +P ₄ | 6P ₅ +P ₄ | 7P ₅ +4P ₄ | 13P ₅ +4P ₄ |
| 1 | 4 | | 4 | | | | | | | | | | | |
| 2 | 13 | | 12 | | 1 | | | | | | | | | |
| 3 | 28 | 20 | | | | 2 | 3 | 3 | | | | | | |
| 4 | 13 | | | | | 1 | 7 | 3 | 2 | | | | | |
| 5 | 6 | | | | | | | 3 | 3 | | | | | |
| 6 | 2 | | | | | | | 1 | | 1 | | | | |
| 7 | 2 | | | | | | | | | 1 | | | | |
| 13 | 1 | | | | | | | | | | | | 1 | |
| 17 | 2 | | | | | | | | | | | | | 2 |
| | 71 | | | | | | | | | | | | | |

Tablica 6a. Rozkład mięśni według klas i liczby klas obsługiwanych stawów kończyny przedniej konia

| Klasa mięśnia | Liczba mięśni | Rozkład mięśni według klas i liczby klas obsługiwanych stawów | | | | | | |
|---------------|---------------|---|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | p_3 | p_3+p_5 | p_5 | $2p_5$ | $3p_5$ | $5p_5$ | $6p_5$ |
| 1 | 17 | 12 | | 5 | | | | |
| 2 | 5 | | 3 | | 2 | | | |
| 3 | 3 | | | | | 3 | | |
| 5 | 2 | | | | | | 2 | |
| 6 | 2 | | | | | | | 2 |
| | 29 | | | | | | | |

Tablica 6b. Rozkład mięśni według funkcji i liczby klas obsługiwanych stawów kończyny przedniej konia

| Funkcja mięśni | Liczba mięśni | Rozkład mięśni według funkcji i liczby klas obsługiwanych stawów | | | | | | |
|----------------|---------------|--|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | p_3 | p_3+p_5 | p_5 | $2p_5$ | $3p_5$ | $5p_5$ | $6p_5$ |
| 1 | 7 | 2 | | 5 | | | | |
| 2 | 11 | 7 | 2 | | 2 | | | |
| 3 | 7 | 3 | 1 | | | 3 | | |
| 5 | 2 | | | | | | 2 | |
| 6 | 2 | | | | | | | 2 |
| | 29 | | | | | | | |

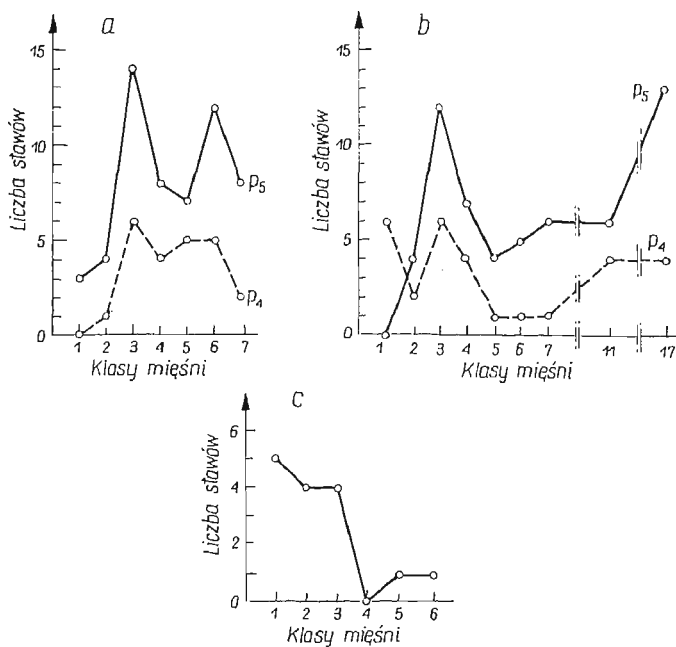
Tablica 7. Rozkład liczby mięśni różnych klas w obsłudze określonych stawów kończyny górnej człowieka

| Klasa stawu | Liczba stawów | Liczba stawów w których występuje dana klasa mięśni | | | | | | |
|-------------|---------------|---|---|----|---|---|----|---|
| | | klasa mięśni | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| P_3 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| P_4 | 6 | 0 | 1 | 6 | 4 | 5 | 5 | 2 |
| P_5 | 15 | 3 | 4 | 14 | 8 | 7 | 12 | 8 |
| | 22 | | | | | | | |

Analizując rolę mięśni różnych klas przy obsłudze stawów kończyny górnej o różnej liczbie stopni swobody oraz stosując porządkowanie według rachunku klas otrzymujemy obraz podany w tablicy 7 oraz na rys. 8a.

