

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł F I Z Y K I



Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Fizyka Techniczna
w specjalności Materiały i Nanostruktury

Programowo sterowany generator ciśnienia
z silnikiem krokowym średniej mocy

Kacper Ledwośński

Numer albumu: 298179

promotor:
dr inż. Dariusz Tefelski

promotor pomocniczy:
dr inż. Aleksander Rostocki

WARSZAWA 2022

Streszczenie

Tytuł pracy: Programowo sterowany generator ciśnienia z silnikiem krokowym średniej mocy

Streszczenie

Niniejsza praca opisuje działania związane z budową pompy do badań przy wysokim ciśnieniu, a także opisuje wkład prac w budowę nowego kontrolera. Kontroler pozwala na łatwą i bezpieczną pracę przy prowadzonych badaniach z użyciem pompy wysokociśnieniowej. Jest on zamiennikiem starego kontrolera indywidualnie zaprojektowanego do sterowania silnikiem krokowym średniej mocy. Z uwagi na przestarzałe oprogramowanie sterujące, a także brak dokumentacji technicznej sterownika stworzono nowy kontroler, który został oparty o Arduino UNO z własnoręcznie zaprojektowaną nakładką rozszerzającą.

Nakładkę zaprojektowano w programie KiCAD, a wykonanie płytEK drukowanych zlecono firmie JLCPCB na podstawie przesłanych plików Gerber. W gotową płytĘ PCB wlutowano poszczególne elementy elektroniczne zgodnie z zaprojektowanym schematem. Płytkę rozszerzającą została podłączona do Arduino tworząc "kanapkĘ" do której podłączono sterownik silnika krokowego, a także komputer sterujący.

Stworzono wygodny graficzny interfejs użytkownika na komputer sterujący, pozwalający użytkownikowi na wygodne sterowanie parametrami silnika krokowego, który jest integralną częścią pompy wysokociśnieniowej.

Kacper Ledwośiński

słowa kluczowe:

wysokie ciśnienie, arduino, elektronika, silnik krokowy, pompa wysokociśnieniowa

Abstract

Title: Program-controlled pressure generator with step motor of medium power

Abstract

This engineering thesis describes the activities related to the construction of a high-pressure pump, and describes the contribution of the work to the construction of the new pump controller. The controller allows for easy and safe work during work with the use of a high-pressure pump. It is a replacement for an old controller individually designed to control a medium power stepper motor. Due to the outdated control software, as well as the lack of technical documentation of the driver, a new controller was created, which was based on the Arduino UNO with a hand-designed extension board.

The overlay was designed in the KiCAD program, and the production of printed circuit boards in the JLCPCB company based on the sent Gerber files. The individual electronic components were soldered into the finished PCB in accordance with the designed diagram. The expansion board was connected to the Arduino creating a "sandwich" to which the stepper motor driver and the control computer were connected.

A convenient graphical user interface has been created for the control computer, allowing the user to conveniently control the parameters of the stepper motor, which is an integral part of the high-pressure pump.

Kacper Ledwosiński

key words:

high pressure, arduino, electronics, stepper motor, high pressure pump

Oświadczenie o samodzielności wykonania pracy



Politechnika Warszawska

Kacper Ledwosiński

nr indeksu 298179

Fizyka Techniczna

Oświadczenie

Świadomy/-a odpowiedzialności karnej za składanie fałszywych zeznań oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie, pod opieką kierującego pracą dyplomową.

Jednocześnie oświadczam, że:

- niniejsza praca dyplomowa nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- niniejsza praca dyplomowa nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem/-am w sposób niedozwolony,
- niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów lub tytułów zawodowych,
- wszystkie informacje umieszczone w niniejszej pracy, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami,
- znam regulacje prawne Politechniki Warszawskiej w sprawie zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi, prawami własności przemysłowej oraz zasadami komercjalizacji.

Warszawa, dnia (data)

(czytelny podpis dyplomanta)

Oświadczenie o udzieleniu Uczelni licencji do pracy



Politechnika Warszawska

Kacper Ledwosiński

nr indeksu 298179

Fizyka Techniczna

Oświadczenie studenta w przedmiocie udzielenia licencji Politechnice Warszawskiej

Oświadczam, że jako autor / współautor* pracy dyplomowej pt.

*Programowo sterowany generator ciśnienia
z silnikiem krokowym średniej mocy*

udzielam / nie udzielam* Politechnice Warszawskiej nieodpłatnej licencji na niewyłączne, nieograniczone w czasie, umieszczenie pracy dyplomowej w elektronicznych bazach danych oraz udostępnianie pracy dyplomowej w zamkniętym systemie bibliotecznym Politechniki Warszawskiej osobom zainteresowanym. Licencja na udostępnienie pracy dyplomowej nie obejmuje wyrażenia zgody na wykorzystywanie pracy dyplomowej na żadnym innym polu eksploatacji, w szczególności kopiowania pracy dyplomowej w całości lub w części, utrwalania w innej formie czy zwielokrotniania.

Warszawa, dnia (data)

(czytelny podpis dyplomanta)

* - niepotrzebne skreślić

Spis treści

1 Wprowadzenie	13
1.1 Cel pracy	13
1.2 Aparatura pomiarowa	13
1.3 Pompa wysokiego ciśnienia	14
1.4 Silnik krokowy	15
1.4.1 Wprowadzenie fizyczne	15
1.4.2 Przekrój silnika krokowego	16
1.4.3 Silnik krokowy zastosowany w pompie wysokiego ciśnienia	18
1.5 Sterowanie silnikiem krokowym	20
1.5.1 Sterownik	20
1.5.2 Kontroler	20
1.5.3 Oprogramowanie sterujące	21
2 Przegląd technologii	23
2.1 Arduino	23
2.1.1 Arduino UNO	23
2.1.2 Arduino Shield	24
2.1.3 Alternatywa dla Arduino	24
2.2 Separacja galwaniczna	25
2.3 Nowe oprogramowanie sterujące	26
3 Projekt nowego kontrolera	27
3.1 Inżynieria odwrotna	27
3.2 Budowa prototypu	29
3.3 Schemat płytki	29
3.4 Projekt PCB	30
3.5 Złożenie płytki	30

3.6 Dodane funkcjonalności	32
3.6.1 Wyłączniki krańcowe - przełączniki bezpieczeństwa	32
3.6.2 Manualne sterowanie silnikiem	32
3.6.3 Diody statusu pracy	33
4 Oprogramowanie sterujące	35
4.1 API - protokół komunikacji z nowym kontrolerem	35
4.1.1 Komendy operacyjne	35
4.1.2 Wiadomości o statusie	36
4.2 Kod Arduino	36
4.3 Graficzny interfejs użytkownika	36
5 Podsumowanie	37

Wprowadzenie

1.1 Cel pracy

Celem pracy jest zbadanie, zaprojektowanie oraz całkowita wymiana kontrolera pompy wysoko ciśnieniowej. Kontroler ten odpowiedzialny jest za przesyłanie sygnału do sterownika pięciofazowego silnika krokowego średniej mocy. Silnik ten poprzez przekładnię planetarną obraca wał, który napędza śrubę pompy wysokociśnieniowej. Obracająca się śruba przesuwa tłok, który powoduje wzrost ciśnienia cieczy roboczej. Ciecz robocza poprzez kapilarę dociera do mnożnika ciśnienia działającego na zasadzie różnicy powierzchni tłoków. Mnożnik napiera na tłok o mniejszej średnicy, dzięki czemu tworzy większe ciśnienie w badanej próbce w komorze wysokociśnieniowej. Osiągane ciśnienie rzędu 1 GPa pozwala na badanie przemian fazowych cieczy oleistycznych.^[1]

1.2 Aparatura pomiarowa

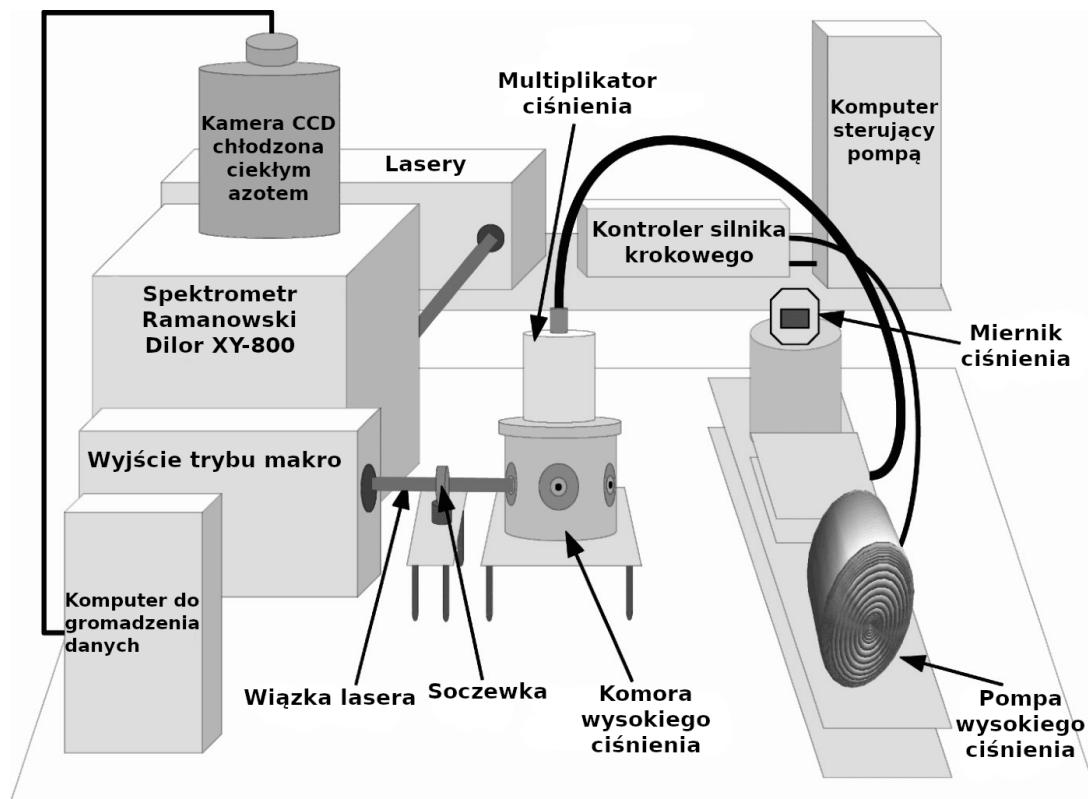
Aparaturą pomiarową nazywamy pełen zestaw komponentów potrzebnych do wykonywania badań pod wysokim ciśnieniem. Składa się z części doświadczalnej, zawierającej urządzenia inicjujące (pobudzające badaną próbkę) jak i zestaw czujników i układów akwizycji danych, które gromadzą interesujące dane pomiarowe oraz z systemu tworzenia wysokiego ciśnienia w badanej próbce.

