

Grzegorz TRZMIEL*, Dariusz KURZ*, Wiktor SMOCZYŃSKI

MIKROPROCESOROWY UKŁAD STEROWANIA RAMIENIEM ROBOTA SYGNAŁEM ELEKTROMIOGRAFICZNYM

W pracy zaprojektowano oraz przedstawiono prototyp ramienia robota sterowanego sygnałem EMG (elektromiograficznym). W części teoretycznej przedstawiono przegląd publikacji dotyczących charakterystyki i sposobu pomiaru sygnału EMG, koncepcję zastosowania zmierzonego sygnału do sterowania modelem ludzkiej ręki oraz krótki opis zastosowanego w projekcie układu Arduino. W części praktycznej opracowano projekt urządzenia wraz z zestawieniem wykorzystanych podzespołów oraz prezentacją fizycznego obiektu. Na końcu zestawiono koszty elementów składowych w postaci kosztorysu oraz przedstawiono możliwości zastosowań i tendencje rozwojowe zaprojektowanego urządzenia.

SŁOWA KLUCZOWE: sygnał elektromiograficzny EMG, mikroprocesorowy układ sterowania, model ramienia robota.

1. WSTEP

1.1. Elektromiografia (EMG)

Historia elektromiografii sięga czasów osiemnastowiecznego lekarza i fizyka Galvaniego, który jako pierwszy odkrył zjawiska elektryczne zachodzące w tkankach mięśniowych u zwierząt. Pod koniec XIX wieku polski fizjolog Napoleon Cybulski zajął się badaniami procesów elektrycznych we włóknach mięśniowych ssaków, a pierwsza rejestracja takiego sygnału nastąpiła w 1915 roku [2].

Pionierem elektromiografii klinicznej, dającej realne korzyści medycynie, był Fritz Buchthal i jego szkoła, która w latach 50. XX wieku stała się największym ośrodkiem badań nad elektromiografią. Z uwagi na brak komputerów, pomiary i analiza wyników były wykonywane manualnie, co było procesem bardzo żmudnym i dającym bardzo małe ilości danych. W latach 70. XX wieku wprowadzenie metod komputerowych otworzyło nowe możliwości, komputery przejęły ciężar pomiarów i obliczeń, co zapewniało obiektywność badań i znaczne skrócenie

* Politechnika Poznańska

czasu potrzebnego na diagnozę. Miniaturyzacja komputerów i rozwój robotyki stworzyły możliwość korzystania z EMG nie tylko podczas badań lekarskich, ale również przy projektowaniu protez wspomaganych elektrycznie [2].

1.2. Protezy kończyn

Współczesne protezy kończyn to trudne zagadnienie na pograniczu inżynierii i medycyny. Ich tworzenie wymaga specjalistycznej wiedzy z zakresu anatomii, fizjologii, mechaniki, a często również elektroniki i robotyki. Protezy czerpiące energię z mięśni użytkownika są stosunkowo tanie w konstrukcji oraz w naprawie. Niestety, przy protezach nieselektrycznych pojawia się problem braku możliwości świadomej kontroli ruchu przez użytkownika, co pogarsza funkcjonalność. Alternatywą są protezy zasilane elektrycznie, a jednym ze sposobów obsługi takich protez jest zastosowanie sygnału elektrycznego pochodzącego z mięśni użytkownika, mierzonego za pomocą elektromiografu (EMG) [1, 4].

