

## Projekt opaski elektro-stymulującej do rehabilitacji kończyn zwierząt

**Streszczenie.** Elektrostymulacja nerwowo-mięśniowa (EMS) to nowoczesna metoda rehabilitacji mięśni u zwierząt. Celem pracy było opracowanie projektu prototypu urządzenia do domowej elektrostymulacji, składającego się z elastycznej opaski ortopedycznej oraz zdalnie sterowanego generatora impulsów elektrycznych. Projekt przewiduje zastosowanie opaski dla zwierząt różnych gatunków i wielkości, takich jak koty czy konie, z możliwością precyzyjnego dostosowania parametrów stymulacji do potrzeb pacjenta. Mikrokontroler ESP32 z modulem Bluetooth umożliwia monitorowanie terapii w czasie rzeczywistym, a przyszłe plany obejmują wykorzystanie sztucznej inteligencji do automatycznego dostosowywania terapii. Opaska zapewni łatwe umiejscowienie elektrod i indywidualne dopasowanie dzięki technologii skanowania 3D, co zwiększa efektywność i komfort rehabilitacji zwierząt po urazach mięśniowo-szkieletowych.

**Abstract.** Electrical Muscle Stimulation (EMS) is a modern method used for muscle rehabilitation in animals. The aim of this project was to develop a prototype device for home-based muscle stimulation, consisting of a flexible orthopedic band and a remotely controlled electrical pulse generator. The design allows for use in animals of various species and sizes, such as cats and horses, with the ability to precisely adjust stimulation parameters according to the patient's needs. The ESP32 microcontroller with Bluetooth enables real-time monitoring of therapy, and future plans include the implementation of artificial intelligence algorithms to automatically adjust the treatment. The band ensures easy electrode placement and individualized fit through 3D scanning technology, enhancing the effectiveness and comfort of rehabilitation for animals recovering from musculoskeletal injuries. (The design of an electro-stimulating band for the rehabilitation of animal limbs)

**Słowa kluczowe:** elektrostymulacja nerwowo-mięśniowa (EMS), rehabilitacja zwierząt, impulsy elektryczne, terapia mięśni, stymulacja mięśni

**Keywords:** neuromuscular electrical stimulation (EMS), animal rehabilitation, electrical impulses, muscle therapy, muscle stimulation

### Wprowadzenie

Elektrostymulacja nerwowo-mięśniowa (EMS, ang. *Electrical Muscle Stimulation*) jest techniką terapeutyczną polegającą na wywołaniu skurczu mięśni za pomocą impulsów elektrycznych. Jest to metoda szeroko stosowana w rehabilitacji mięśni, mająca na celu ich wzmocnienie, zapobieganie atrofii oraz przywrócenie prawidłowego funkcjonowania układu mięśniowo-nerwowego [12,13]. Skurcze mięśni są wywoływane przez impulsy o częstotliwości dostosowanej do naturalnych sygnałów nerwowych, co umożliwia symulację fizjologicznych procesów zachodzących w organizmie [1].

EMS jest stosowana zarówno w medycynie ludzi, jak i weterynarii (rys. 1), gdzie pomaga w leczeniu urazów mięśniowo-szkieletowych u zwierząt. Zastosowanie tej technologii w rehabilitacji zwierząt zyskuje na popularności, ponieważ umożliwia efektywne wspomaganie procesu powrotu do zdrowia po urazach, operacjach czy schorzeniach neurologicznych [7]. Technika ta w obszarze medycyny należy do rozwiązań inteligentnych podobnie, jak opatrunki medyczne opisane w pracy naukowej prof. Korzeniewskiej [11].



Rys. 1. Zabieg elektrostymulacji

### Fizjologia skurczu mięśni

Podstawą działania elektrostymulacji nerwowo-mięśniowa jest fizjologia skurczu mięśnia. W organizmie impuls nerwowy, pochodzący z centralnego układu

nerwowego, przekazywany jest przez neuron ruchowy do komórki mięśniowej. Neuron ruchowy, którego zakończenia znajdują się w mięśniu, uwalnia neuroprzekaźnik – acetylocholiny. Neuroprzekaźnik ten powoduje depolaryzację błony komórkowej miocytu, co inicjuje kaskadę reakcji biochemicznych prowadzących do skurczu mięśnia [5,12].

Podczas skurczu mięśnia dochodzi do przesunięcia nitek aktyny i miozyny w sarkomerach, co skutkuje skróceniem włókien mięśniowych. Proces ten wymaga dostarczenia energii w postaci ATP (adenozynotrifosforanu). Elektrostymulacja naśladuje ten proces, wywołując impuls elektryczny, który depolaryzuje błonę komórkową w podobny sposób, jak naturalny bodziec nerwowy, co prowadzi do skurczu mięśnia bez udziału woli pacjenta [2,15].