W tablicach 8 i 9 oraz na rys. 8b i 8c zaprezentowano wyniki analizy przeprowadzonej dla kończyny dolnej człowieka (tablica 8 i rys. 8b) oraz przedniej konia (tablica 9 i rys. 8c).

Komentując otrzymane wyniki możemy stwierdzić, iż rozkład mięśni kończyny górnej i dolnej człowieka według ich klas, nie zależy od rodzaju obsługiwanego przez nie stawu jest bowiem bardzo podobny dla stawów czwartej i piątej klasy.



Rys. 8. Liczby stawów obsługiwanych przez mięśnie różnych klas dla stawów czwartej (p_4) i piątej klasy (p_5)

Tablica 8. Rozkład liczby mięśni różnych klas przy obsłudze stawów kończyny dolnej

| Klasa stawu | Liczba stawów | Liczba stawów w których występuje dana klasa mięśni | | | | | | | | |
|-------------|---------------|---|---|----|---|---|---|---|----|----|
| | | klasa mięśni | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 11 | 17 |
| P_3 | 1 | 1 | 1 | — | — | — | — | — | — | — |
| P_4 | 6 | 6 | 2 | 6 | 4 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 |
| P_5 | 15 | — | 4 | 12 | 7 | 4 | 5 | 6 | 6 | 13 |

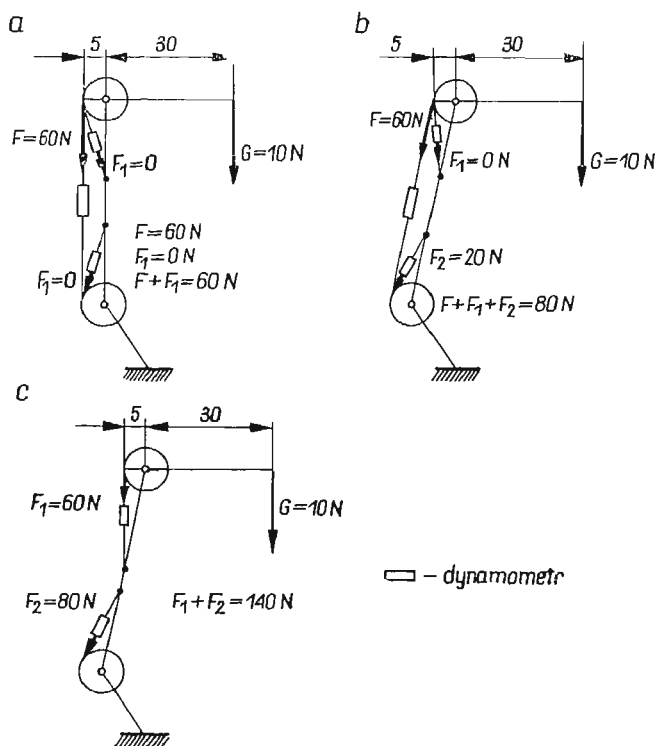
Tablica 9. Rozkład liczby mięśni różnych klas przy obsłudze stawów kończyny przedniej konia

| Klasa stawu | Liczba stawów | Liczba stawów w których występuje dana klasa mięśni | | | | | |
|-------------|---------------|---|---|---|---|---|---|
| | | klasa mięśni | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| P_3 | 1 | 1 | 1 | 1 | — | — | — |
| P_5 | 6 | 5 | 4 | 4 | 0 | 2 | 2 |

3. Zagadnienia wyboru i rozmieszczenia napędów mięśniowych

Przeprowadzona w poprzednim rozdziale analiza parametrów strukturalnych napędów mięśniowych wskazuje na pewne prawidłowości. Niemniej nie stanowi ona wystarczającej podstawy przy syntezie manipulatorów kończynopodobnych. Do analizy strukturalnej należy dołączyć ponadto kwestię rozkładu sił i obciążeń przenoszonych przez poszczególne kości (człony) oraz zagadnienia ich kształtu i wytrzymałości. Dopiero łączna analiza tego zespołu czynników wraz z analizą układu sterowania może doprowadzić do ustalenia prawidłowości i zasad budowy tak złożonych biomechanizmów.

