



# Elektrotechnologie w projektach studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki

Vol. 7

*redakcja:*

*Paweł A. Mazurek*

M  
O  
N  
O  
G  
R  
A  
F  
I  
E

Elektrotechnologie w projektach studentów  
Wydziału Elektrotechniki i Informatyki  
Vol. 7

# Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
ul. Nadbystrzycka 38A  
20-618 Lublin

Elektrotechnologie w projektach studentów  
Wydziału Elektrotechniki i Informatyki  
Vol. 7

redakcja:  
Paweł A. Mazurek



**Wydawnictwo**  
Politechniki Lubelskiej

**Lublin 2021**

Recenzenci:

dr inż. Artur Boguta

dr inż. Michał Łanczont

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2021

ISBN: 978-83-7947-486-8

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej  
[www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa](http://www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa)  
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin  
tel. (81) 538-46-59

Druk: DjaF – 30-092 Kraków, ul. Kmietowicza 1/1  
[www.djaf.pl](http://www.djaf.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)  
Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

<i>Przedmowa</i>	7
1. <b>Knafel Michał</b> <i>Mikroprocesorowe zarządzanie pracą instalacji typu klimatyzacja i wentylacja</i>	9
2. <b>Pizun Daniel</b> <i>Projekt wirtualnego miernika</i>	19
3. <b>Rudnik Adam</b> <i>Projekt automatycznej regulacji oraz samopoziomowania belki opryskiwacza przy użyciu czujników ultradźwiękowych</i>	27
4. <b>Tor Maciej</b> <i>Wirtualna przetwornica step-up, step-down w środowisku MatLAB</i>	34
5. <b>Strużek Dominik</b> <i>Model sterownika infrastruktury bramy wjazdowej, wykorzystujący platformę Arduino</i>	42
6. <b>Sierpiński Jan</b> <i>Wykorzystanie platformy Arduino do zarządzania instalacją budynkową</i>	54
7. <b>Sawiarski Cezary</b> <i>Analiza czynników wpływających na moc farm fotowoltaicznych</i>	61
8. <b>Pawlikowski Mateusz</b> <i>Przegląd oprogramowania wspomagającego prototypowanie 3D</i>	72
9. <b>Ignaczak Dominik</b> <i>Korekcja sygnału audio w elektroakustyce</i>	79
10. <b>Wereda Piotr, Brzozowiec Patryk</b> <i>Implementacja regulatora PID dla silnika DC z enkoderem z wykorzystaniem mikrokontrolera STM32</i>	93
11. <b>Skiba Anna</b> <i>Projektowanie instalacji elektrycznej w domu jednorodzinnym</i>	110

12.	<b>Siedliski Jakub</b> <i>Układy napędowe w dronach cywilnych</i>	118
13.	<b>Saputa Paweł</b> <i>Projektowanie układów sterowania układami napędowymi</i>	126
14.	<b>Rudawski Maciej</b> <i>Metody odczytu pozycji kątowej wału silnika BLDC w mikroprocesorowych układach sterowania</i>	140
15.	<b>Kowalska Justyna</b> <i>Perspektywy rozwoju prosumenckich instalacji fotowoltaicznych na przykładzie województwa lubelskiego</i>	151
16.	<b>Kopczyński Franciszek</b> <i>Rozwój elektromobilności w kraju i na świecie</i>	162
17.	<b>Gorczyca Olga</b> <i>Wykorzystanie technologii 5G w automatyce przemysłowej</i>	173
18.	<b>Byszuk Paweł, Bednarczyk Bartosz</b> <i>Aplikacje i możliwości instalacji fotowoltaicznych w gospodarstwach domowych i przemyśle</i>	180
19.	<b>Baj Magdalena, Kubiniec Konrad</b> <i>Ekologiczny paradoks, czyli baterie samochodów elektrycznych</i>	195
20.	<b>Wnuk Radosław</b> <i>Projektowanie nowoczesnych rozdzielnic średniego napięcia</i>	207
21.	<b>Wiórko Kornel</b> <i>Wpływ wygrzewania na właściwości elektryczne nanokompozytów <math>(FeCoZr)_x(SiO_2)_{(100-x)}</math> o małej zawartości fazy metalicznej wytworzonych w atmosferze argonu z niską zawartością tlenu</i>	215
22.	<b>Jaśkowski Piotr</b> <i>Wykorzystanie platformy Arduino do zarządzania instalacją budynkową</i>	228