### Jednostka ruchowa mięśni

Jednostka ruchowa (rys. 2), nazywana również jednostką motoryczną, składa się z jednego neuronu ruchowego oraz grupy komórek mięśniowych (miocytów), które są przez niego unerwione. Każdy neuron ruchowy kontroluje określoną liczbę miocytów. W momencie aktywacji jednostki ruchowej wszystkie miocyty unerwione przez ten neuron kurczą się jednocześnie [16].

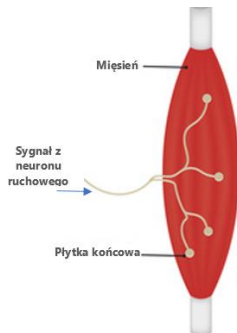
Jednostki motoryczne mogą różnić się pod względem liczby miocytów, które unerwiają. W mięśniach wymagających precyzyjnych ruchów, takich jak mięśnie palców, jedna jednostka motoryczna unerwia tylko kilka komórek mięśniowych. W dużych mięśniach, takich jak mięśnie nóg, jedna jednostka może kontrolować setki miocytów.

W procesie elektrostymulacji aktywacja jednostek ruchowych następuje zgodnie z zasadą „wszystko albo nic”, co oznacza, że każdy neuron ruchowy powoduje skurcz wszystkich miocytów, które unerwia, w odpowiedzi na wystarczająco silny impuls [4].

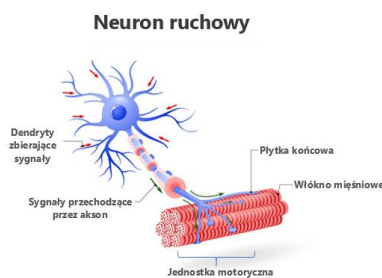
### Impuls pobudzający

Istotna jest również częstotliwość pobudzenia jednostki ruchowej. Zwiększenie częstotliwości impulsów prowadzi do

zwiększenia siły skurczu mięśnia. Fizjologiczne pobudzenia mięśni są od 10Hz do 50Hz. Gdy częstotliwość impulsu wynosi 50Hz dochodzi do skurczu tężcowego bolesnego, pełnego skurczu mięśnia. Przy tej częstotliwości pobudzenia zaczynają się nakładać na siebie przez co kurczy się on maksymalnie i nie dochodzi do rozluźnienia mięśnia. Przy 90Hz występuje drżenie mięśni, a przy coraz większej częstotliwości zaczynają się rozluźniać [3].



Rys. 2. Jednostka motoryczna [13]



Rys. 3. Neuron ruchowy [13]

### Siła skurczu mięśnia

Siła skurczu mięśni zależy od liczby aktywowanych jednostek motorycznych oraz od częstotliwości 23obudzeni. W organizmie człowieka oraz zwierząt mięśnie składają się z dwóch głównych typów włókien mięśniowych: wolno kurczliwych (typ I) oraz szybko kurczliwych (typ II). Włókna typu I mają metabolizm tlenowy i są aktywowane podczas długotrwałej, ale niezbyt intensywnej pracy, co sprawia, że są bardziej odporne na zmęczenie. Włókna typu II, o beztlenowym metabolizmie, są aktywowane podczas krótkotrwałych, intensywnych wysiłków, takich jak skurcz maksymalny mięśnia.

Elektrostymulacja najpierw aktywuje włókna typu I, co jest naturalnym procesem dla organizmu. Dopiero przy wyższych wartościach amplitudy i częstotliwości 23obudzeni aktywowane są włókna typu II, które odpowiadają za generowanie maksymalnej siły skurczu. Poprawa siły mięśniowej w rehabilitacji EMS wynika z lepszej rekrutacji jednostek motorycznych, co prowadzi do bardziej efektywnej pracy mięśni [16].

### Różnice anatomiczne i fizyczne wśród zwierząt

Jednym z najważniejszych wyzwań związanych z elektrostymulacją u zwierząt jest różnorodność anatomiczna i fizjologiczna poszczególnych gatunków. Każdy gatunek, a nawet osobnik, może wykazywać odmienne cechy, które wpływają na reakcję na stymulację elektryczną. Mięśnie różnych gatunków mogą mieć różną grubość, strukturę oraz poziom unerwienia, co przekłada się na różną efektywność zabiegu [7]. Na przykład, skóra niektórych zwierząt jest grubsza lub pokryta futrem, co może stanowić przeszkodę dla skutecznego przekazywania impulsów elektrycznych przez elektrody.

Dostosowanie parametrów elektrostymulacji, takich jak częstotliwość, amplituda i szerokość impulsu, do specyficznych potrzeb danego gatunku uzyskania

pożądanych efektów terapeutycznych. Nieprawidłowo dobrane parametry mogą prowadzić do nieskuteczności zabiegu lub wręcz do wywołania bólu i dyskomfortu u zwierzęcia, co jest szczególnie istotne w kontekście zachowania dobrostanu pacjenta [9].