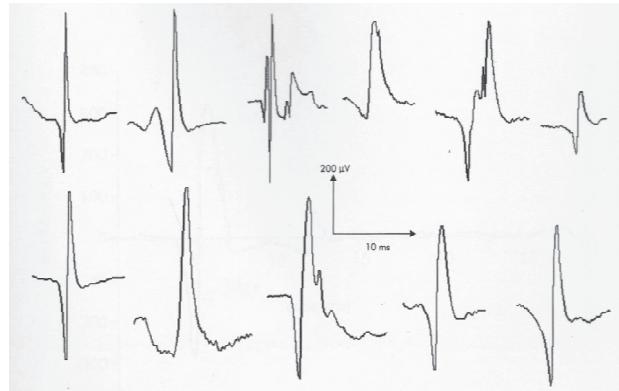
Zastosowanie sygnału EMG w sterowaniu nie ogranicza się do protetyki. Może być również wykorzystany przy obsłudze na odległość lub w formie egzoszkieletu robotów pracujących w szkodliwych, niebezpiecznych dla człowieka warunkach przy zadaniach wymagających dużej dokładności, np. przy obsłudze procesów przemysłowych lub przy rozbrajaniu bomb. Także branża rozrywkowa, a dokładniej jej gałąź VR (ang. *virtual reality* - wirtualna rzeczywistość) może odnieść duże sukcesy przy użyciu urządzeń opartych o sygnał EMG do sterowania w programie lub w grze [13].

2. SYGNAL EMG

2.1. Sygnał EMG przy pracy mięśni

Przy pomiarze EMG bierze się pod uwagę zarówno ocenę czynności spoczynkowej mięśnia, czyli w stanie rozluźnionym, oraz w czasie pracy (skurczu). U zdrowego człowieka w mięśniu w stanie spoczynku powinna teoretycznie występować cisza elektryczna, jednak w praktyce zdarzają się przypadki wyjątkowań. Dlatego ustalając linię bazową, względem której dobrana będzie wartość sygnału, po wystąpieniu której będzie następował ruch serwomechanizmów, trzeba wziąć pod uwagę zakłócenia występujące nawet w całkowicie rozluźnionym mięśniu.

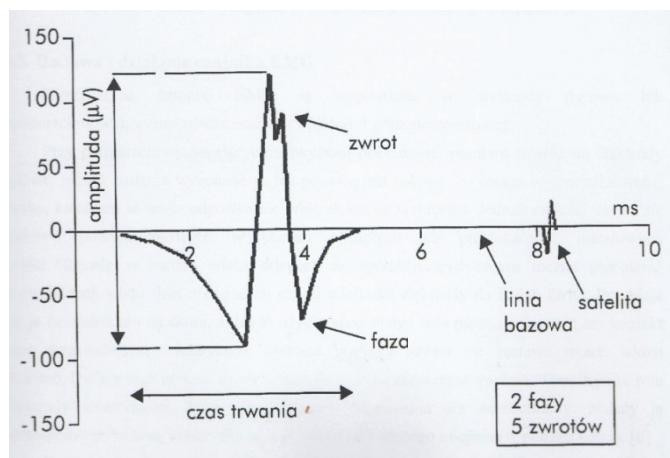
W czasie skurczu występują wyładowania, których amplituda zależy od siły napięcia mięśnia. Przy delikatnym, powolnym ruchu kończyny amplituda sygnału jest niska. Natomiast w czasie nagłego, szybkiego ruchu lub przy pracy pod dużym obciążeniem amplituda jest kilkukrotnie wyższa (rys. 1).



Rys. 1. Przykłady potencjałów występujących w czasie skurczu mięśnia [2]

Przy profesjonalnych badaniach EMG bierze się pod uwagę wiele innych parametrów, takich jak np. długość trwania, kształt czy częstotliwość wyładowań.

Wyładowania pojawiające się podczas pracy mięśnia składają się z głównej iglicy oraz tzw. satelitów (potencjałów satelitarnych). Pojawiają się one najczęściej po głównej iglicy, choć zdarza się, że ją poprzedzają, jednak nie jest to częste zjawisko. Wielu badaczy uważa, że satelity nie powinny występować w zdrowym mięśniu, nie istnieją jednak publikowane badania, które potwierdzają lub przeczyły tej tezie. Na rys. 2 pokazano parametry, których zmierzenie jest możliwe podczas badania EMG.