*Szanowni Czytelnicy,*

*Oto przed Wami kolejny, siódmy tom zebranych publikacji, których autorami są studenci studiów magisterskich kierunku Elektrotechnika prowadzonego przez Wydział Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Tym razem są to prace studentów ze studiów stacjonarnych. Zebrane referaty są wynikiem realizowanego modułu „Metodologia badań naukowych”.*

*Zebrane w tym tomie materiały, to ponownie efekt pracy własnej studentów, a działania zachęcające studentów do publikowania są wymiernym elementem ciągłego podnoszenia jakości kształcenia przez Wydział, powiązanego z rynkiem pracy, gospodarką opartą na wiedzy, jak i profilem ogólnoakademickim.*

*Zredagowane w publikacji materiały mają szeroki zakres tematyczny. Znajdziemy tu prace o charakterze teoretycznym, przeglądowym, opracowane zadania projektowe i wyniki badań własnych na autorskich modelach i stanowiskach laboratoryjnych. Różnorodność tematyczna referatów jest dużą zaletą, a jednocześnie jest dowodem na szeroki obszar zastosowań elektrotechniki i elektrotechnologii. W aktualnym tomie zaobserwować można zainteresowanie studentów elektrotechnologiami z zakresu instalacji budynkowych, aplikacji sterowania układami i urządzeniami, aplikacyjności elektroniki.*

*Powstały materiał to efekt wdrażania studentów do świata nauki. Dostarczone przez studentów materiały przechodzą pełny cykl wydawniczy. Studenci przeprowadzają badania i analizy, przygotowują tekst naukowy, który kolejno przechodzi w pierwszej fazie recenzję edycyjną, a następnie merytoryczną. Wiele dostarczonych materiałów nie spełnia wymagań aby zostać opublikowanymi. Zgodnie z akademickimi zasadami i w trosce o jakość do publikacji dopuszczono co trzecią pracę. To również jest doświadczenie dla naszych studentów.*

*Artykuły zawarte w publikacji przeznaczone są dla studentów studiów kierunku Elektrotechnika w Politechnice Lubelskiej. Są wsparciem dla realizowanych modułów Elektrotechnologie, Metodologia badań naukowych oraz proseminariów. Mam jednak nadzieję – wraz z autorami referatów, że zebranych materiałów będą również korzystać inni studenci, pokrewnych kierunków i na różnych stopniach.*

*P. A. Mazurek*





## **MIKROPROCESOROWE ZARZĄDZANIE PRACĄ INSTALACJI TYPU KLIMATYZACJA I WENTYLACJA**

### **WSTĘP**

Rozwój technologii, postępująca automatyzacja zarządzania zużyciem energii i podnoszący się standard nie tylko budynków użyteczności publicznej, zakładów pracy ale też domów mieszkalnych stawiają kolejne wyzwania mające na celu ograniczenie zużycia energii elektrycznej. Systemy zarządzania energią jak na razie ze względów finansowych są poza zasięgiem przeciętnego człowieka, jednak istnieją sposoby na stworzenie niewielkim kosztem i przy niewielkich nakładach pracy własnego systemu zarządzania daną instalacją na bazie układu mikroprocesorowego.