Silnik krokowy obracając się przesuwa tłok, wpychając ciecz hydrauliczną do przewodu ciśnieniowego (kapilary) podłączonego do mnożnika. Do pracy silnika krokowego średniej mocy konieczny jest sterownik, który przełącza napięcia (około 130 V) na poszczególnych jego cewkach (wykorzystywany silnik jest 5-cio fazowy). Do sterownika przekazywane są sygnały sterujące z kontrolera, oddzielnego w celach bezpieczeństwa za pomocą optoizolatora. Do kontrolera podłączana jest nadzorcza jednostka sterująca - komputer PC.

Rysunek 1.1 przedstawia wysokociśnieniowe stanowisko pomiarowe dostosowane do badania przemian fazowych cieczy oleistycznych z wykorzystaniem metody spektroskopii Ramanowskiej. Szczegóły eksperymentu jak i wyniki przedstawiono w pracy [2]. W komorze wysokiego

ciśnienia umieszcza się badaną próbkę. Dzięki szafirowym okienkom w komorze możemy badać próbki za pomocą laserów. Szafir nie blokuje promieni UV (ultrafioletowych) co pozwala na badanie w szerokim zakresie spektralnym, a także wykazuje dużą odporność na panujące ciśnienie w komorze.

Aparatura jest stosowana w wielu badaniach. Dzięki niej powstało wiele artykułów naukowych związanych badaniami pod wysokim ciśnieniem. Wiele z nich ukazało się w czasopiśmie High Pressure Research. [1] [2] [3] [4] [5] [6]



Rysunek 1.1: Schemat aparatury pomiarowej użytej w eksperymencie badającym trójoleinian pod wpływem wysokiego ciśnienia. Źródło: [2] (Spolszczenie własne)

1.3 Pompa wysokiego ciśnienia

Pompa wysokiego ciśnienia wykonana przez pracowników Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, służy do precyzyjnej i stabilnej zmiany ciśnienia w komorze badawczej. Możemy za jej pomocą ustalać tempo w jakim ciśnienie ma się zmieniać oraz precyzyjnie ustawiać ciśnienie.

Pompa wykonana jest z dawnej ręcznej pompy śrubowej. Silnik kręcząc śrubą przesuwa tłok, który wytwarza ciśnienie w zbiorniku z płynem hydraulicznym. Płyn zmierza do multiplikatora ciśnienia, który zwiększa ciśnienie o określoną wielkość.

Rysunek techniczny ręcznej pompy znajduje się w Załączniku 1.

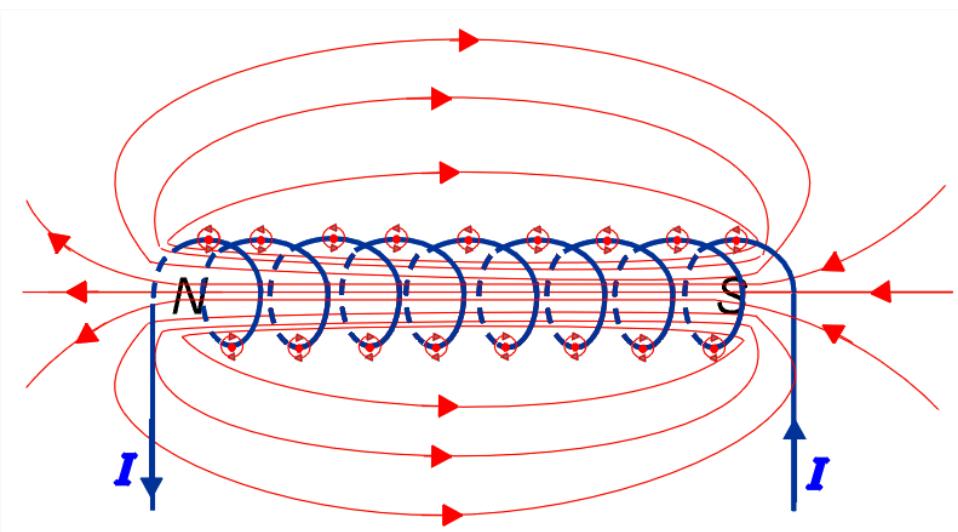
1.4 Silnik krokowy

Znajomość budowy silnika krokowego jest podstawą do zrozumienia, jak osiągają one zadowalające parametry takie jak: prędkość, moment siły czy krok. Znajomość charakterystyki pracy silnika krokowego jest niezwykle ważna w przypadku zastosowania go do układów wysokiego ciśnienia. Niewystarczający moment siły spowoduje zatrzymanie się pompy w pewnym momencie z uwagi na brak odpowiedniego momentu do pchnięcia tłoka głębiej. Zbyt duży krok spowoduje duże przeskoki ciśnienia co przełoży się na brak możliwości ustawienia zadanego ciśnienia.

1.4.1 Wprowadzenie fizyczne

Solenoid (cewka)

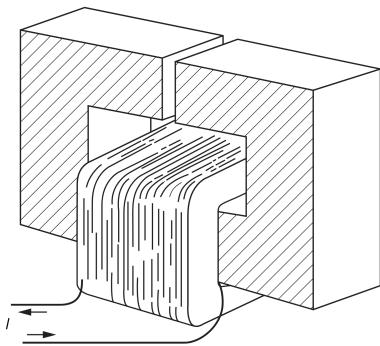
Solenoid to przewód zwinięty na kształt spirali, wytwarzający pole magnetyczne za pomocą przepływającego przez niego prądu. Jest on podstawowym elementem budowy elektromagnesu.



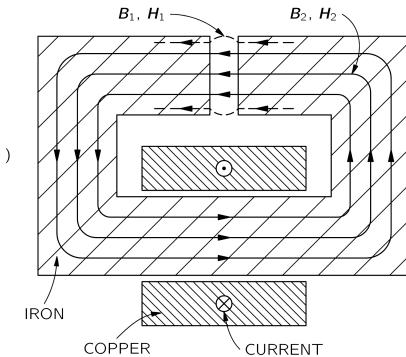
Rysunek 1.2: Pole magnetyczne solenoidu z prądem. Strzałkami wzdłuż solenoidu zaznaczono pole magnetyczne. Źródło: [7]

Elektromagnes

Wektor pola magnetycznego wytworzonygo, wzrasta kiedy owiniemy zwoje solenoidu wokół ferromagnetyka. Jeśli układ taki zasilimy odpowiednio dużym prądem stałym to możemy go nazwać elektromagnesem. Podczasłączenia przepływu prądu przez cewkę, wytworzone pole magnetyczne ma dwa bieguny, północny oraz południowy. Zmiana kierunku przepływu prądu powoduje zamianę tych biegunów miejscami. Wektor pola magnetycznego związany jest z ilością zwojów, natężeniem prądu płynącego przez przewód oraz przenikalnością magnetyczną materiału który jest rdzeniem elektromagnesu.



(a) Elektromagnes w kształcie litery C. Źródło: [8]



(b) Przekrój elektromagnesu. Źródło: [8]

Rysunek 1.3: Elektromagnes. Źródło: [8]

Wartość wektora pola magnetycznego można więc zapisać wzorem:

$$B = \frac{NI}{\left(\frac{L_{rdzenia}}{\mu} + \frac{L_{przerwy}}{\mu_0} \right)} \quad (1.1)$$

gdzie:

N – ilość zwojów cewki,

I – natężenie prądu płynącego przez cewkę,

$L_{rdzenia}$ – długość ścieżki pola magnetycznego w rdzeniu (ksztalt C),

$L_{przerwy}$ – długość ścieżki pola magnetycznego w powietrzu, a więc szerokość przerwy,

μ – przenikalność magnetyczna rdzenia,

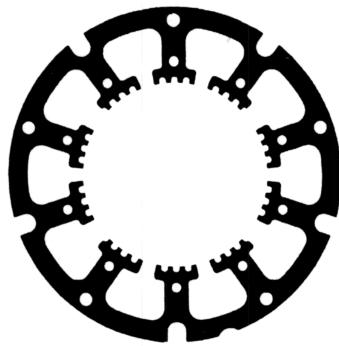
μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni (w zaokrągleniu powietrza, przerwy).

1.4.2 Przekrój silnika krokowego

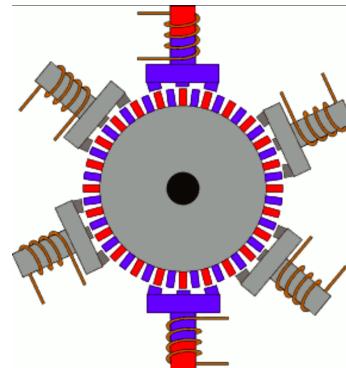
Pole magnetyczne wytworzone przez elektromagnes, możemy wykorzystać do poruszania magnesu. Zmieniając przepływ prądu elektrycznego przez cewkę, można zmienić, który z biegunów magnesu ma zostać przyciągnięty siłą magnetyczną, a co za tym idzie drugi biegum magnesu zostanie odepchnięty. Montując kilka elektromagnesów oraz ustalając schemat ich pracy, można utworzyć prosty silnik krokowy, jak na Rysunku 1.4b.