Rys. 2. Parametry mierzone podczas badania EMG [2]

Problematycznym zagadnieniem przy wykorzystaniu amplitudy sygnału do sterowania jest jej zależność nie tylko od siły skurczu mięśnia, ale również od gęstości włókien mięśniowych w obszarze pomiaru oraz od ich średnicy.

W efekcie, znaczący wpływ na pomiar ma umiejscowienie elektrody pomiarowej, więc konieczna jest kalibracja sprzętu pomiarowego przy każdorazowym podłączeniu osoby do aparatury.

Kolejny problem związany jest bardziej ze sposobem pomiaru, czyli za pomocą elektrod umieszczonych na powierzchni skóry. Wprowadzi to zakłócenia, które wynikają z konieczności przejścia sygnału przez kilka warstw tkanek skórznych, łożu i włosów, które nie przewodzą dobrze prądu elektrycznego [2].

2.2. Budowa i działanie czujnika EMG

Współczesne czujniki EMG są wyposażone w elektrody (igłowe lub powierzchniowe), wzmacniacze oraz filtry (dolno- i górnoprzepustowe).

Przy pomiarach wymagających najwyższej dokładności pomiaru stosuje się elektrody igłowe, jednak badanie wykonane za ich pomocą jest bolesne i wymaga wyspecjalizowanej osoby, która jest w stanie odpowiednio wbić elektrodę w mięsień. Częściej używa się elektrod powierzchniowych w postaci okrągłych lub prostokątnych metalowych części. Obecnie w bardzo wielu sklepach ze sprzętem medycznym można znaleźć produkty wielu firm oferujących różnej wielkości elektrody do badań EMG. Przykleja się je bezpośrednio na skórę, a dzięki użyciu specjalnego żelu można polepszyć ich kontakt oraz przewodnictwo elektryczne. Podczas pomiaru używa się zestawu trzech takich elektrod: jedną umieszcza się na głowie, drugą na przyczepie mięśnia, trzecia pełni rolę elektrody uziemiającej, która ustala poziom odniesienia dla wzmacniaczy. Należy ją umieszczać na badanej kończynie, jednak z dala od badanego mięśnia (w pobliżu kości) [7].

Konieczną cechą wzmacniaczy stosowanych w aparaturze EMG jest zdolność do dużego wzmacniania sygnałów przy minimalnych zakłócenach własnych. Wzmocnienie to wartość określana jako stosunek napięć na wyjściu i wejściu wzmacniacza. Pomiaru sygnału dokonuje się z wykorzystaniem dwóch elektrod podłączonych do wejść wzmacniacza różnicowego (przy tym zastosowaniu nazywanego również biologicznym). Obecnie pomiary EMG odbywają się zwykle w otoczeniu zakłóceń sieciowych (o częstotliwości 50 Hz), które bywają setki razy silniejsze niż sygnały badane. Z tego powodu aparatura EMG musi być wyposażona we wzmacniacze o specjalnej konstrukcji, która pozwala na tłumienie zakłóceń sieciowych. Jest to możliwe dzięki temu, że wektor napięć zakłócających jest na obu elektrodach jednakowy (fazowy). Natomiast sygnał EMG występuje zawsze jako różnica potencjałów i ma kierunki przeciwe. Zdolność wzmacniacza do tłumienia takich sygnałów wyraża parametr CMRR (*common mode rejection ratio*). Współczynnik CMRR jest wyrażany w decybelach i wynosi 20 logarytmów stosunku wielkości sygnałów fazowych do różnicowych. Wielkość współczynnika jest zależna od częstotliwości sygnału, dlatego

go dla czujników EMG wyraża się go dla częstotliwości 50 Hz, a jego wartość wynosi zazwyczaj ponad 100 dB [2].