Coraz częściej takie instalacje jak klimatyzacja oraz wentylacja elektryczna spotykane są w domach jednorodzinnych, zatem rośnie też zapotrzebowanie na ekonomiczne zarządzanie takimi instalacjami. Dzisiejsza technologia pozwala przeciętnemu użytkownikowi energii elektrycznej na zaprogramowanie we własnym zakresie systemu ograniczającego zużycie prądu w instalacjach klimatyzacji i wentylacji oraz optymalizację ich działania bez konieczności ciągłej ingerencji użytkownika. Przyczynia się do tego również rosnąca popularność układów mikroprocesorowych takich jak STM32, Raspberry Pi, czy też Arduino. Poniżej zaprezentowane będą najpopularniejsze systemy zarządzania budynkiem, a także projekty systemów zautomatyzowanego zarządzania instalacją wentylacji i klimatyzacji do domowych zastosowań.

### **BMS – SYSTEMY ZARZĄDZANIA BUDYNKIEM**

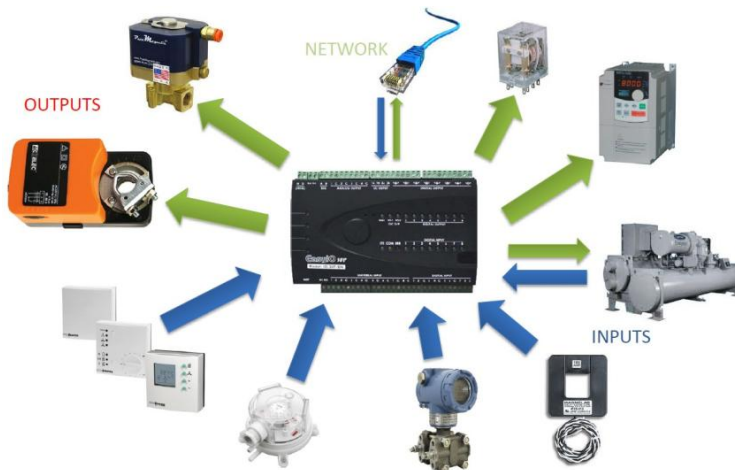
BMS (ang. *building management system*) to branżowy termin określający systemy zarządzania i sterowania budynkiem. Taki system to inteligentna sieć sterowników opartych na mikroprocesorach służących do nadzoru instalacji sanitarnych budynku takich jak: ogrzewanie, wentylacja, klimatyzacja, jak rów-

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, [michal.knafel@pollub.edu.pl](mailto:michal.knafel@pollub.edu.pl)

niez instalacji elektrycznych, czyli m.in. oświetlenie, układy zasilania awaryjnego, nagłośnienie [1]. Ogólna zasada działania systemu wygląda następująco: poprzez różnego rodzaju czujniki rozmieszczone w budynku zbierane są dane, które po przetworzeniu odpowiednimi algorytmami wysyłane są ze sterowników do urządzeń wykonawczych (w przypadku klimatyzacji i wentylacji będzie to np. wentylator nawiewny, centrala klimatyzacyjna itp.). Powyższy opis został schematycznie zobrazowany na rysunku 1. Czujniki stosowane w systemach BMS a szczególnie do sterowania wyżej wymienionymi systemami to:

- czujnik temperatury – np. temperatura wewnątrz pomieszczenia, służy do pomiaru temperatury, stosowany w systemach klimatyzacji
- czujnik dwutlenku węgla – stosowany przy systemach automatycznego przewietrzania w razie przekroczenia dopuszczalnych norm lub monitorowania jakości powietrza
- czujnik wilgotności – umożliwia systemowi zbieranie danych na temat wilgotności w pomieszczeniu, umożliwia sterowanie sekwencjami nawilżania lub osuszania pomieszczeń
- specjalistyczne czujniki jakości powietrza lub wykrywające obecność określonej substancji w powietrzu [2].