### Reakcje behawioralne i stres u zwierząt

Zwierzęta, w przeciwieństwie do ludzi, nie rozumieją celu zabiegu i mogą reagować na niego stresem lub niepokojem. Nowe doświadczenia, takie jak przyłożenie elektrod czy odczuwanie nieznanego bodźca elektrycznego, mogą wywoływać lęk, zwłaszcza jeśli zwierzę wcześniej nie było poddawane takim zabiegom. Stres ten może wpłynąć negatywnie na przebieg rehabilitacji, powodując u zwierzęcia napięcie mięśni, co z kolei utrudnia precyzyjne umieszczenie elektrod i skuteczność terapii.

Aby zminimalizować stres, konieczne jest podejście uwzględniające potrzeby behawioralne zwierzęcia. Odpowiednie przygotowanie zwierzęcia do zabiegu, stopniowe wprowadzanie nowych bodźców oraz zapewnienie spokojnego otoczenia są kluczowe dla efektywnego przeprowadzenia terapii. W niektórych przypadkach, zwłaszcza w przypadku zwierząt o szczególnie wysokim poziomie niepokoju, może być konieczne zastosowanie delikatnych środków uspokajających [15].

### Utrudnienia techniczne i optymalne umiejscowienie elektrod

Aby prawidłowo przeprowadzić zabieg elektrostymulacji należy prawidłowo umiejscowić elektrody na ciele zwierzęcia. W przypadku małych zwierząt lub zwierząt o nieregularnej budowie anatomicznej, takich jak koty czy ptaki, znalezienie odpowiednich punktów motorycznych nerwów, czyli obszarów na powierzchni skóry znajdujących się najbliżej nerwu ruchowego, który przekazuje impulsy do mięśnia, może być trudne. Niewłaściwie umiejscowione elektrody mogą prowadzić do nierównomiernej stymulacji mięśni, co z kolei obniża efektywność terapii [8].

Dodatkową trudność stanowi konieczność dostosowania parametrów urządzenia do grubości tkanki mięśniowej i skóry. Przykładowo, u zwierząt z grubą warstwą tłuszczu podskórnego konieczne może być zwiększenie amplitudy impulsu, co jednak może powodować dyskomfort lub nadmierne skurcze mięśni [14].

### Logistyka i organizacja zabiegu

Elektrostymulacja mięśni jest najskuteczniejsza, gdy sesje terapeutyczne są regularne i odpowiednio zaplanowane. Dla wielu właścicieli zwierząt może to być wyzwanie, zwłaszcza jeśli zabiegi muszą być przeprowadzane codziennie lub kilka razy w tygodniu. W warunkach domowych organizacja takich sesji może być trudna, szczególnie jeśli właściciel nie posiada odpowiedniego doświadczenia w obsłudze urządzeń EMS [6].

Dodatkowo, niektóre zwierzęta mogą nie współpracować podczas sesji, co może wymagać obecności wykwalifikowanego specjalisty weterynaryjnego, co z kolei zwiększa koszty terapii. Dlatego istotne jest, aby urządzenia do EMS były łatwe w obsłudze, a proces aplikacji opaski elektro-stymulującej był intuicyjny i nie wymagał zaawansowanych umiejętności technicznych [10].

### Założenia projektowe

Projekt opaski elektro-stymulującej dla zwierząt ma na celu stworzenie innowacyjnego narzędzia do rehabilitacji, które jednocześnie spełnia szereg wymogów technologicznych i praktycznych. Ergonomia, bezpieczeństwo, łatwość obsługi i skuteczność terapeutyczna stanowią fundamenty, na których opiera się

zamierzony efekt działania urządzenia. Każdy z tych aspektów jest niezbędny, aby zapewnić komfort zwierzętom i maksymalizować efektywność terapii.

Celem niniejszej pracy jest zaprojektowanie opaski ortopedycznej oraz generatora impulsów elektrycznych, umożliwiających samodzielne przeprowadzanie elektrostymulacji mięśni w warunkach domowych. Zastosowanie tego rozwiązania ma przyspieszyć proces powrotu do sprawności fizycznej po urazach mięśniowo-szkieletowych, minimalizując potrzebę częstych wizyt w klinikach weterynaryjnych. Prototyp urządzenia, rozwijany w ramach projektu, ma na celu umożliwienie prowadzenia terapii w miejscu pobytu zwierzęcia, co znacząco ograniczy stres związany z transportem i usprawni rehabilitację.

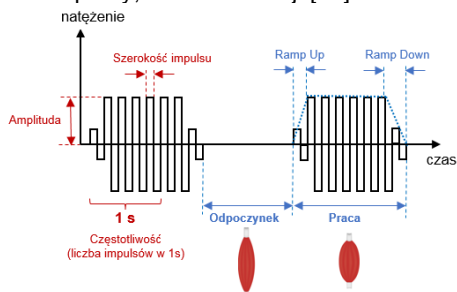
### Zakres pracy

Zakres prac obejmuje badania konstrukcyjne oraz optymalizację prototypu urządzenia EMS przeznaczonego do rehabilitacji zwierząt. Projekt urządzenia opiera się na zastosowaniu elastycznej opaski ortopedycznej, która będzie dostosowana do anatomicznych potrzeb pacjenta. Dodatkowo urządzenie będzie wyposażone w zdalny system kontroli, który pozwoli na monitorowanie postępów rehabilitacji oraz dostosowywanie parametrów stymulacji.