Ważnym elementem poprawnego pomiaru EMG jest wierna reprodukcja bądanych sygnałów w całym spektrum faz i częstotliwości przy jednoczesnym odrzuceniu innych, mogących zakłócić wyniki. Należy pamiętać, że rozszerzenie pasma powoduje wzrost amplitudy szumów w stosunku do amplitudy sygnału. Dlatego w układzie umieszcza się filtry, których zadaniem jest zmniejszenie poziomu szumów zniekształcających sygnały biologiczne oraz wpływu innych potencjałów przez dobór odpowiedniego pasa przenoszonych częstotliwości dla danego pomiaru. Jeśli podczas pomiaru występują zbyt duże zmiany linii bazowej, można je zredukować przez podniesienie częstotliwości granicznej filtru dolnoprzepustowego. Trzeba jednak zwrócić uwagę, aby nie podnieść jej zbyt wysoko, gdyż wtedy wynik pomiaru mógłby zostać zniekształcony. Istnieje również możliwośćłączenia do układu filtru śródkowozaporowego ustawionego na częstotliwość 50 Hz celem wyeliminowania zakłóceń sieciowych. Wadą takiego rozwiązania jest wycięcie z sygnału końcowego również pożądanej składowej 50 Hz sygnału biologicznego [7].

3. PROJEKT UKŁADU STEROWANIA I PROTOTYPU RAMIENIA

3.1. Założenia projektowe

W pracy podjęto się zaprojektowania i skonstruowania ramienia robota sterowanego sygnałem EMG. W trakcie prac dokonano wyboru sposobu implementacji urządzenia jako modelu ludzkiej ręki sterowanego sygnałem pochodząącym z bicepsa oraz tricepsa użytkownika. Do przetworzenia sygnału odczytanego z czujnika na sygnał sterujący pracą robota wybrano układ Arduino pracujący w oparciu o autorski program.

Urządzenie ma pracować jako proteza dla osób po amputacji kończyny górnej od łokcia w dół przy zachowaniu funkcjonalności układu mięśni antagonistycznych biceps-triceps. Urządzenie ma umożliwiać chwytywanie i przenoszenie przedmiotów za pomocą modelu ręki wyposażonego w dwa serwomechanizmy, sterowane sygnałem z jednego z mięśni, odpowiadającego za zaciskanie i otwieranie dłoni (palców).

Układ pomiarowo-sterujący wraz z wyprowadzeniami dla elektrod pomiarowych jest zamknięty w metalowej skrzynce o dużych gabarytach, jednak jest to prototyp, który docelowo powinien być poddany miniaturyzacji. Model ręki powinien łączyć w sobie dwie cechy: lekkość i wytrzymałość. Gdyby proteza okazała się zbyt ciężka, utrudniłoby to korzystanie z niej osobom o małej sile fizycznej. Z kolei mało wytrzymała byłaby podatna na uszkodzenia mechaniczne, szczególnie przy intensywnej eksploatacji.

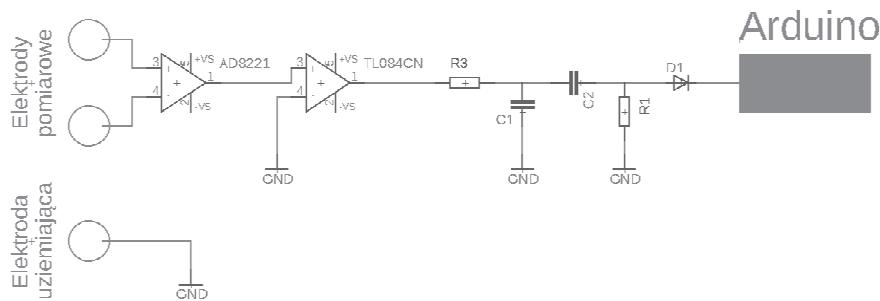
3.2. Realizacja projektu

W projekcie zostały wykorzystane następujące materiały:

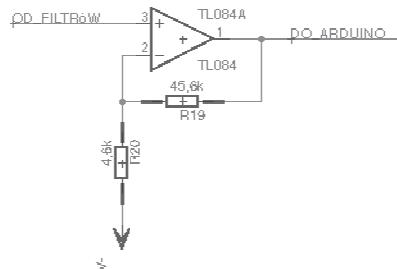
- elektrody pomiarowe,
- przewód ekranowany (celem wyeliminowania zakłóceń sieciowych),
- płytka uniwersalna, do której prylutowane są elementy czujnika EMG,
- przewody połączeniowe męsko-męskie wykorzystane przy łączeniu elementów układu z płytą Arduino,
- metalowa skrzynka pełniąca rolę obudowy dla układu pomiarowo-sterującego,
- klejka wykorzystana do budowy modelu ręki,
- serwomechanizmy pełniące rolę mięśni (powodujące ruch ręki),
- linki pełniące rolę ścięgien (przenoszące ruch serwomechanizmu na model).
- Do budowy urządzenia wykorzystano następujące podzespoły:
- układ Arduino Uno Rev3 [12] oparty na mikrokontrolerze AVR ATmega328 przetwarzający sygnał z czujnika EMG na sygnał sterujący,
- wzmacniacz pomiarowy AD8221 wzmacniający 665 razy sygnał pochodzący bezpośrednio z elektrod pomiarowych,
- wzmacniacz operacyjny TL084CN wzmacniający sygnał pochodzący ze wzmacniacza pomiarowego,
- kondensatory i rezystory pełniące rolę filtrów pasywnych,
- diody prostownicze.

W celu zaprogramowania układu sterowania wykorzystano dedykowane środowisko Arduino IDE, które pozwala implementować funkcje dla układu Arduino. Było ono również używane przy obserwacji przebiegów sygnałów z czujnika, co jest konieczne przy kalibracji urządzenia [3, 5, 14].

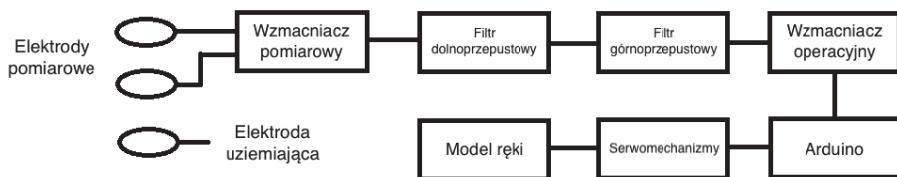
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono schematy, według których skonstruowano urządzenie. Filtry I-rzędu, widoczne na schemacie z rys. 5, przepuszczają częstotliwości z zakresu 55-91 Hz.



Rys. 3. Schemat zaprojektowanego czujnika EMG [6]



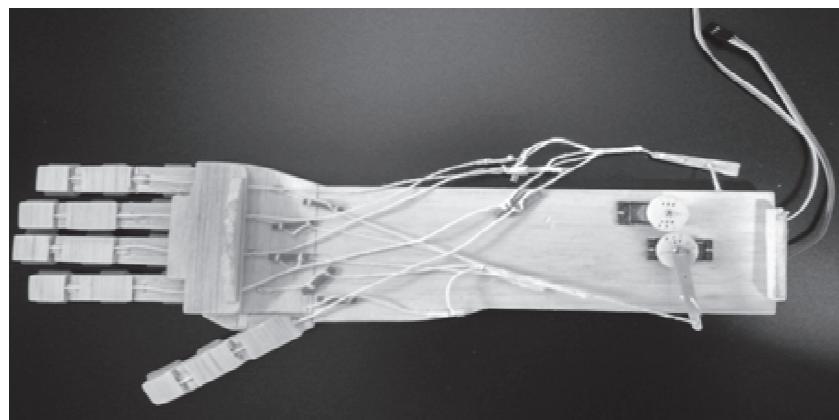
Rys. 4. Schemat wzmacniacza TL084 pracującego w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego



Rys. 5. Schemat ideowy zaprojektowanego urządzenia [6]

Zastosowanie dwóch stopni wzmacniających pozwoliło dobrać progi napięcia odczytanego na ADC, powyżej którego uznawano, że nastąpił skurcz mięśnia. Po kilkunastu próbach tak dobrane progi zapewniały powtarzalny efekt działania urządzenia.