Rys. 1. Schemat działania kontrolera BMS [1]

Częściami składowymi systemu jest: sprzęt – urządzenia wykonawcze, czujniki/aktory, urządzenia komunikacyjne oraz oprogramowanie, skonfigurowane

w sposób hierarchiczny, tj. z centralą systemu jako urządzeniem nadrzędnym, któremu podlegają poszczególne urządzenia wykonawcze [2].

Systemy BMS łączą funkcjonalność poszczególnych instalacji scalając ją w jeden zintegrowany system, który pozwala użytkownikowi na monitorowanie parametrów warunków panujących w budynku oraz dostosowywanie ich do własnych potrzeb.

## POPULARNE PROTOKOŁY SYSTEMU BMS

**Modbus** to protokół komunikacji szeregowej opracowany przez firmę Modicon (obecnie Schneider Electric). Jest to standard do podłączania szerokiej gamy przemysłowych urządzeń elektronicznych. Protokół oparty jest na architekturze klient/serwer do zarządzania komunikacją między hostem a inteligentnymi urządzeniami, głównie czujnikami w systemach akwizycji danych. W systemach automatyki budynków służy do sterowania agregatami chłodniczymi, wentylatorami i kotłami grzewczymi. Praca systemu Modbus polega na pośredniczeniu w komunikacji między czujnikami a inteligentnymi urządzeniami i monitorowaniu urządzeń polowych wykorzystując komputer oraz interfejs człowiek-maszyna. System znajduje zastosowanie w budownictwie, infrastrukturze, przemyśle, transporcie i jest często stosowanym protokołem na świecie [1].

**M-Bus** (ang. *meter bus* – magistrała licznikowa) jest europejskim standardem zdalnego odczytu zużycia z liczników (energii elektrycznej, wody, gazu, ciepła) w budynkach. Umożliwia odczyt danych zdalnie z komputera hostującego lub urządzeń przenośnych. W automatyce budynkowej może łączyć się z systemem budynku w celu integracji z innymi systemami (oświetlenie lub HVAC – połączony system odpowiedzialny za ogrzewanie, wentylację i klimatyzację) [1].

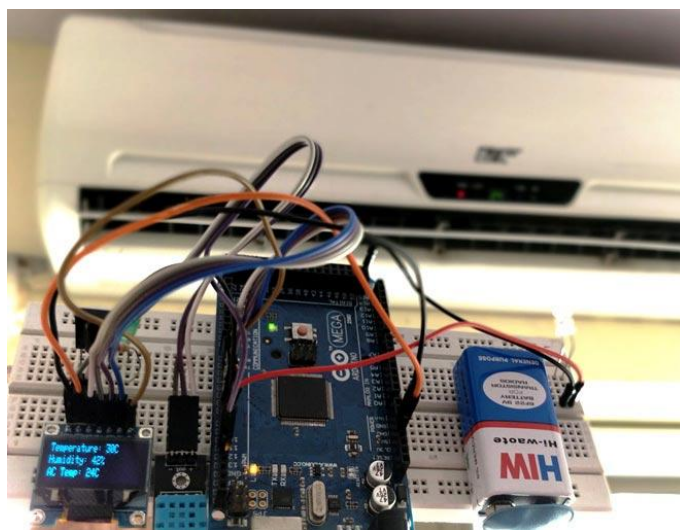
**KNX** to znany na całym świecie standard komunikacji do sterowania budynkiem. Stowarzyszenie jest połączeniem trzech starszych standardów: *European Home Systems Protocol* (EHS), *European Installation Bus* (EIB) oraz BatiBUS, zarządza standardem i zapewnia oprogramowanie do uruchamiania urządzeń bez względu na producenta stosując znormalizowane procedury uruchamiania. System stosowany jest w automatyce budynków mieszkalnych i komercyjnych, integruje systemy oświetlenia, bezpieczeństwa, HVAC oraz zarządzanie energią.