Sekwencja włączania i wyłączania odpowiednich elektromagnesów, dzieli się na fazy. Na Rysunku 1.5 przedstawiono schematycznie proces jaki zachodzi między kolejnymi fazami silnika.

Schemat z Rysunku 1.5 nie uwydajnia rzeczywistej budowy silnika krokowego, która została pokazana na Rysunku 1.4a oraz 1.4b. Na Rysunku 1.4b można zauważyc dwa podstawowe komponenty budowy silnika krokowego: rotor (inaczej wirnik) oraz stojan (inaczej stator).



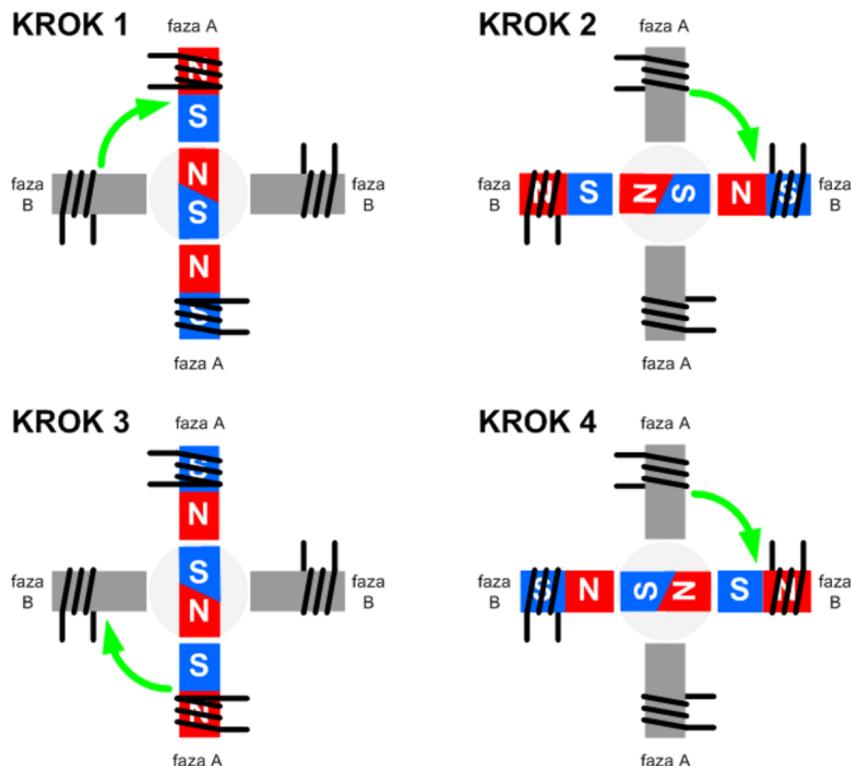
(a) Stator pięciofazowego silnika krokowego użytyego w pompie wysokiego ciśnienia. Źródło: Dokumentacja silnika krokowego



(b) Schematyczny przekrój trzyfazowego silnika krokowego. Źródło: www.silnik-elektryczny.com.pl

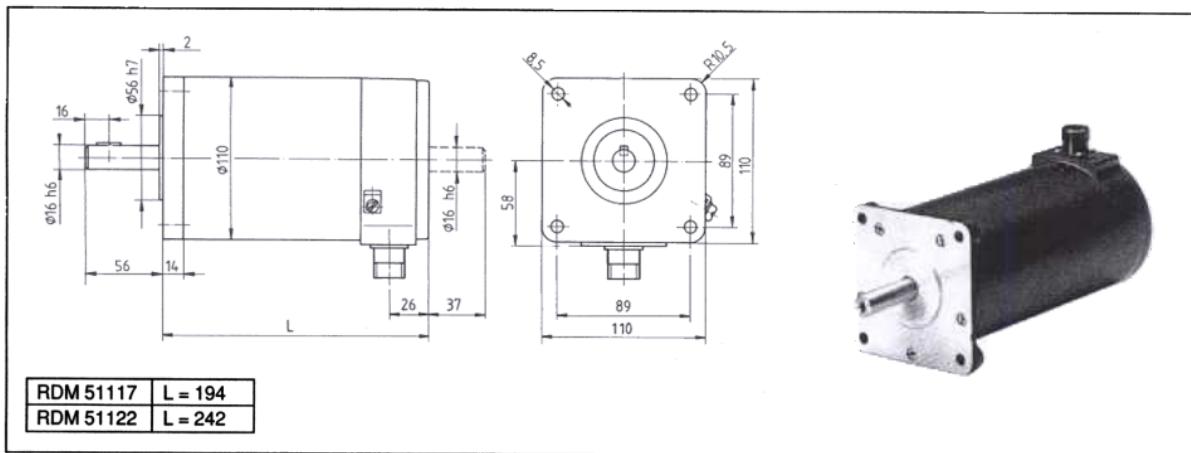
Rysunek 1.4: Przekroje rzeczywistych silników krokowych

Rotor posiada wiele magnesów ustawionych na przemian biegunami, są to prostokąty odchodzące od rotora na Rysunku 1.4b. Elektromagnesy na statorze oddziałują z nimi wprawiając rotor w ruch.



Rysunek 1.5: Schemat działania dwufazowego silnika krokowego. Źródło: www.tme.eu

1.4.3 Silnik krokowy zastosowany w pompie wysokiego ciśnienia



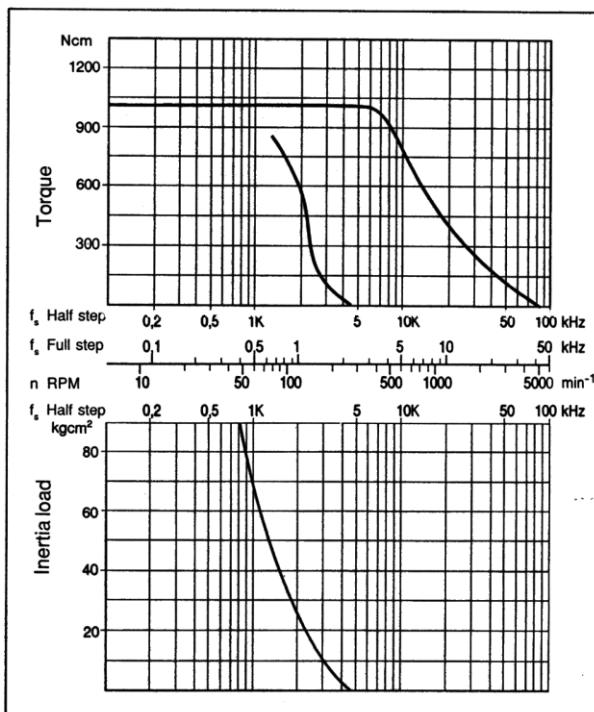
Rysunek 1.6: Rysunek techniczny budowy silnika. Oznaczenie użytego silnika to RM 51122. Źródło:
Dokumentacja ze strony www.euautomation.com

Zastosowany w pompie wysokiego ciśnienia silnik krokowy, wyprodukowany został przez niemiecką firmę Berger Lahr. Była to mała firma założona w 1941 roku. Została przejęta przez Schneider Electric w 2000 roku. Silnik ten jest specyficzny przez swoją charakterystykę pracy. Posiada on bowiem pięć faz pracy. Jest to rzadko spotykane rozwiązanie stosowane głównie w silnikach o większej mocy.

		Devices with Power Drive .			
Stepping Motor		D225 U = 35 V $I_{max} = 1 A$	D450 U = 35 V $I_{max} = 2.8 A$	D550 U = 70 V $I_{max} = 2.8 A$	D650 U = 130 V $I_{max} = 5 A$
Size 60	VRDM 564 LN	△ 1	△ 2	□ 3	
	VRDM 564 LH		○ 4		
	VRDM 566 LN		△ 5	□ 6	
	VRDM 566 LT	△ 7			
	VRDM 566 LH		○ 8		
	VRDM 568 LN		△ 9	□ 10	
	VRDM 568 LH		○ 11		
Size 90	VRDM 597 LN			○ 12	
	VRDM 597 LH			○ 13	
	VRDM 597 LS		○ 14		
	VRDM 5910 LN			○ 15	
	VRDM 5910 LH		○ 16	□ 17	
	VRDM 5913 LN		△ 18	○ 19	
	VRDM 5913 LT			○ 20	
Size 110	RDM 51117 LT			○ 21	←
	RDM 51122 LT			○ 22	

Rysunek 1.7: Silnik z oznaczeniem RDM 51122 LT, z tabeli można odczytać sterownik z jakim współpracuje (D650) oraz parametry pracy (napięcie i natężenie maksymalne). Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com

Warto zauważyć na górnym wykresie Rysunku 1.8 jest widoczny spadek momentu siły po przekroczeniu 300 obrotów na minutę. Należy więc ograniczyć prędkość silnika, aby zachować jego moment siły.

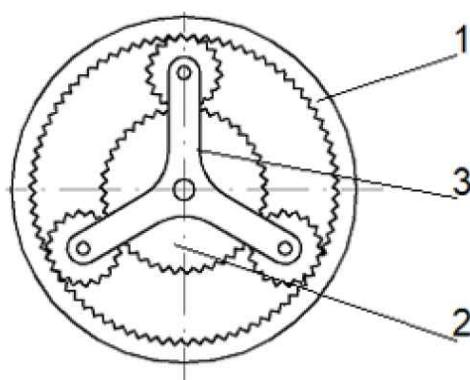


5-Phase Stepping Motor **RDM 51122/50 LT** □ 22
Power drive **D 650**, I_w/U_{ch} 4,0 A / 130 V

Rysunek 1.8: Górnny wykres przedstawia momentu siły silnika w zależności od prędkości obrotu silnika. Z kolei na dolnym wykresie przedstawiono zależności siły bezwładności rotora w zależności od czasu.
 Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com

Odczytanym z tabeli sterownikiem silnika jest sterownik o nazwie D650. Jest to również produkt firmy Bergher Lahr, która jest producentem silnika krokowego.