Urządzenie ma być wyposażone w technologię sztucznej inteligencji, która na podstawie zbieranych danych będzie automatycznie dostosowywać parametry stymulacji do potrzeb pacjenta. Opaski będą tworzone na podstawie trójwymiarowych skanów kończyn pacjentów, co pozwoli na ich pełną personalizację.

### Parametry elektrostymulacji

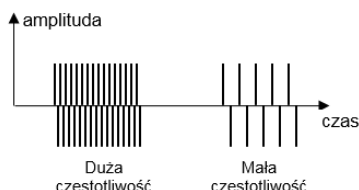
Stosowany w symulacji sygnał prądowy składa się z serii impulsów odpowiedzialnej za pracę mięśnia podczas skurczu a pomiędzy seriami pracy występuje odpoczynek mięśni tak zwana relaksacja (rys. 4). Parametry stymulacji możemy podzielić na dwie grupy: parametry impulsowe – częstotliwość, amplituda, szerokość impulsów, parametry czasowe: czas pracy, czas relaksacji [16].



Rys. 4. Wykres serii impulsów [13]

### Częstotliwość

Częstotliwość impulsów określa liczbę impulsów na sekundę. Wyrażana jest w hercach (Hz) (rys. 5). W stymulacji EMS, każdy impuls odpowiada za pobudzenie włókien mięśniowych. Im większe połączenie impulsów, tym większa siła skurczu, a tym samym, większa wykonana praca mięśnia w jednostce czasu [7].



Rys. 5. Wykres częstotliwości [13]

Częstotliwość impulsów elektrycznych ma znaczenie dla rodzaju skurczu mięśnia. Przy niskich częstotliwościach (10–

20 Hz) skurcze mięśnia są niepełne i przerywane. Zwiększenie częstotliwości powoduje, że skurcze zaczynają się nakładać, co prowadzi do skurczu tężcowego niepełnego (20–50 Hz), a przy wyższych częstotliwościach do skurczu tężcowego pełnego, w którym mięsień nie ma możliwości rozluźnienia pomiędzy kolejnymi impulsami [15].

W naturalnych warunkach skurcz mięśnia jest kontrolowany przez impulsy nerwowe o częstotliwości około 10–50 Hz. Elektrostymulacja odtwarza te impulsy, aby wywołać skurcz mięśniowy o pożądanej intensywności i czasie trwania. Warto zauważyć, że przy częstotliwościach powyżej 50 Hz mięsień osiąga maksymalny skurcz, co może prowadzić do bólu i zmęczenia mięśnia, jeśli stymulacja jest zbyt intensywna lub trwa zbyt długo [3].

### Amplituda i szerokość impulsu

Amplitudą nazywamy intensywność symulacji. Amplituda impulsu musi być wyższa niż próg pobudzenia, aby wywołać skurcz mięśnia. Stopniowo zwiększając natężenie prądu angażujemy coraz więcej miocytów w procesie skurczu. Po osiągnięciu wartości 100mA mięsień nie będzie się już bardziej kurczyć, gdyż zarówno włókna nerwowe zaopatrujące jednostki motoryczne typu II, jak i typu I są wszystkie zaangażowane. Szerokość impulsu to czas trwania impulsu, który wyraża się w mikrosekundach. Czas trwania impulsu powinien być taki sam jak współczynnik pobudliwości dla nerwu. Szerokość impulsu ma wpływ na siłę skurczu i odczuwalność intensywności sygnału. Zakres zmiany wynosi od 10 do 400 mikrosekund. Zmieniając zarówno szerokość impulsu jak i jego wysokość (amplitudę) można uzyskać zwiększenie siły skurczu mięśnia. Zwiększając czas trwania impulsu, uzyskuje się (przy stałej amplitudzie) większy skurcz przy zaangażowaniu jednostek motorycznych typu II, mających niższy próg pobudliwości [14].