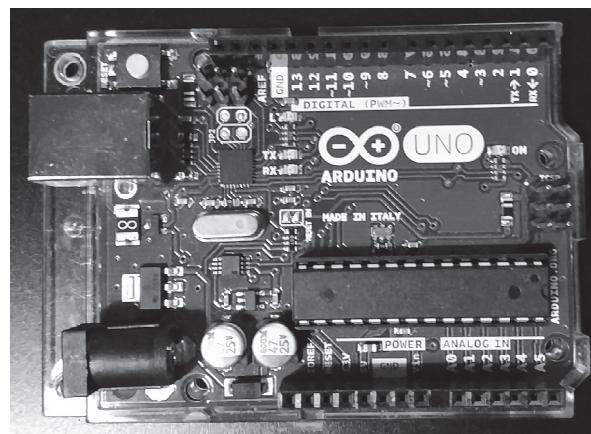
Na rys. 6 znajduje się fotografia wykonanego ze sklejki modelu ręki wraz z przedramieniem z widocznymi serwomechanizmami. Na rys. 7 przedstawiono urządzenie zamknięte w obudowie. Na rys. 8 i 9 pokazano prototyp układu pomiarowo-sterującego urządzenia, czyli czujnik EMG skonstruowany na płytce uniwersalnej oraz płytce Arduino.



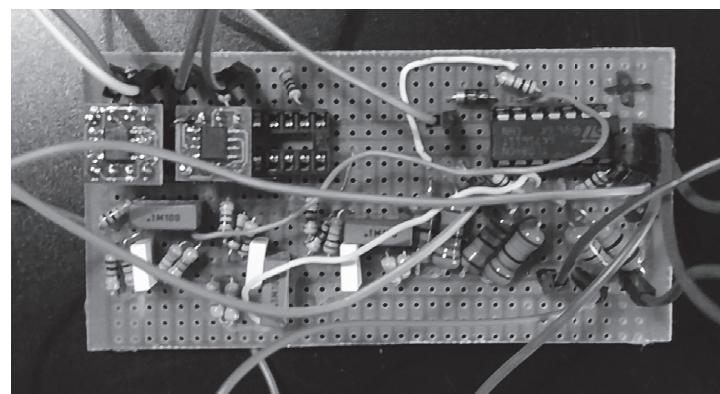
Rys. 6. Model ręki wykorzystany w projekcie [6]



Rys. 7. Urządzenie zamknięte w obudowie z widocznymi wyprowadzeniami do połączenia z elektrodami pomiarowymi [6]



Rys. 8. Płytki Arduino wykorzystywane w projekcie [12]



Rys. 9. Elementy czujnika EMG przylutowane na płytce uniwersalnej [6]

4. MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA W PRAKTYCE

Jednym z najważniejszych zastosowań urządzeń sterowanych sygnałem EMG jest protetyka kończyn. Ludzie, którzy stracili rękę w wyniku choroby czy wypadku, nie są w stanie wykonywać podstawowych czynności takich jak łapanie i przesuwanie przedmiotów czy jedzenie. Jednak, jeżeli utrata kończyny była częściowa i zachowała się część mięśni, jedną z najlepszych perspektyw dla takich osób są elektromechaniczne protezy sterowane sygnałem EMG. W takiej protezie, rolę mięśni powodujących ruch zdrowej kończyny pełnią serwomechanizmy, które wywołują ruch modelu ręki. W przeciwnieństwie do protez wyłącznie mechanicznych, protezy wykorzystujące sygnał EMG do sterowania serwomechanizmami mogą być obsługiwane przez osoby nie posiadające dużej siły fizycznej.