Zastosowany silnik posiada przekładnię planetarną z przełożeniem 10:1, umożliwia to zwiększenie momentu siły silnika kosztem prędkości. Przekładnie planetarne są jednymi z bardziej popularnych mechanizmów przekładni zębatach.



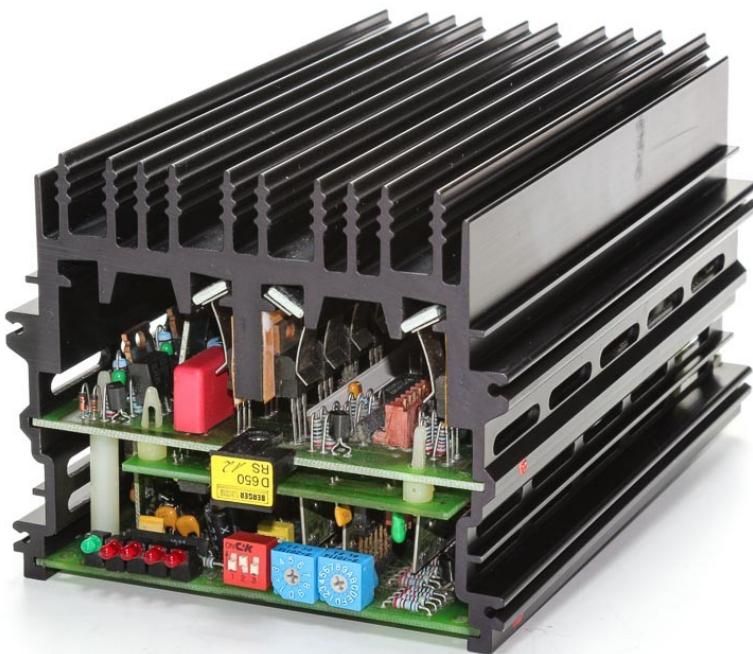
Rysunek 1.9: Schemat przekładni planetarnej. Oznaczenia: 1 - koło zewnętrzne, 2 - koło wewnętrzne, 3 - jarzmo z satelitami. Źródło: www.ebmia.pl

1.5 Sterowanie silnikiem krokowym

Silnik krokowy sterowany jest przy pomocy sterownika dostarczonego przez producenta. Ten zaś odbiera sygnały od kontrolera który łączy się przy pomocy portu RS-232 z komputerem z oprogramowaniem sterującym.

1.5.1 Sterownik

Dostarczony przez producenta sterownik silnika ma za zadanie sterować cewkami silnika krokowego, tak aby ten działał w zadanym sposobie. Sterownik rozdziela napięcia na poszczególne elektromagnesy i odpowiednio je włącza i wyłącza, tak aby działały one sekwencyjnie, fazowo. Sterownik zarządza poszczególnymi fazami silnika krokowego. W tym przypadku pięcioma, które pozwalają na dokładny skok kroku wału silnika.



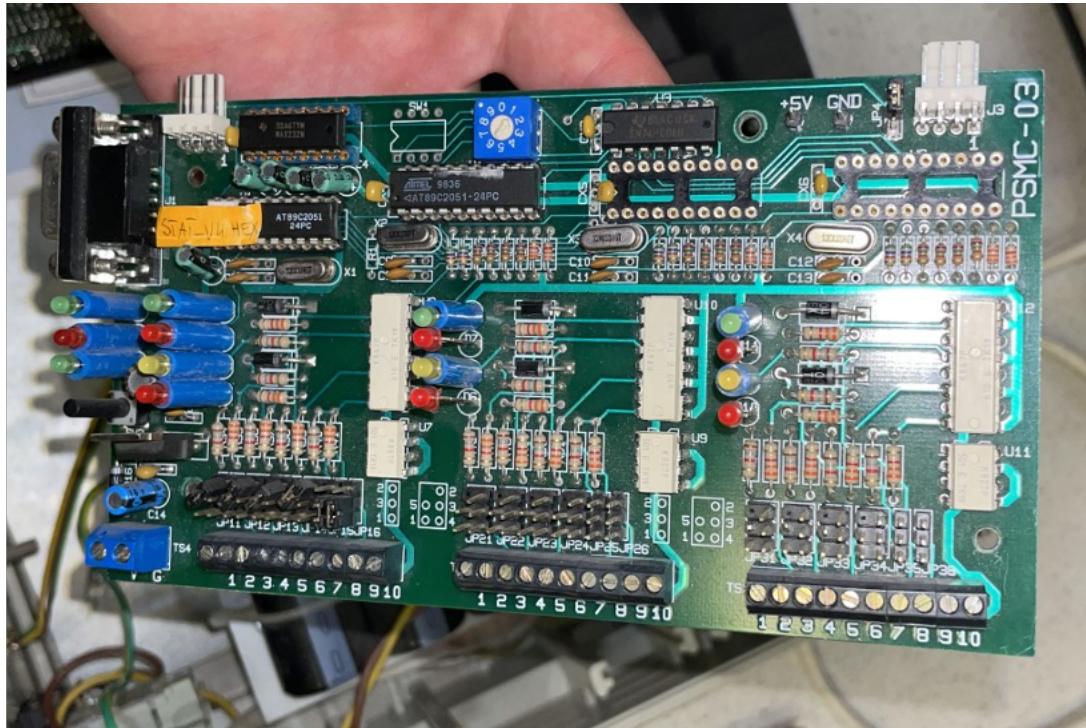
Rysunek 1.10: Sterownik silnika krokowego pięciofazowego - Berger Lahr D650. Źródło: www.compart.company

1.5.2 Kontroler

Kontroler jest łącznikiem między sterownikiem silnika, a komputerem z oprogramowaniem do sterowania. Przez braki w dokumentacji kontrolera nie znamy konkretnych komend uruchamiających działanie silnika, jednak odbywa się on za pomocą interfejsu RS-232. Własny

protokół pozwoli nam na stworzenie nowej architektury łączności sterownika z komputerem sterującym.

Połączenia ze sterownikiem odbywają się przez złącza ARC na krańcu płytki, opisane od 1 do 10 na Rysunku 1.11. Kontroler ma możliwość konfiguracji układu, aż do trzech silników krokowych jednocześnie, jednak w naszym przypadku był podłączony tylko jeden. Zasilanie kontrolera było oddzielone od zasilania sterownika przy pomocy optoizolatora – transoptora.



Rysunek 1.11: Kontroler sterownika silnika krokowego pięciofazowego. Źródło: Zdjęcie własne

1.5.3 Oprogramowanie sterujące

Oprogramowanie zarządzające pracą kontrolera zostało przygotowane przez nieistniejącą już polską firmę. Nie spełnia obecnych wymogów pracy w nowoczesnych systemach wielozadaniowych. Zamknięty protokół, brak dokumentacji i brak źródeł uniemożliwia rozwój i modyfikację tego oprogramowania. Potwierdza to fakt, iż oprogramowanie nie może być uruchomione na systemie innym niż MS-DOS, który jest systemem archaicznym i nie stosowanym na co dzień w dzisiejszych czasach.

Oprogramowanie było przystosowane do pracy w systemie MS-DOS i napisane najprawdopodobniej w języku Borland Pascal z wykorzystaniem bibliotek BGI do elementów grafiki. Dużym minusem pracy tego oprogramowania był brak multitaskingu, czyli uruchamiania wielu aplikacji w jednym momencie. Z tego powodu trzeba było podłączać kolejny komputer, który monitorował parametry komory wysokiego ciśnienia.

Przegląd technologii

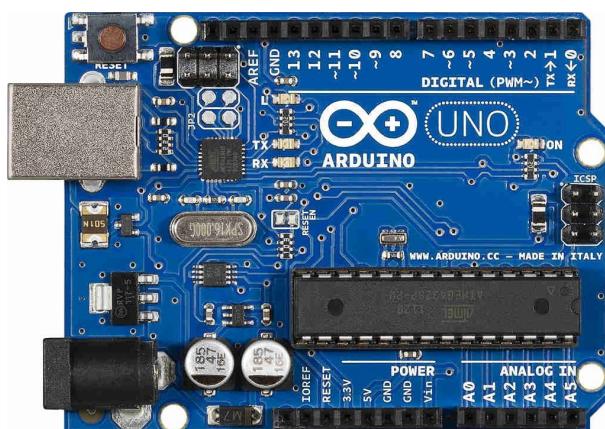
Konsekwencją pozbycia się starego oprogramowania sterującego, niespełniającego postawianych wymogów stało się opracowanie nowego kontrolera, opracowanie wewnętrznego oprogramowania układowego oraz przygotowanie oprogramowania sterującego na platformę PC.

2.1 Arduino

Platforma Arduino została wybrana jako podstawa kontrolera z uwagi na otwarto-źródłowość oraz wygodę stosowania. Jest to platforma Open-Hardware, a więc potrzebna dokumentacja oraz schematy są publicznie dostępne dla każdego. Wybór tej platformy skutkuje niskimi kosztami budowy oraz bardzo dużym wsparciem ze strony społeczności którzy budują z Arduino.