Ograniczmy naszą analizę w tym zakresie do przypadku płaskiego i stawów łokciowego i promieniowo-nadgarstkowego kończyny górnej człowieka. Pierwsze prace w tym zakresie były prowadzone już przez ELFTMANA i STORCKA w latach 1939 i 1951 [4], [5].

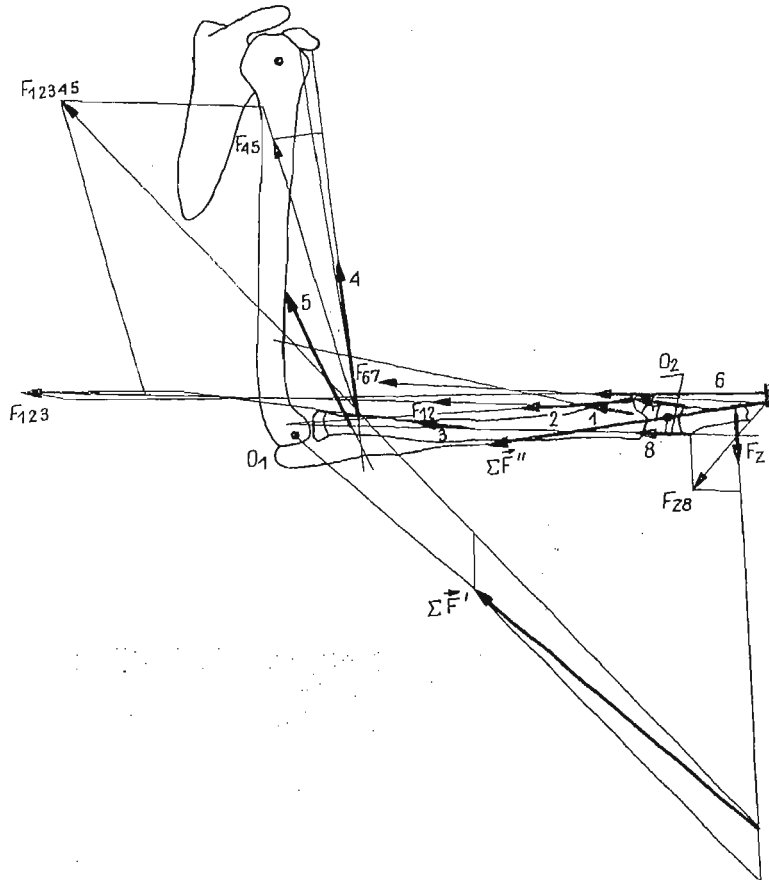


Rys. 9. Przykłady równoważenia momentu siły zewnętrznej (G) przez układ mięśni 1 i 2 stawowych: a) moment siły G równoważy mięsień dwustawowy, b) moment siły G równoważą mięśnie, 1 i 2 stawowy, c) moment siły G równoważą tylko mięśnie jednostawowe

Na rys. 9 podano przykład analizy wpływu napędów mięśniowych dwóch różnych klas pierwszej i drugiej (tzw. mięśnie jedno i dwustawowe) na rozkład momentów sił w stawach. Na rys. 9a, b i c podano kolejno wielkości sił i momentów sił rozwijanych przez odpowiednie mięśnie w zależności od położenia kończyny i rodzaju mięśni. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, łączna siła przenoszona przez układ jednocześnie

działających mięśni klasy 1 i 2 jest o około 40% mniejsza od siły rozwijanej przez mięśnie tylko 1 klasy. W statyce organizmów żywych możemy przyjąć, iż wielkość wydatkowanej energii jest proporcjonalna do wielkości rozwijanej siły przez poszczególne mięśnie.

Na rys. 10 pokazano rozmieszczenie mięśni w stawach łokciowym i promieniowo-nadgarstkowym w płaszczyźnie strzałkowej oraz rozkład sił uzyskany z równania udziału