### Czas pracy i relaksacji

Cykl pracy zabiegu elektrostymulacji mięśniowo-nerwowej dzieli się na dwa okresy stymulacji: czas pracy i czas odpoczynku, relaksacji. Czas pracy – aktywna stymulacja serią impulsów powodujących skurcz mięśnia. Czas relaksacji – przerwa pomiędzy skurczami przeznaczona na odpoczynek mięśnia. Cykl pracy to wskaźnik, który określa procentowy udział aktywnej stymulacji do całego cyklu stymulacji (1). Czas relaksacji powinien być około 5 razy większy niż czas pracy. Gdy proporcje byłyby odwrotne skutkowało to męczeniem się mięśnia i bólem odczuwanym przez pacjenta [14].

$$\text{cykl pracy} = \frac{\text{czas pracy}}{\text{czas pracy} + \text{czas relaksacji}} \times 100\% \quad (1)$$

### Generator impulsów

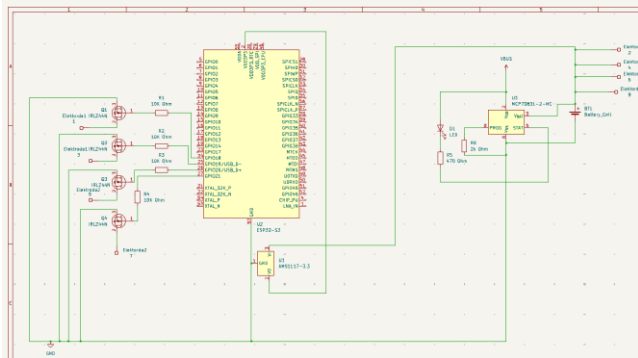
Cechy funkcjonalne urządzenia przedstawiają się następująco:

- urządzenie będzie posiadało 4 niezależne kanały symulacyjne;
- częstotliwość: 1-120 Hz;
- czas trwania impulsu: od 100 do 400 mikrosekund. Dla delikatniejszych zwierząt lub bardziej precyzyjnych zastosowań można stosować krótsze czasy trwania impulsu;
- natężenie prądu (amplituda): Zakres może wynosić od 1 do 100 mA. Natężenie będzie regulowane w zależności od wielkości zwierzęcia i grubości jego tkanek.

### Schemat urządzenia

Na rysunku 6 zamieszczono schemat funkcjonalny urządzenia, główne elementy to:

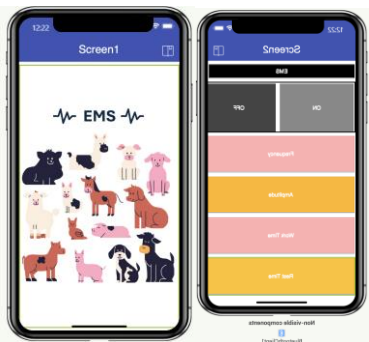
- mikrokontroler ESP32 z wbudowanym kontrolerem magistrali komunikacyjnej Bluetooth;
- MCP73831/2 – układ ładowania akumulatora Li-Po;
- cztery tranzystory MOSFET - IRLZ44N do sterowania prądem na każdy kanał;
- rezystory: 10 kΩ dla bramek MOSFET-ów oraz do ustawienia prądu ładowania dla MCP73831/2;
- akumulator Li-Po 3.7V jako źródło zasilania;
  - osiem elektrod (po dwie na 1 kanał) do elektrostymulacji.



Rys. 6. Schemat urządzenia

### Aplikacja sterująca urządzeniem

Aplikacja mobilna będzie wysyłać dane konfiguracyjne takie jak częstotliwość, amplituda, czas pracy i czas relaksacji do ESP32, które następnie będzie aktualizować te parametry (rys. 7).



Rys. 7. Interfejs aplikacji

### Opis urządzenia

Zastosowanie czterech niezależnych kanałów stymulacyjnych pozwoli na jednoczesną pracę z kilkoma grupami mięśniowymi. Dzięki temu możliwe będzie kompleksowe podejście do terapii, które obejmuje różne partie mięśniowe zwierzęcia, dostosowane do jego indywidualnych potrzeb. W każdym z tych kanałów można ustawić częstotliwość impulsów w zakresie od 1 do 120 Hz oraz czas trwania impulsu od 100 do 400 mikrosekund. Taka precyzyjna regulacja parametrów jest niezbędna, aby skutecznie przeprowadzać terapię, dostosowując intensywność stymulacji do wielkości zwierzęcia oraz stanu jego mięśni. Amplituda prądu, która wynosi od 1 do 100 mA, będzie także regulowana w zależności od grubości tkanek i rodzaju urazu, co pozwoli na delikatne podejście do bardziej wrażliwych zwierząt.

### Zdalne sterowanie i monitorowanie procesu

Urządzenie zostało zaprojektowane z myślą o zdalnym sterowaniu i monitorowaniu przebiegu terapii. Dzięki zastosowaniu mikrokontrolera ESP32 z modułem Bluetooth, użytkownicy będą mogli sterować urządzeniem za pomocą aplikacji mobilnej, co znacząco ułatwi obsługę opaski zarówno dla weterynarzy, jak i właścicieli zwierząt (rys. 8). Aplikacja pozwoli na precyzyjne dostosowanie

parametrów stymulacji, takich jak częstotliwość, amplituda, czas pracy i czas relaksacji, co daje pełną kontrolę nad przebiegiem rehabilitacji.