2.1.1 Arduino UNO

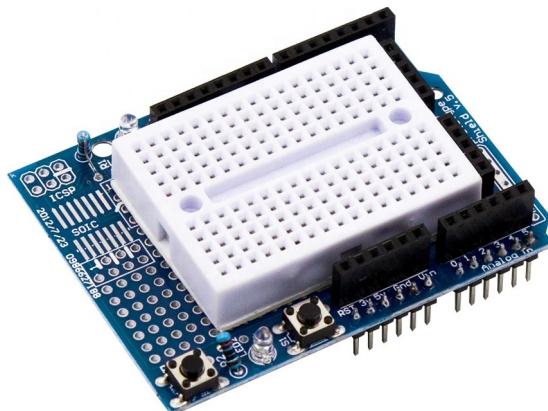
Wybrany układ to popularne Arduino UNO, czyli najbardziej podstawowa wersja z rodziny płyt Arduino. Oparty jest on o mikrokontroler Atmega328P. Szeroka gama pinów I/O oraz wbudowane piny PWM, które w prosty sposób pozwalają generować falę prostokątną, bardzo ułatwiają pracę.



Rysunek 2.1: Arduino UNO. Źródło: www.sunhokey.en.made-in-china.com

2.1.2 Arduino Shield

Prototypownie nowego kontrolera zostało wykonane na Arduino Shield z tak zwanym "breadboard'em", czyli płytą stykową która umożliwiała wygodne budowanie układów bezpośrednio na Arduino. Dzięki takiemu rozwiązaniu, można bez większych problemów wymieniać poszczególne komponenty nowego układu. Dzięki prototypowaniu upewniamy się, że układ spełnia wszystkie kryteria zadanej specyfikacji pracy, a także pozwala na stworzenie schematu, który później zostanie przeniesiony na płytę PCB.

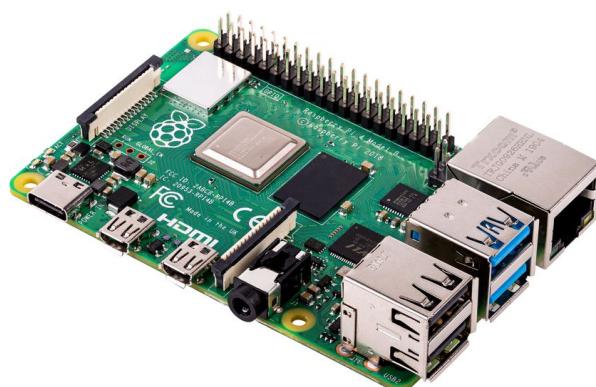


Rysunek 2.2: Arduino Shield. Źródło: www.microless.com

Arduino Shield nakłada się od góry na Arduino tworząc tak zwaną "kanapkę". Dzięki złączom goldpin połączenie jest solidne, a Arduino dostaje wygodnego rozszerzenia możliwości pracy.

2.1.3 Alternatywa dla Arduino

Alternatywną platformą, która spełniać będzie wymagania projektowe może być Raspberry Pi. Jest to zupełnie inna półka jeśli chodzi o możliwości obliczeniowe, ponieważ jest ona oparta o mikroprocesor, a nie jak w Arduino o mikrokontroler. Dużą zaletą użycia Raspberry Pi, byłby brak potrzeby użycia komputera sterującego. Platforma służyła by jako komputer sterujący oraz kontroler w jednym dzięki wbudowanym pinom GPIO.



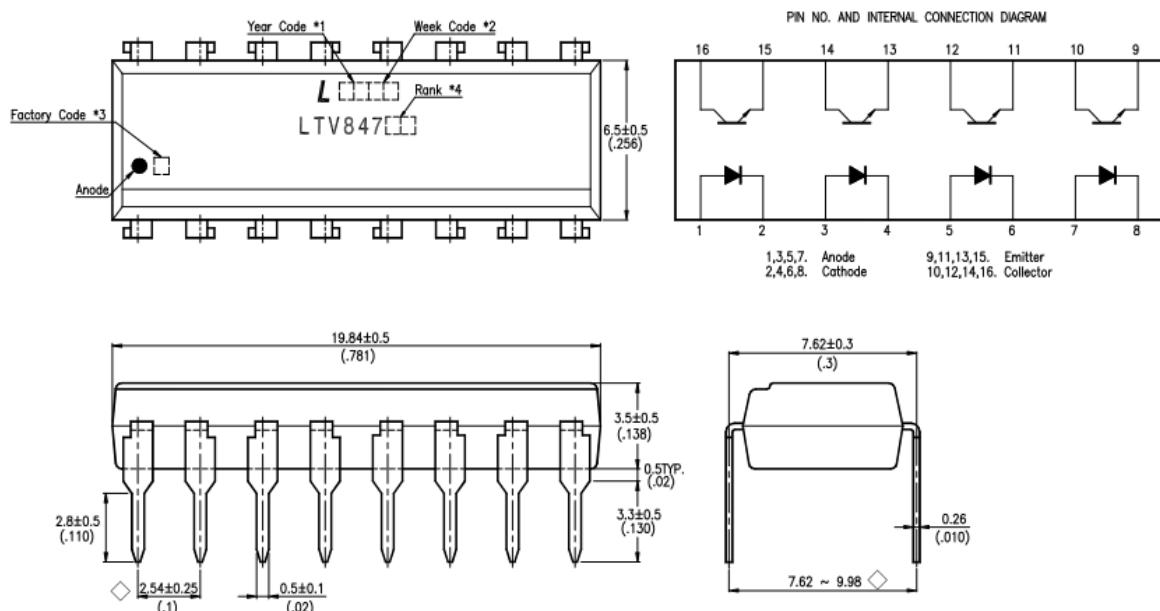
Rysunek 2.3: Minikomputer Raspberry Pi 4.

Do dalszej pracy wybrano jednak Arduino ze względu na przewidywaną integrację systemu sterowania silnikiem pompy wysokiego ciśnienia z systemem akwizycji danych. W takim przypadku zaletą jest rezygnacja z dedykowanego komputera sterującego pompą wysokiego ciśnienia i oparcie się na prostym protokole kontroli pracy pompy opartym o transmisję poprzez wirtualny port szeregowy udostępniony przez interfejs USB.

2.2 Separacja galwaniczna

Napięcie pod, którym działa Arduino (5V) jest dużo niższe od sterownika, którym płytka będzie sterowała (24V). Różnice takie nie pozwalają na bezpieczną pracę bez wprowadzenia odpowiednich zabezpieczeń. Zdecydowano się na użycie **separacji galwanicznej**, a dokładniej optoizolatora w postaci transoptora, który również został użyty w starej wersji kontrolera (1.5.2).

LTV-847 :



Rysunek 2.4: Rysunek techniczny oraz schemat użytego transoptora. Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com

Działa on dzięki zastosowaniu sprzężenia optycznego między fotoemiterem, a fotodetektorem. Umożliwione jest to przy pomocy światłowodu wykonanego z tworzywa lub szkła. Odpowiednio dobrane napięcie zapala diodę z jednej strony, której światło pada na fototranzystor, ten zwiera połączenie pozwalając na przepływ prądu z drugiej strony transoptora. Użyty transoptor posiada, aż 4 takie połączenia, często nazywanymi bramkami. Dwie bramki zostały użyte do wysyłania sygnałów z kontrolera do sterownika, zaś pozostałe dwie pozwalają na odbieranie sygnałów związanych z wyłącznikami krańcowymi, zapobiegającymi uszkodzeniu pompy wysokiego ciśnienia.

(Ta = 25°C)

PARAMETER		SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	CONDITIONS
INPUT	Forward Voltage	V _F	—	1.2	1.4	V	I _F =20mA
	Reverse Current	I _R	—	—	10	μA	V _R =4V
	Terminal Capacitance	C _t	—	30	250	pF	V=0, f=1KHz
OUTPUT	Collector Dark Current	I _{CEO}	—	—	100	nA	V _{CE} =20V, I _F =0
	Collector-Emitter Breakdown Voltage	BV _{CEO}	35	—	—	V	I _c =0.1mA I _F =0
	Emitter-Collector Breakdown Voltage	BV _{ECO}	6	—	—	V	I _E =10μA I _F =0
TRANSFER CHARACTERISTICS	Collector Current	I _c	2.5	—	30	mA	I _F =5mA V _{CE} =5V
	*1 Current Transfer Ratio ◇	CTR	50	—	600	%	
	Collector-Emitter Saturation Voltage	V _{CE(sat)}	—	0.1	0.2	V	I _F =20mA I _c =1mA
	Isolation Resistance	R _{iso}	5×10 ¹⁰	1×10 ¹¹	—	Ω	DC500V 40 ~ 60% R.H.
	Floating Capacitance	C _f	—	0.6	1	pF	V=0, f=1MHz
	Cut-Off Frequency	f _c	—	80	—	kHz	V _{CE} =5V, I _c =2mA R _L =100Ω, -3dB
	Response Time (Rise)	t _r	—	4	18	μs	V _{CE} =2V, I _c =2mA R _L =100Ω
	Response Time (Fall)	t _f	—	3	18	μs	

Rysunek 2.5: Tabela parametrów charakterystycznych pracy transoptora. Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com

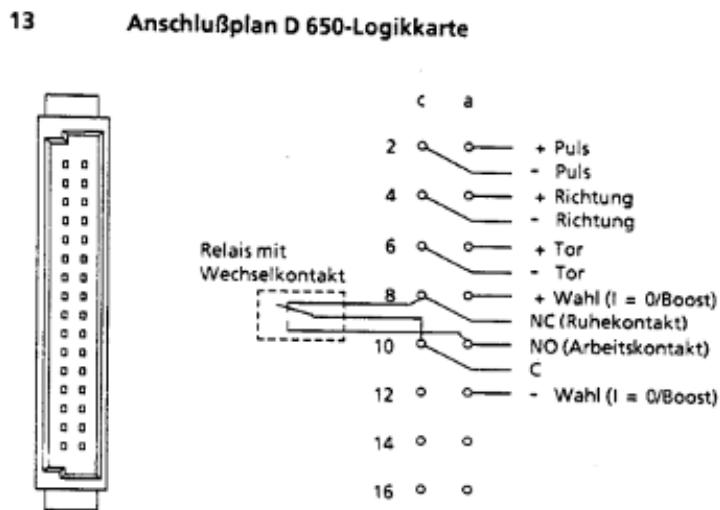
2.3 Nowe oprogramowanie sterujące

Nowe oprogramowanie sterujące zostało stworzone, aby mogło służyć przez wiele lat oraz na różnych systemach operacyjnych. Dzięki dostępowi do kodu źródłowego oprogramowania, ewentualne poprawki czy dodatkowe funkcje, mogą zostać dodane w późniejszym czasie.