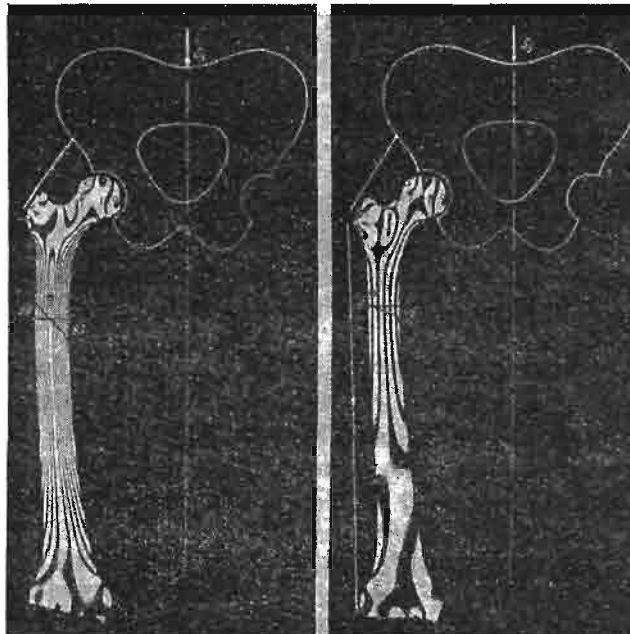
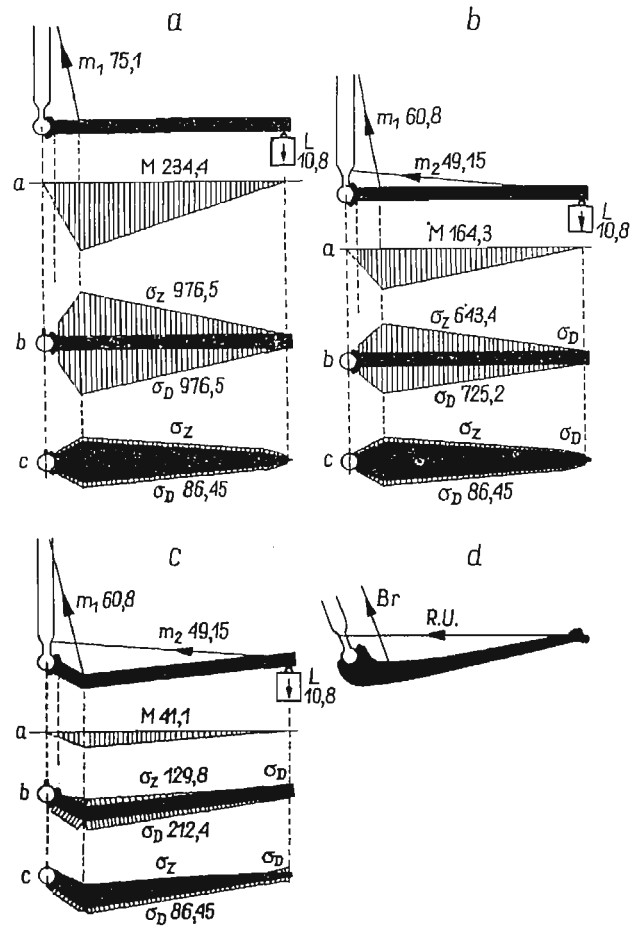


Rys. 10. Siły rozwijane przez mięśnie w stawach łokciowych i promieniowo-nadgarstkowym (płaszczyzna strzałkowa). Od 1-8 mięśnie lub ich akty

łów [6]. Przyjmując obciążenie zewnętrzne $F_z = 210$ N przyłożone do dłoni otrzymujemy momenty wypadkowe odpowiednio w stawie promieniowo-nadgarstkowym $M_1 = 1430$ Ncm i łokciowym $M_2 = 9240$ Ncm. Siła wypadkowa wynosi tutaj 3280 N. Przyjmując umowne zastępcze mięśnie jednostawowe, które byłyby realne biologiczne, o promieniach wynoszących odpowiednio $r_1 = 20$ mm i $r_2 = 50$ mm otrzymujemy

$$(5) \quad F_{1z} = \frac{M_1}{r_1} = 715 \text{ N}, \quad F_{2z} = \frac{M_2}{r_2} = 1848 \text{ N}.$$

Przyjmując, że niektóre mięśnie rozwijają momenty w stawach sąsiednich (ramiennym — mięsień nr 4, oraz śródrečna i palców — mięsień nr 6) otrzymujemy dwa dodatkowe



Rys. 11. Rozkład naprężeń w kości przy różnych klasach mięśni: a) kość łokciowa, b) kość udowa.

mięśnie zastępcze, które powinny zrównoważyć działanie mięśni naturalnych w stawach sąsiednich.