Drugą możliwością jest wykorzystanie robotycznego ramienia sterowanego sygnałem EMG jako urządzenia, które kopiuje ruchy użytkownika. W tym przypadku sygnał elektromiograficzny jest pobierany od zdrowej osoby, a następnie przekazywany do modelu np. ręki. W ten sposób osoba pracująca przy procesie przemysłowym, który wymaga dokładności, a który jest niebezpieczny dla zdrowia, co uniemożliwia bezpośrednią kontrolę, może wykonywać prace przy użyciu takiego urządzenia, nie narażając się na zagrożenie zdrowia i życia. Choć powstają roboty przeznaczone do coraz to dokładniejszych prac, często nadal potrzebna jest bezpośrednia kontrola przez człowieka.

Kolejną opcją jest zastosowanie takiego urządzenia w branży rozrywkowej, szczególnie w połączeniu z technologią VR (ang. *Virtual Reality*). Rynek sprzętu VR szybko się rozwija i cały czas poszukuje się możliwości ograniczenia liczby urządzeń potrzebnych do obsługi programów czy gier. Dzięki zastosowaniu czujników EMG możliwe będzie bardzo wierne odwzorowanie ruchów użytkownika w programie, co poprawi immersję gracza, a w efekcie jego odbiór całości.

5. TENDENCJE ROZWOJOWE

Do tej pory powstał pierwszy prototyp zaprojektowanego urządzenia, spełniający wyłącznie podstawowe funkcje. Celem tej konstrukcji było sprawdzenie czy przy niewielkich nakładach finansowych można stworzyć działające urządzenie funkcjonalnością zbliżone do protezy. Okazało się to możliwe, co otwiera wiele możliwości rozwoju.

Po pierwsze, konieczna jest miniaturyzacja układu pomiarowo-sterującego. Urządzenie aktualnie oparte jest na płytce Arduino o dużych rozmiarach, a podzespoły czujnika EMG są przymocowane do płytki uniwersalnej. Zakup mniejszej płytki Arduino lub całkowita jej wymiana, na przykład na układ z rodziny Ra-

spberry Pi oraz użycie dedykowanej płytki drukowanej PCB pozwoliłoby na znaczne zmniejszenie rozmiarów urządzenia.

Po drugie, układ Arduino wykorzystany w projekcie jest stworzony dla hobbystów i początkujących robotyków, a jego głównym atutem jest cena i prostota obsługi. Jednak układ ten posiada też pewne wady, a najważniejszą z punktu widzenia projektu jest zbyt wolny przetwornik analogowo-cyfrowy, który powoduje opóźnienia w działaniu programu sterującego, a w konsekwencji brak możliwości płynnego sterowania protezą. Dołączenie do układu zewnętrznego przetwornika AC znacznie poprawiłoby komfort i efektywność użytkowania urządzenia.

Najważniejszym elementem czujnika EMG jest wzmacniacz pomiarowy. Powinien on cechować się bardzo dużym wzmacnieniem różnicowym przy minimalnych szumach własnych oraz wysokim współczynnikiem CMRR. Wzmacniacze do badań EMG powinny być również wyposażone w filtr wąskopasmowy 50 Hz, który jest potrzebny do tłumienia zakłóceń sieciowych. Zastosowanie wzmacniacza o takich parametrach znaczco poprawiłoby jakość sygnału oraz ułatwiałoby pracę z nim przez zmniejszenie szumów.

Kolejną możliwością rozwoju jest modyfikacja parametrów samego modelu ręki pełniącego funkcję protezy. Obecnie urządzenie posiada pewne ograniczenia wynikające z konstrukcji. Przenoszenie ciężkich przedmiotów oraz praca w złych warunkach (np. na zewnątrz w czasie deszczu lub przy niskich temperaturach) mogą spowodować uszkodzenie urządzenia. Istnieje jednak możliwość wyeliminowania tych problemów. Po pierwsze, sklejka, z której obecnie zbudowany jest model, mogłaby zostać zastąpiona trwalszym materiałem, na przykład włóknem węglowym. Połączenia klejone można zastąpić trwalszymi, np. nitowanymi. Również linki pełniące rolę ścięgien mogłyby zostać zastąpione bardziej wytrzymałyimi.