Projekt nowego kontrolera

3.1 Inżynieria odwrotna

Główym problemem przy projektowaniu kontrolera, był brak dostępnej dokumentacji. W celu poznania parametrów kontroli pracy sterownika silnika posłużono się tzw. Inżynierią odwrotną. Jest to proces badania w tym przypadku kontrolera, aby sprawdzić, w jaki sposób działa. Proces taki stosuje się, aby zdobyć ważne informacje niedostępne "od ręki".

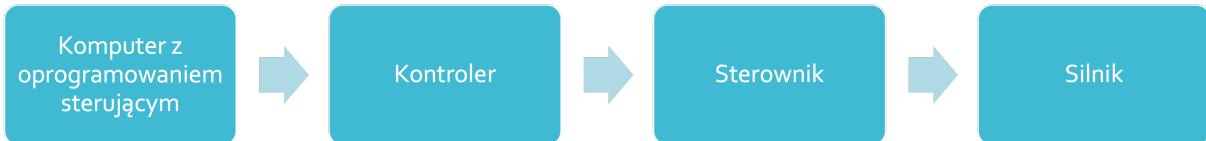


Rysunek 3.1: Złącze sterownika, które odbiera sygnały od kontrolera. Widoczne podłączenia sygnałów: "PULS" - linia prędkości oraz "RICHTUNG" - linia kierunku obrotu wirnika. Kolejne linie "Tor" czy "Wahl" nie były podłączone do oryginalnego sterownika, dlatego też zostały pominięte. Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com

Dzięki zastosowaniu procesu inżynierii odwrotnej, odczytaliśmy sygnały przesyłane od kontrolera w stronę sterownika. Pozwoliło to na budowę prostej dokumentacji łączności kontrolera ze sterownikiem i wdrożenie jej do nowo budowanego kontrolera.

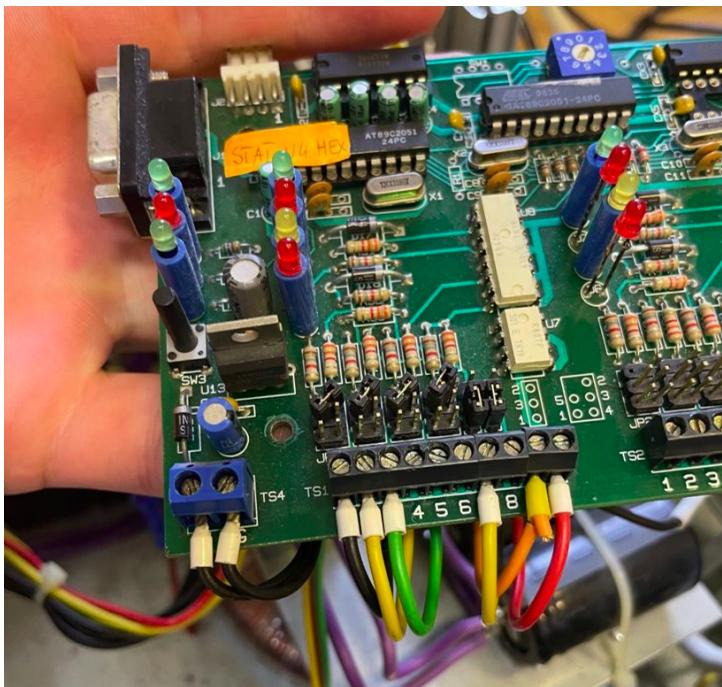
Proces rozpoczęto od wysłania sygnałów ze starego oprogramowania do kontrolera. Kontroler odbiera informacje, przetwarza je i generuje odpowiednie sygnały na liniach połączonych ze sterownikiem. Dwie główne linie to: prędkość, opisana w dokumentacji sterownika jako PULS oraz linia kierunku obrotu opisana jako Richtung. Sygnał prędkości jest sygnałem prostokątnym sterowanym częstotliwością, oznacza to że fala o wyższej częstotliwości

odpowiada szybszemu obrotowi silnika krokkowego, więc szybszą zmianę faz w silniku. Sygnał kierunku obrotu jest sygnałem stałym, jest wysoki dla obrotu zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara, niski zaś jeśli chcemy aby silnik kręcił się przeciwnie do wskazówek zegara.



Rysunek 3.2: Schemat pracy infrastruktury silnika pompy wysoko ciśnieniowej.

Z pomocą oscyloskopu zbadano linie sygnału prędkości. Pomiar ujawnił, iż sygnał jest sygnałem prostokątnym, a jego okres fali zależy od nastawionej prędkości na oprogramowaniu.

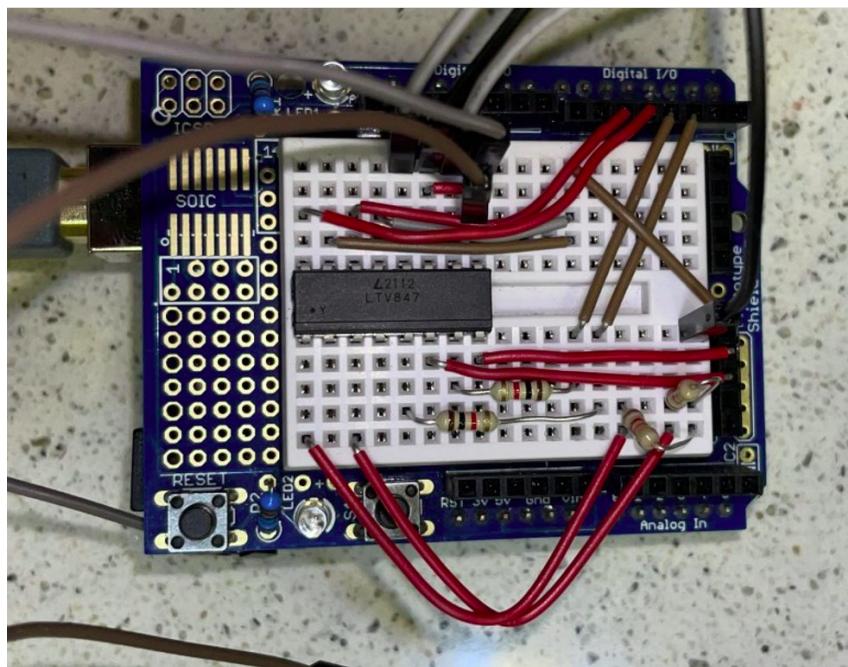


Rysunek 3.3: Na załączonym zdjęciu widać przewody które przekazują sygnały do sterownika silnika. Czarny i czerwony przewód to przewody zasilające 24V, żółty to przewód przekazujący sygnał prędkości, zielony to przewód przekazujący sygnał kierunku obrotu. Kolejny żółty przewód podłączony do portu siódmego to przewód do przełączników bezpieczeństwa. Wysyła on sygnał do kontrolera kiedy tłok przesunięty jest do maksymalnej pozycji. Kiedy sygnał ten jest aktywowany kontroler zatrzymuje pracę silnika. Pozwala to na uniknięcie uszkodzenia mechanizmu pompy.

Kolejnym krokiem działania systemu jest odebranie sygnałów przez sterownik wysyłanych za pomocą kontrolera i przetworzenie ich na sekwencje faz włączanych w silniku krokkowym. Dostosowuje on pracę silnika krokkowego pod względem zadanej prędkości oraz kierunku obrotu wirnika. W końcowej fazie otrzymujemy zadane przez nas parametry obrotu silnika krokkowego.

3.2 Budowa prototypu

Po przeanalizowaniu schematu działania kontrolera, zbudowano pierwszy prototyp na bazie Arduino Shield. Prototyp pozwalał na uruchamianie i zatrzymywanie silnika z ustaloną na stałe prędkością w określonym przedziale czasowym.



Rysunek 3.4: Zbudowany prototyp zgodnie z zaprojektowanym schematem.

Kolejne prototypy rozszerzały funkcjonalności kontrolera. Dodano komunikację przez port szeregowy, która pozwoliła na kontrolowanie prędkością obrotu silnika oraz zatrzymanie go w określonym przez nas momencie.

3.3 Schemat płytki

Schemat został załączony do pracy jako Załącznik 2.

Schemat elektroniczny jest jednym z najważniejszych procesów przy projektowaniu własnej płytka PCB. Tworzy on odpowiednie połączenia między komponentami elektronicznymi. Pierwsze schematy zostały stworzone przed budową prototypu, kolejne iteracje schematów udoskonalały działanie płytka o kolejne funkcjonalności. Schemat został projektowany na oprogramowaniu KiCad.

Na schemacie zauważać można odpowiednio dobrane rezystory oznaczone jako R (od R1 do R12). Złącza ARC które posłużyły do podłączenia kontrolera do sterownika, a także zewnętrznego sterowania, zostały opisane na schemacie jako J (od J1 do J8). J1 i J2 podłączają zasilanie oraz linie sygnałowe do sterownika, J3 łączy Arduino z wyłącznikami krańcowymi, pozostałe pozwalają podłączyć między innymi przyciski do sterowania manualnego oraz diody sygnalizujące pracę kontrolera.