Co więcej, system zdalnego monitorowania umożliwi analizę danych z sesji stymulacyjnych w czasie rzeczywistym, co pozwoli na dynamiczne dostosowywanie parametrów stymulacji w zależności od postępów terapii. Rozważane jest również zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji do analizy zebranych danych, co pozwoli na automatyczne rekomendacje i precyzyjne dostosowywanie parametrów stymulacji do potrzeb danego zwierzęcia. Integracja z chmurą umożliwi przesyłanie danych dotyczących każdej sesji, takich jak czas trwania czy reakcje mięśniowe, co stworzy pełen obraz postępów rehabilitacyjnych.

```

1 #include <Arduino.h>
2 #include <BluetoothSerial.h>
3
4 // Definicje pinów
5 const int channelPins[4] = {10, 19, 21, 22};
6
7 // Parametry dla każdego kanału
8 int frequencies[4] = {10, 20, 30, 40};
9 int amplitudes[4] = {128, 128, 128, 128}; // Amplituda PWM (0-255)
10 int workTimes[4] = {1000, 1000, 1000, 1000}; // Czas pracy w ms
11 int restTimes[4] = {1000, 1000, 1000, 1000}; // Czas relaksacji w ms
12
13 BluetoothSerial SerialBT;
14
15 void setup() {
16   Serial.begin(115200);
17   SerialBT.begin("ESP32_EMS");
18   SerialBT.register_callback(btCallback);
19 }
20
21 // Konfiguracja pinów PWM dla każdego kanału
22 for (int i = 0; i < 4; i++) {
23   ledcSetup(i, frequencies[i], 8); // Konfiguracja PWM, 8-bitowa rozdzielczość
24   ledcAttachPin(channelPins[i], i); // Przypisanie pinu do kanału
25 }
26
27 void loop() {
28   if (SerialBT.available()) {
29     String btInput = SerialBT.readStringUntil('\n');
30     parseBluetoothInput(btInput);
31   }
32
33   // Generowanie sygnałów PWM dla każdego kanału
34   for (int i = 0; i < 4; i++) {
35     // Włączenie impulsu
36     ledcWrite(i, amplitudes[i]);
37     delay(workTimes[i]);
38     // Wyłączenie impulsu (relaksacja)
39     ledcWrite(i, 0);
40     delay(restTimes[i]);
41   }
42 }
43
44 void btCallback(esp_spp_cb_event_t event, esp_spp_cb_param_t *param) {
45   if (event == ESP_SPP_SRV_OPEN_EVT) {
46     Serial.println("Device connected");
47   }
48 }
49
50 void parseBluetoothInput(String input) {
51   char type = input.charAt(0);
52   int channel = input.charAt(1) - '0';
53   int value = input.substring(2).toInt();
54
55   if (channel < 0 || channel > 3) {
56     SerialBT.println("Invalid channel");
57     return;
58   }
59
60   switch (type) {
61     case 'F':
62       frequencies[channel] = value;
63       ledcSetup(channel, frequencies[channel], 8); // Aktualizacja częstotliwości PWM
64       SerialBT.println("Frequency for channel " + String(channel) + " set to: "
65         + String(frequencies[channel]));
66       break;
67     case 'A':
68       amplitudes[channel] = value;
69       SerialBT.println("Amplitude for channel " + String(channel) + " set to: "
70         + String(amplitudes[channel]));
71       break;
72     case 'W':
73       workTimes[channel] = value;
74       SerialBT.println("Work time for channel " + String(channel) + " set to: "
75         + String(workTimes[channel]));
76       break;
77     case 'R':
78       restTimes[channel] = value;
79       SerialBT.println("Rest time for channel " + String(channel) + " set to: "
80         + String(restTimes[channel]));
81       break;
82     default:
83       SerialBT.println("Invalid command");
84       break;
85   }
86 }

```

Rys. 8. Program do sterowania urządzeniem

### Konstrukcja wielokanałowego systemu stymulacji

Projektowanie wielokanałowego systemu stymulacji wiązało się z wyzwaniem konstrukcyjnym, które zostały rozwiązane przez zastosowanie tranzystorów MOSFET, odpowiedzialnych za regulację prądu na każdym kanale. Każdy z czterech kanałów działa niezależnie, co pozwala na precyzyjną kontrolę przepływu impulsów elektrycznych do poszczególnych grup mięśniowych. Zapewnienie niezależnej pracy kanałów pozwala na harmonijną stymulację mięśni, bez zakłóceń pomiędzy elektrodami.

### Integracja z Internetem i analiza danych

Innowacyjność projektu opiera się również na integracji z Internetem, co umożliwia zdalną analizę danych dotyczących procesu rehabilitacji. Dane zebrane podczas sesji będą przesyłane do chmury, gdzie będą analizowane i interpretowane w celu poprawy jakości terapii. Algorytmy będą analizować parametry takie jak czas pracy, częstotliwość impulsów, amplituda oraz reakcje mięśniowe, co pozwoli na lepsze zrozumienie procesu regeneracji mięśni u zwierząt.