Stąd łączna siła zastępcza wynosi około $2563 + 1411$ N i jest o 694 N większa niż w układzie naturalnym. Ponadto większa liczba mięśni naturalnych powoduje znacznie mniejsze naprężenie punktowe w kościach i bardziej równomierne rozłożenie brzuśców wokół szkieletu. Analiza eleastoptyczna [7] wskazuje, że zastosowanie wyłącznie napędów mięśniowych 1 klasy (mięśni jednostawowych) powoduje znaczny wzrost naprężeń w kościach (rys. 11). Kwestie te związane są z optymalizacją wytrzymałości szkieletu oraz oszczędnością materiału zwiększającego obciążenie kończyny. Stąd wynika, że dobór mięśni odpowiednich klas oraz kształtu kości jest tym czynnikiem, który należy uwzględnić przy syntezie mechanizmów kończynopodobnych.

4. Zakończenie

Przeprowadzona analiza struktury i statyki napędów mięśniowych biomechanizmów oraz dane piśmiennictwa wskazują, iż trzy zasadnicze kwestie są tutaj dominujące, mianowicie

- możliwość funkcjonalnej zmiany struktury napędów mięśniowych,
- rozmieszczenie i klasa napędów, co wiąże się z wartością wydatkowanej energii,
- ukształtowanie kości i związane z tym zagadnienia wytrzymałości oraz oszczędności materiału.

Zespół tych warunków należy wziąć pod uwagę w przypadku syntezy manipulatorów kończynopodobnych. Wydaje się, że stosując te prawidłowości, szczególnie przy budowie manipulatorów typu «kończyna» o wielu stopniach swobody, można uzyskać znaczne zmniejszenie wymiarów członów, ciężaru, wartości wydatkowanej energii oraz wbrew pozorom uproszczenie układu sterowania takim obiektem.

Oczywiście przedstawione studia nie wyczerpują zagadnienia lecz wskazują jedynie na kierunek dalszych poszukiwań w tym zakresie.

Literatura cytowana w tekście

1. A. MORECKI, J. EKIEL, K. FIDELUS, *Bionika ruchu*, PWN (w druku).
2. A. MORECKI, J. EKIEL, K. FIDELUS, K. NAZARCZUK, K. TEMPIŃSKI, S. SKORUPSKI, *Some problems of bionic investigation*, II Inter. Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Proc., 2, Zakopane 1969.
3. К. Фиделос, *Функция некоторых двусуставных мышц бедра в спортивных упражнениях*, Москва 1959 (Канд. диссерт.).
4. H. ELFTMAN, *The function of muscles in locomotion*, Amer. J. of Physiol., (1939).
5. H. STORCK, *Die Anwendung der Statik auf der menschlichen Bewegungsapparat*, Beilageheft Zeitschrift für Orthopädie, B. 81. (1951).
6. K. FIDELUS, *Biomechaniczne parametry układu ruchu kończyn górnych człowieka*, Rozprawa habilitacyjna (w druku).
7. F. PAUWELS, *Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates*, Berlin 1965.

Р е з ю м е

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА БИОМЕХАНИЗМОВ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Проведен структурно-функциональный анализ верхней и нижней конечностей человека и передней конечности лошади. На основе структурных зависимостей установлена подвижность этих «механизмов» и исследованы некоторые вопросы мышечных приводов. На основании этого анализа даны некоторые замечания относительно размещения мышечных приводов и изменений их распределения, классов и функций с изменением специализации конечностей. К структурно-функциональному анализу присоединен также упрощенный статический анализ сустава обслуживаемого мышцами первого и второго классов, с указанием на некоторые преимущества таких систем. Приводится также пример поляризационно-оптического анализа указывающий на целесообразность применения мышц нескольких классов для привода соответствующих суставов. Результаты работы найдут применение для синтеза биоманипуляторов.

S u m m a r y

SOME PROPERTIES OF BIOMECHANICS WITH VARIABLE STRUCTURES

This paper deals with the structural and functional analysis of upper and lower extremities of a man and the anterior extremity of a horse. Basing on the structural relation, the mobility of these «mechanisms» was established and some problems of muscle drives were investigated. This analysis shows some regularities in collocation of muscle drives and some changes in relation to the specialisation of the extremity. In spite of structural-functional analysis, the simplified static analysis of the system equipped with muscles of first and second class was given and some advantages of these systems were shown. An example of photoelastic analysis is given, showing the advantages resulting from the application of muscles of various classes operating appropriate joints. The results of the present paper will be applied in the synthesis of biomanipulators similar to the extremities.

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
AKADEMIA WYCHOWANIA FIZYCZNEGO

Praca została złożona w Redakcji dnia 21 kwietnia 1970 r.