3.4 Projekt PCB

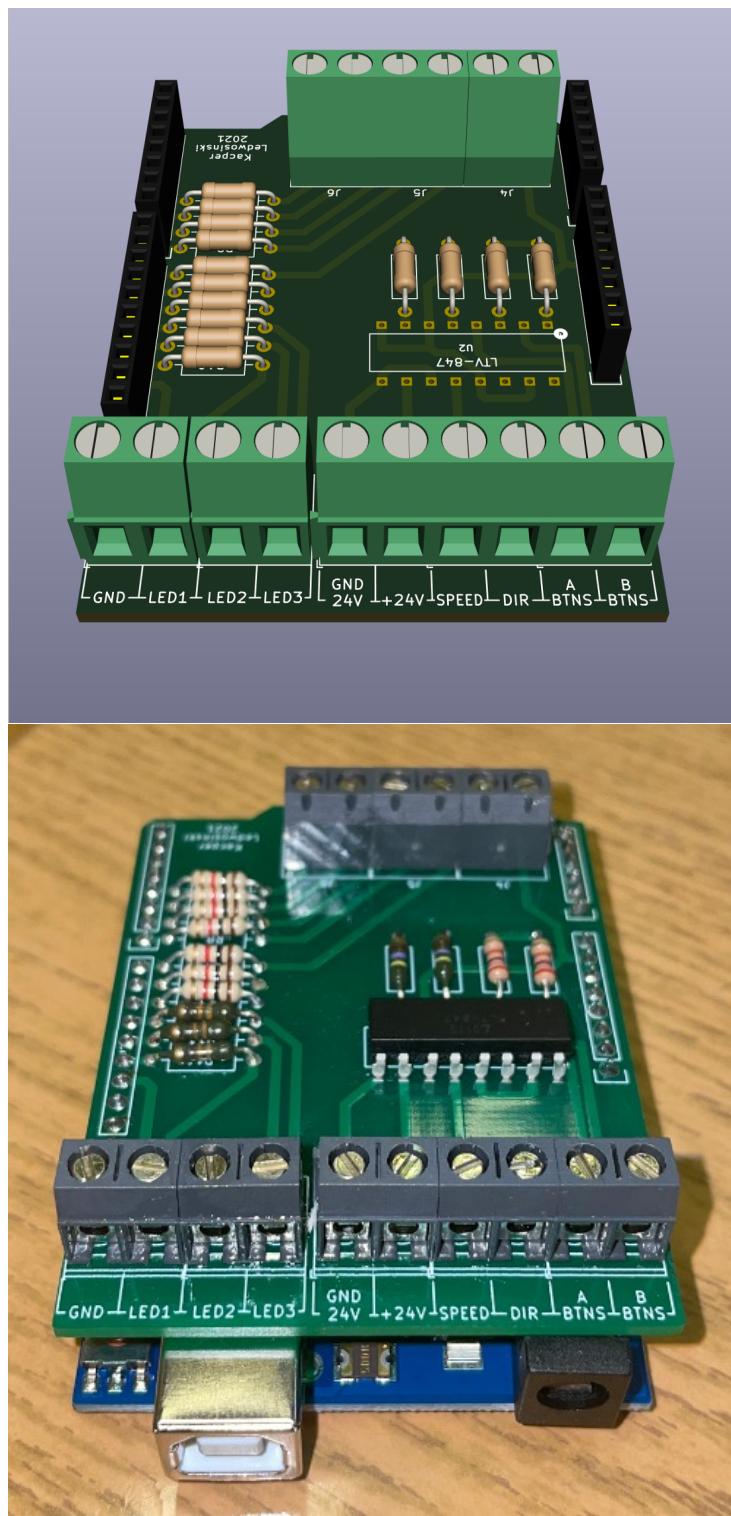
Projekt ścieżek PCB, to proces który pozwala dowolnie układać ścieżki na płytce. Linie muszą zostać starannie zaprojektowane tak, aby nie powstały żadne niepożądane połączenia. Warto też mieć na uwadze dwie różne architektury pod względem napięcia 5V oraz 24V. Zachowanie bezpiecznych odległości między ścieżkami oraz odpowiednia szerokość ścieżek pozwala na efektywną pracę kontrolera. Po ułożeniu komponentów na schemacie i sprawdzeniu wszystkich ścieżek, wysyłamy projekt Gerber do producenta, w tym przypadku była to firma JLCPCB, która wyprodukowała płytki. Sama produkcja płytki trwa ok. 2 dni jednak dostawa z dalekiego wschodu do Europy zajmuje ok. miesiąc, dlatego trzeba dopilnować aby płytka była zaprojektowana bezbłędnie.



Rysunek 3.5: Płytki PCB bez przylutowanych komponentów.

3.5 Złożenie płytki

Płytki zostały złożone przez autora w Laboratorium Elektroniki na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej. Odpowiednio dobrane komponenty zostały ułożone na płytce i wlutowane w otwory montażowe na płytce PCB.



Rysunek 3.6: Porównanie modelu 3D płytki PCB ze złożoną i zlutowaną już płytka.

3.6 Dodane funkcjonalności

Nowy kontroler nie tylko zastępuje stary, ale również rozszerza jego funkcjonalności. Mają one ułatwić pracę przy aparaturze badawczej, a także przy pomocy wyłączników krańcowych (przełączników bezpieczeństwa) ograniczyć ilość usterek pompy.

3.6.1 Wyłączniki krańcowe - przełączniki bezpieczeństwa

Krańcówki ograniczają ruch śruby pompy, aby uniknąć uszkodzeń. Śruba wkręcając się dociera do punktu krańcowego wtedy to naciska na krańcówkę powodując zamknięcie obwodu, co skutkuje uruchomieniem procedury zatrzymania silnika.

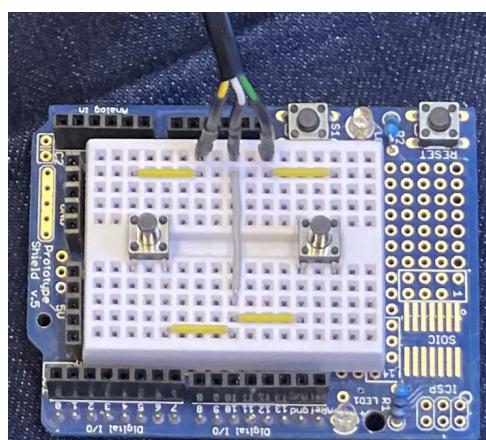


Rysunek 3.7: Przełącznik krańcowy z dźwignią z rolką. Źródło: www.infoelektronika.pl

Zastosowanie krańcówek pozwala na zatrzymanie tłoka przed momentem kiedy stworzy zagrożenie dla układu, na przykład zacznie napierać na ściankę końcową pompy tworząc rozszczelnienie układu.

3.6.2 Manualne sterowanie silnikiem

Kontroler został wyposażony w porty pozwalające podłączyć przyciski do sterowania manualnego. Złącza ARC opisane jako J4, J5 oraz J6 na schemacie w Załączniku 2, zostały zaprojektowane do podłączenia takich przycisków celem stworzenia prostego panelu sterownia manualnego.



Rysunek 3.8: Kontroler manualnego sterowania.

3.6.3 Diody statusu pracy

Złącza ARC opisane jako J7 oraz J8 na schemacie w Załączniku 2, służą do podłączenia diod statusu pracy kontrolera. Oznaczenie LED1 (zielona dioda) opowiada stanowi gotowości kontrolera, LED2 (żółta dioda) odpowiada stanowi pracy silnika, LED3 (czerwona dioda) odpowiada błędowi w wykonywaniu operacji.

Oprogramowanie sterujące

4.1 API - protokół komunikacji z nowym kontrolerem

Nowy kontroler wprowadza nowy protokół, a więc listę komend, które umożliwiają nam sterowanie silnikiem krokowym, a także pozwalają nam odbierać komunikaty związane z pracą silnika. Komunikacja z kontrolerem odbywa się przy pomocy portu szeregowego z odpowiednio skonfigurowanym połączeniem. Komendy opisane w Tabeli 4.2 muszą zostać wysyłane do kontrolera z odpowiednimi parametrami (w skrócie: 115200 baud, konfiguracja 8-N-1), a także muszą zostać wysłane w formacie ASCII:

Prędkość transmisji Bodach (Baud rate)	115200
Bity danych	8
Kontrola parzystości	wyłączona
Bit stopu	1
Znak końca linii komendy	\n

Tabela 4.1: parametry portu szeregowego.

4.1.1 Komendy operacyjne

Zestaw komend przewidzianych w API kontrolera pompy wysokociśnieniowej przedstawiono w Tabeli 4.2.

Komenda	Przykład	Opis
stop	stop	Zatrzymuje silnik pomijając wszystkie wcześniejsze operacje.
dir:[CW/CCW]	dir:CW	Ustawienie kierunku obrotu silnika krokoowego. CW-zgodnie z ruchem wskazówek zegara, CCW-przeciwne do ruchu wskazówek zegara.
speed:[Hz]	speed:1000	Komenda uruchamia silnik z odpowiednio nadaną prędkością. W tym przypadku prędkość powiązana jest z częstotliwością fali na linii prędkości przekazywanej do sterownika.

Tabela 4.2: Tabela komend operacyjnych wysyłanych z komputera sterującego w stronę kontrolera.

4.1.2 Wiadomości o statusie

Kontroler przy odpowiednio skonfigurowanym połączeniu portu szeregowego wysyła wiadomości o statusie pracy. Wysyłane są one jako czysty tekst (plain text), aby można było łatwo skonfigurować proces informacji użytkownika.