W przyszłości, planowane jest wprowadzenie elementów sztucznej inteligencji, które mogłyby automatycznie dostosowywać parametry stymulacji na podstawie analizy danych i postępów terapii. Dzięki temu system mógłby dynamicznie reagować na zmieniający się stan zdrowia pacjenta, dostosowując intensywność stymulacji do jego aktualnych potrzeb. Integracja tego rozwiązania wymaga jednak zaawansowanych modeli predykcyjnych i protokołów komunikacyjnych, które zapewnią bezpieczeństwo przesyłanych danych oraz ich precyzyjną analizę.

### Model opaski

Projekt opaski elektro-stymulującej dla zwierząt opiera się na kilku założeniach, które mają na celu maksymalne dostosowanie urządzenia do potrzeb zwierząt różnej wielkości i gatunków, przy jednoczesnym zachowaniu ergonomii, komfortu oraz skuteczności terapeutycznej. Opaska musi być elastyczna, lekka i dostępna w różnych rozmiarach, aby umożliwić jej bezpieczne i wygodne użytkowanie zarówno u małych zwierząt, takich jak koty, jak i u większych, takich jak konie. Ważnym aspektem jest jej konstrukcja – opaska powinna być łatwa do zakładania, nawet w sytuacjach, gdy zwierzę jest niespokojne. Zastosowanie trwałych materiałów, które zapobiegają otarciom i podrażnieniom skóry, jest niezbędne dla komfortu i zdrowia zwierzęcia.

### Projekt opaski

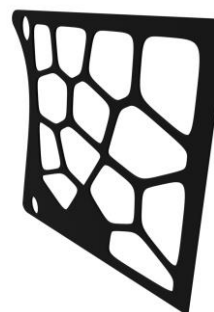
Projekt opaski do elektrostymulacji dla zwierząt opiera się na zaawansowanych technologiach, które mają na celu zapewnienie najwyższej precyzji i skuteczności w rehabilitacji zwierząt. Głównym celem jest projektu jest indywidualne dostosowanie opaski do każdego zwierzęcia, co zostanie osiągnięte za pomocą technologii skanowania 3D (rys. 9). Skaner 3D pozwoli na precyzyjne mapowanie anatomii ciała zwierzęcia, umożliwiając stworzenie opaski o unikalnym kształcie, idealnie dopasowanej do jego ciała. Dzięki temu opaska będzie idealnie przylegać do powierzchni skóry, co zwiększy komfort użytkowania oraz skuteczność terapii.

Opaska zostanie również wyposażona w dedykowane otwory na elektrody, rozmieszczone w strategicznych miejscach, które odpowiadają punktom motorycznym nerwów. Lokalizacja tego punktu ma fundamentalne znaczenie w procesie elektrostymulacji, ponieważ poprawnie umieszczone elektrody zwiększają skuteczność zabiegu. Na rysunku 10 przedstawiono wstępną konstrukcję opaski, gdzie widać rozmieszczenie otworów w sposób intuicyjny,

aby ułatwić właścicielowi zwierzęcia przeprowadzenie zabiegu w domu.



Rys. 9. Skaner 3D [18]



Rys. 10. Model opaski

Zaletą takiej konstrukcji jest to, że elektrody będą mogły być umiejscowione precyzyjnie. Poprzez wykorzystanie technologii skanowania 3D i indywidualne dopasowanie opaski, elektrody będą zawsze trafiały w odpowiednie miejsca, co zminimalizuje ryzyko błędów i ułatwi użytkowanie nawet dla osób bez specjalistycznej wiedzy. Tak zaprojektowana opaska nie tylko zapewni wygodę dla zwierzęcia, ale również zredukuje stres związany z koniecznością wielokrotnych wizyt u weterynarza, umożliwiając właścicielom przeprowadzanie terapii w domowych warunkach.

### Podsumowanie

Projekt opaski elektro-stymulującej dla zwierząt powstał z myślą o szerokim zastosowaniu w rehabilitacji zwierząt różnej wielkości i gatunków. Jego głównym atutem jest dostosowanie parametrów urządzenia do indywidualnych potrzeb pacjentów, zapewniając jednocześnie komfort użytkowania oraz wysoką skuteczność terapeutyczną. Opaska będzie lekka, elastyczna i dostępna w różnych rozmiarach, co umożliwi jej bezpieczne użycie zarówno u małych zwierząt, jak koty, jak i większych, takich jak konie.

W projekcie przewidziano cztery niezależne kanały stymulacyjne, które umożliwią precyzyjne dopasowanie parametrów stymulacji, takich jak częstotliwość, czas trwania impulsów oraz amplituda prądu, w zależności od potrzeb zwierzęcia. Dzięki temu możliwe będzie prowadzenie efektywnej terapii, dopasowanej do wielkości zwierzęcia oraz specyfiki jego urazów.