Warto zauważyć, że sam czujnik jest uniwersalny i taką samą konstrukcję można zastosować przy budowie innych protez.

6. PODSUMOWANIE

W artykule zaprojektowano oraz skonstruowano ramię robota sterowanego sygnałem EMG. W obecnej formie urządzenie umożliwia chwywanie i przenoszenie przedmiotów, a całym procesem steruje użytkownik przez napinanie odpowiednich mięśni.

Wybór tematyki pracy jest podyktowany rosnącą popularnością urządzeń sterowanych sygnałem EMG oraz chęcią połączenia zagadnień elektrotechniki z medycyną. O elektromiografii do celów diagnostycznych pisze się już od połowy XX. wieku, jednak dopiero w ostatnich latach nastąpił znaczny wzrost zainteresowania tym zagadnieniem w kontekście robotyki i sterowania.

Pierwotne założenia projektowe zostały spełnione, a skonstruowany prototyp posiada podstawowe funkcje i pokazuje, że urządzenie zbudowane według wykonanego projektu funkcjonuje poprawnie.

Docelowo urządzenie mogłoby z powodzeniem służyć jako proteza dla osób po amputacji ręki, jednak potrzebne są dalsze prace nad projektem w celu wyeliminowania problemów i uzyskania większej funkcjonalności, tak jak opisano w rozdziale piątym dotyczącym tendencji rozwojowych.

LITERATURA

- [1] Elamvazuthi I., Parasuraman S., i in., Development of Electromyography Signal Signature for Forearm Muscle [W:] Procedia Computer Science Vol. 76, 2015.
- [2] Emeryk-Szajewska B., Niewiadomska-Wolska M., Neurofizjologia kliniczna. Elektromiografia i elektroneurografia Tom I, Wyd. Medycyna Praktyczna, Kraków, 2008.
- [3] Francuz T., Język C dla mikrokontrolerów, od podstaw do zaawansowanych aplikacji, Helion, Gliwice, 2011.
- [4] Magda M., EMG Signal Models - a Short Review [W:] Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce. Nauki techniczne i inżynierijne Część I, Wyd. Młodzi Naukowcy, Poznań, 2016.
- [5] Monk S., Arduino dla początkujących. Kolejny krok, Helion, 2014.
- [6] Smoczyński W., Projekt ramienia robota sterowanego sygnałem EMG, Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Poznańska, 2018.
- [7] Sudarsan S., Chandra Sekaran E., Design and Development of EMG Controlled Prosthetics Limb [W:] Procedia Engineering Vol. 38, 2012.
- [8] Strona internetowa Botland, <https://botland.com.pl>, 25.01.2019, Arduino.
- [9] Strona internetowa Arduino, <https://www.arduino.cc>, 23.01.2019, Products.
- [10] Strona internetowa Arduino, <https://www.arduino.cc>, 23.01.2019, Software.
- [11] Strona internetowa Forbot, <https://forbot.pl/>, 25.01.2019, Kurs Arduino.
- [12] Strona internetowa Arduino Store, <https://store.arduino.cc>, 10.01.2018: Arduino Uno Rev3.
- [13] Strona internetowa Instructables, <http://www.instructables.com>, 14.12.2018: DIY Muscle Sensor / EMG Circuit for a Microcontroller.
- [14] Strona internetowa Wareable, <https://wareable.com>, 10.01.2019: Explained: How does VR actually work.

MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM FOR ROBOT ARM WITH ELECTROMIFICATION SIGNAL

A prototype of a robot arm controlled by EMG (electromyographic) signal was designed and presented in the work. The theoretical part presents an overview of publications on the characteristics and measurement of EMG signal, the concept of using the measured signal to control the human hand model and a brief description of the Arduino

system used in the project. In the practical part, the design of the device together with the list of used components and the presentation of the physical object were developed. At the end, the cost of components in the form of a cost estimate was presented and the application possibilities and development trends of the designed device were presented.

(Received: 05.02.2019, revised: 10.03.2019)