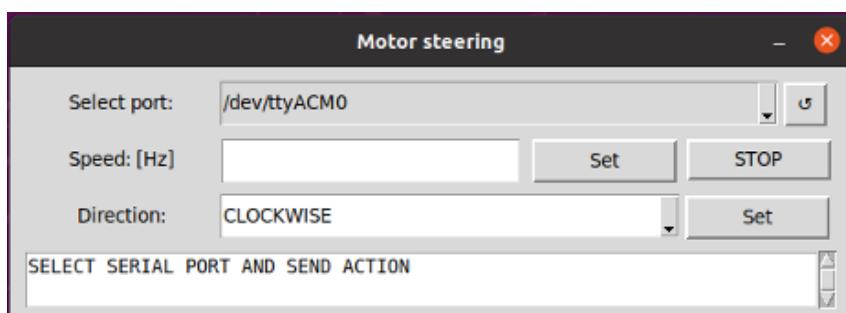
- Przełącznik bezpieczeństwa włączony:
 - przełącznik "A",
 - przełącznik "B",
 - przełącznik manualnego sterowania.
- Komenda "STOP" odebrana. (wiadomość zwrotna potwierdzająca)
- Ustawienie prędkości silnika odebrana. (wiadomość zwrotna potwierdzająca wartość)
- Ustawienie kierunku obrotu silnika odebrana. (wiadomość zwrotna potwierdzająca wartość)

4.2 Kod Arduino

Kod kontrolera Arduino został dołączony do pracy jako Załącznik 3. Program pracuje w klasycznym dla Arduino schemacie. Dwie funkcje podstawowe "void setup()" oraz "void loop()". Pierwsza ustawia odpowiednie porty IO kontrolera zgodnie z konfiguracją oraz podłącza komunikację szeregową. Druga zaś jest pętlą główną programu. Funkcja ta wykonywana jest periodycznie i za każdym razem sprawdzane są parametry pracy. Jeśli któryś z nich zostaje spełniony wykonywane są funkcje pomocnicze takie jak "void set_motor_speed(int speed)" lub "void stop_motor()".

4.3 Graficzny interfejs użytkownika

Interfejs użytkownika został zaprojektowany tak aby ułatwić użytkownikowi szybkie i łatwe kontrolowanie silnikiem krokowym. Użytkownik wybiera odpowiedni wirtualny port szeregowy łączy się z nim i wysyła komunikaty do kontrolera z zadaną prędkością oraz kierunkiem obrotu. Dostępny jest także przycisk STOP który umożliwia zatrzymanie silnika w dowolnym momencie. Interfejs został zaprogramowany przy pomocy języka Python wraz z biblioteką Tk.



Rysunek 4.1: Graficzny interfejs użytkownika.

Podsumowanie

Nowy kontroler został przetestowany w celu uniknięcia błędów konstrukcyjnych, a także oprogramowania. Oprogramowanie zostało załączone (Załącznik 3.) do pracy, a także przekazane do laboratorium w którym pompa będzie pracować. Pozwoli to na rozwijanie oprogramowania sterującego, a także na sprawne naprawianie drobnych usterek, które mogą wynikać podczas pracy urządzenia.

Potencjalnymi ścieżkami rozwoju pracy mogą być kwestie usprawniające graficzny interfejs użytkownika, nastaw pompy miarą ciśnienia lub konstrukcja nowej obudowy mieszczącej wszystkie komponenty potrzebne do sterowania pompą. Kolejne szczeble pracy pozwolą na wygodniejszą i szybszą pracę z pompą wysokiego ciśnienia. Pozwoli to na sprawniejsze prowadzenie badań lub prezentacje wyników w wygodny sposób.

Silnik podłączony do zmodernizowanego sterownika działa prawidłowo. Możliwa jest regulacja częstotliwości jego pracy oraz wybór kierunku pracy (obrót zgodnie z obrotem wskazówek zegara oznacza sprężanie badanej cieczy - wzrost ciśnienia, a obrót przeciwnie do obrotu wskazówek zegara oznacza rozprężanie badanej cieczy - spadek ciśnienia w komorze). Wyłączenie działania silnika następuje po:

- programowym naciśnięciu przycisku stop w oprogramowaniu sterującym,
- po naciśnięciu przycisku bezpieczeństwa na obudowie sterownika,
- po zadziałaniu któregokolwiek z wyłączników krańcowych.

Możliwe jest wycofanie pompy po zadziałaniu wyłącznika krańcowego z wykorzystaniem przycisków sterowania ręcznego z pominięciem monitorowania stanu wyłączników krańcowych.

Bibliografia

- [1] A. Kos, D. Tefelski, R. M. Siegoczyński, R. Rutkowski, W. Ejchart, and R. Wiśniewski, “Changes of liquid structure under pressure in oleic acid,” *High Pressure Research*, vol. 25, no. 1, pp. 51–56, 2005.
- [2] D. B. Tefelski, C. Jastrzębski, M. Wierzbicki, R. M. Siegoczyński, A. J. Rostocki, K. Wieja, and R. Kościeszka, “Raman spectroscopy of triolein under high pressures,” *High Pressure Research*, vol. 30, no. 1, pp. 124–129, 2010.
- [3] R. Kościeszka, D. B. Tefelski, S. Ptasznik, A. J. Rostocki, A. Malanowski, and R. M. Siegoczyński, “A study of the high pressure phase transition of diacylglycerol oil by means of light transmission and scattering,” *High Pressure Research*, vol. 32, no. 2, pp. 323–329, 2012.
- [4] R. M. Siegoczyński, R. Kościeszka, D. B. Tefelski, and A. Kos, “Molecular collapse – modification of the liquid structure induced by pressure in oleic acid,” *High Pressure Research*, vol. 29, no. 1, pp. 61–66, 2009.
- [5] R. M. Siegoczyński, A. Kos, D. B. Tefelski, R. Kościeszka, and W. Ejchart, “Temperature effect upon the pressure-induced phase transformation in oleic acid,” *High Pressure Research*, vol. 27, no. 1, pp. 47–50, 2007.
- [6] R. M. Siegoczyński, “Light scattering studies of oleic acid under high pressure,” *High Pressure Research*, vol. 13, no. 1-3, pp. 89–92, 1994.
- [7] Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej, *E-fizyka, Tom III.* Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [8] R. Feynman, *Lectures on Physics, Vol. 2.* Basic Books, 1963.

Spis rysunków

1.1 Schemat aparatury pomiarowej użytej w eksperymencie badającym trójoleinian pod wpływem wysokiego ciśnienia. Źródło: [2] (Spolszczenie własne)	14
1.2 Pole magnetyczne solenoidu z prądem. Strzałkami wzdłuż solenoidu zaznaczono pole magnetyczne. Źródło: [7]	15
1.3 Elektromagnes. Źródło: [8]	16
1.4 Przekroje rzeczywistych silników krokowych	17
1.5 Schemat działania dwufazowego silnika krokowego. Źródło: www.tme.eu	17
1.6 Rysunek techniczny budowy silnika. Oznaczenie użytego silnika to RM 51122. Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com	18
1.7 Silnik z oznaczeniem RDM 51122 LT, z tabeli można odczytać sterownik z jakim współpracuje (D650) oraz parametry pracy (napięcie i natężenie maksymalne). Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com	18
1.8 Górnny wykres przedstawia momentu siły silnika w zależności od prędkości obrotu silnika. Z kolei na dolnym wykresie przedstawiono zależności siły bezwładności rotora w zależności od czasu. Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com	19
1.9 Schemat przekładni planetarnej. Oznaczenia: 1 - koło zewnętrzne, 2 - koło wewnętrzne, 3 - jarzmo z satelitami. Źródło: www.ebmia.pl	19
1.10 Sterownik silnika krokowego pięciofazowego - Berger Lahr D650. Źródło: www.compart.company	20
1.11 Kontroler sterownika silnika krokowego pięciofazowego. Źródło: Zdjęcie własne .	21
2.1 Arduino UNO. Źródło: www.sunhokey.en.made-in-china.com	23
2.2 Arduino Shield. Źródło: www.microless.com	24
2.3 Minikomputer Raspberry Pi 4.	24
2.4 Rysunek techniczny oraz schemat użytego transoptora. Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com	25
2.5 Tabela parametrów charakterystycznych pracy transoptora. Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com	26

3.1 Złącze sterownika, które odbiera sygnały od kontrolera. Widoczne podłączenia sygnałów: "PULS" - linia prędkości oraz "RICHTUNG" - linia kierunku obrotu wirnika. Kolejne linie "Tor" czy "Wahl" nie były podłączone do oryginalnego sterownika, dlatego też zostały pominięte. Źródło: Dokumentacja ze strony www.euautomation.com	27
3.2 Schemat pracy infrastruktury silnika pompy wysokociśnieniowej.	28
3.3 Na załączonym zdjęciu widać przewody które przekazują sygnały do sterownika silnika. Czarny i czerwony przewód to przewody zasilające 24V, żółty to przewód przekazujący sygnał prędkości, zielony to przewód przekazujący sygnał kierunku obrotu. Kolejny żółty przewód podłączony do portu siódmego to przewód do przełączników bezpieczeństwa. Wysyła on sygnał do kontrolera kiedy tłok przesunięty jest do maksymalnej pozycji. Kiedy sygnał ten jest aktywowany kontroler zatrzymuje pracę silnika. Pozwala to na uniknięcie uszkodzenia mechanizmu pompy.	28
3.4 Zbudowany prototyp zgodnie z zaprojektowanym schematem.	29
3.5 Płytki PCB bez przylutowanych komponentów.	30
3.6 Porównanie modelu 3D płytki PCB ze złożoną i zlutowaną już płytka.	31
3.7 Przełącznik krańcowy z dźwignią z rolką. Źródło: www.infoelektronika.pl	32
3.8 Kontroler manualnego sterowania.	32
4.1 Graficzny interfejs użytkownika.	36

Spis tabel

4.1 parametry portu szeregowego.	35
4.2 Tabela komend operacyjnych wysyłanych z komputera sterującego w stronę kontrolera.	35