Mikrokontroler ESP32 z modułem Bluetooth pozwala na łatwe dostosowywanie parametrów stymulacji oraz monitorowanie postępów terapii. Zdalna analiza danych, przeprowadzana w czasie rzeczywistym, pozwoli na automatyczne dostosowywanie parametrów stymulacji, co podnosi efektywność całego procesu. W przyszłości planowane jest wdrożenie algorytmów sztucznej inteligencji, które będą analizować przebieg terapii, dostosowując ją dynamicznie do zmieniających się potrzeb zwierzęcia.

Konstrukcja opaski, w tym precyzyjne rozmieszczenie elektrod na punktach motorycznych nerwów, zapewni maksymalną efektywność zabiegów elektrostymulacyjnych. Opaska zostanie wyposażona w dedykowane otwory na

elektrody, ułatwiające ich prawidłowe umiejscowienie, co szczególnie ważne jest w domowych warunkach.

Innowacyjność projektu opiera się na integracji zaawansowanych technologii, takich jak skanowanie 3D, które umożliwia indywidualne dopasowanie opaski do ciała zwierzęcia, a także na zapewnieniu zdalnej analizy i monitorowania procesu rehabilitacji. Dzięki tym rozwiązaniom projekt oferuje kompleksowe i nowoczesne podejście do rehabilitacji zwierząt, zwiększając jednocześnie komfort i efektywność terapii.

**Autorzy:** mgr inż. Paulina Bałuszyńska, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: paulina.baluszyńska@urk.edu.pl.  
dr inż. Marcin Tomasiak, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatykacji, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: marcin.tomasik@urk.edu.pl.

#### LITERATURA

- [1] Alon G., Alln J., Inbar G.: Optimization of pulse duration and pulse charge during transcutaneous electrical nerve stimulation. *The Australian Journal of Physiotherapy*, 29(6), 195-201, 1983.
- [2] Alon G., et. al.: (1985). Comparison of the effects of electrical stimulation and exercise on the abdominal musculature. *Physical Therapy*, 65(5), pp. 683, 1985.
- [3] Martins, A., et. al. (2021). Nervous system modulation through electrical stimulation in companion animals.
- [4] Bellemare, F., Woods, J.J., Johansson, R., Bigland-Ritchie, B. (1983). Motor unit discharge rates in maximal voluntary contractions of 3 human muscles. *Journal of Neurophysiology*, 50(6), 1380-1392.
- [5] Currier, D.P., Mann, R. (1983). Muscular strength development by electrical stimulation in healthy individuals. *Physical Therapy*, 63, 915-921.
- [6] Douceta, B.M., Lamb, A., Griffin, L. (2012). Neuromuscular electrical stimulation for skeletal muscle function.
- [7] Gouveia, D., Cardoso, A., Carvalho, C., Rijo, I., Almeida, A., Gamboa, Ó. The Role of Early Rehabilitation and Functional Electrical Stimulation in Rehabilitation for Cats with Partial Traumatic Brachial Plexus Injury: A Pilot Study on Domestic Cats in Portugal.
- [8] Guyton, C., Hall, J.E. (2003). *Medical Physiology*. (ur.) S. Kukulja Taradi, I. Andreis, Medicinska naklada Zagreb.
- [9] Javeed, S., Faraji, A., Dy, C., Ray, W., MacEwan, M. (2021). Application of electrical stimulation for peripheral nerve regeneration: Stimulation parameters and future horizons. *Interdisciplinary Neurosurgery*, 24, 101117.
- [10] Juckett, L., Saffari, T.M., Ormseth, B., Senger, J.-L., Moore, A.M. (2022). The effect of electrical stimulation on nerve regeneration following peripheral nerve injury.
- [11] Korzeniewska E., et. al.: Inteligentne opatrunki medyczne. *Przegląd Elektrotechniczny*. No 1, pp. 288-291, 2024.
- [12] Krawczyk A., Miasowski A.: Modele matematyczne właściwości elektrycznych tkanki biologicznej. *Przegląd elektrotechniczny*. No 11, pp. 321-323, 2002.
- [13] Krawczyk A., et. al. Electrostimulation in medicine – history and contemporary usage. *Przegląd elektrotechniczny*. No 12, pp. 230-233, 2018.
- [14] Levine, D., Millis, D.L., Marcellin-Little, D.J. (2011). The use of electrical stimulation in veterinary physiotherapy. *Journal of Veterinary Rehabilitation*.
- [15] Martin, G., Palestini, C., Beauchamp, G., Frank, D. (2007). Puppy behavior at the veterinary clinic: A pilot study.
- [16] Medyczny blog, Umiejscowienie elektrod w elektrostymulacji EMS. Dostępne: <https://medyczny-blog.pl/umiejscowienie-elektrod-w-elektrostymulacji-ems> (odwiedzono 20.05.2024).
- [17] Patrick Reilly, J. Electrical Stimulation and Electropathology.
- [18] <https://global3d.pl/pl/skanery-3d-shining3d/777-skaner-3d-shining3d-einscan-h2>