**BACnet** to protokół nastawiony wyłącznie na automatyce budynków, jest standardem obsługującym większość instalacji budynku, w tym urządzenia HVAC, ochrony przeciwpożarowej, instalacji kontroli dostępu i antywłamaniowych, a także oświetlenia [1].

## UKŁAD ZARZĄDZANIA PRACĄ KLIMATYZATORA NA BAZIE PLATFORMY ARDUINO

W odróżnieniu od rozwiązań przemysłowych i komercyjnych stworzenie prostego systemu regulacji temperatury do własnego użytku jest stosunkowo proste i nie wymaga poświęcenia wielkich nakładów finansowych. Również klimatyzator, który kiedyś był uważany za przedmiot luksusowy i można go było znaleźć tylko w dużych hotelach, salach filmowych, restauracjach itp., teraz jest na wyciągnięcie ręki dla każdego.

Aby zapewnić sobie komfortową temperaturę w pomieszczeniu niezależnie czy będzie to lato czy zima wystarczy tylko ustawić odpowiednią temperaturę a system klimatyzacji wykona resztę pracy. Jest jednak jedna rzecz która sprawia, że nie jest to takie proste, mianowicie największy problem stanowi wysokie zużycie energii elektrycznej.



Rys. 2. Automatyczny regulator temperatury klimatyzatora na bazie Arduino [4]

Poniżej zostanie przedstawiony małego automatycznego obwodu kontroli temperatury, który mógłby zminimalizować pobór energii elektrycznej poprzez automatyczną zmianę temperatury klimatyzatora na podstawie temperatury w pomieszczeniach. Zmieniając okresowo ustawioną temperaturę, można uniknąć sytuacji, w której klimatyzator będzie pracował przez dłuższy czas przy niższych temperaturach, a tym samym zużywał mniej energii. Aby zapewnić sobie komfortową temperaturę w pomieszczeniu w ciągu dnia, należałoby ręcz-

nie ustawiać temperaturę klimatyzatora za każdym razem w zależności od zmian temperatury w pomieszczeniu. Nie jest to jednak zbyt wygodna opcja i można zautomatyzować ten proces. Użyty zostanie do tego czujnik temperatury DHT11, który ma za zadanie odczytywanie aktualnej temperatury w pomieszczeniu i na jej podstawie wysła polecenia do jednostki klimatyzatora poprzez nadajnika podczerwieni, analogicznie jak pilot do klimatyzatora. Jednostka klimatyzacji będzie reagowała na polecenia czujnika tak samo jak na polecenia pilota, a więc automatycznie dostosuje temperaturę do jej zmian w pomieszczeniu. System będzie również utrzymywał ustawioną temperaturę klimatyzatora, aby nie zmieniała się w ciągu dnia [4].

W projekcie zastosowano:

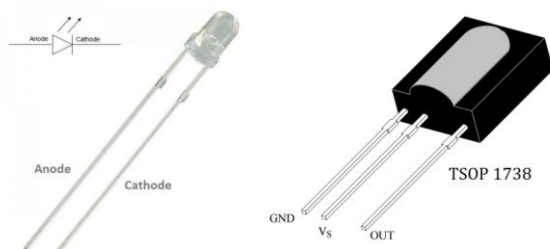
- płytke Arduino Mega 2560
- czujnik podczerwieni TSOP1738 (HS0038)
- dioda IR emitująca podczerwień
- czujnik temperatury i wilgotności DHT11
- LED w dowolnym kolorze oraz rezystor 1 k $\Omega$
- płytka prototypowa
- przewody połączeniowe do płytki prototypowej.

Każdy pilot, jaki używamy codziennie działa z pomocą nadajnika podczerwieni, który jest niczym innym jak diodą emitującą światło podczerwone. Sygnał wysyłany przez nadajnik jest wychwytywany i odczytywany przez odbiornik w urządzeniu, którym sterujemy. Każdy przycisk pilota ma swój unikalny sygnał, który po odczytaniu przez odbiornik wykona określone działanie.

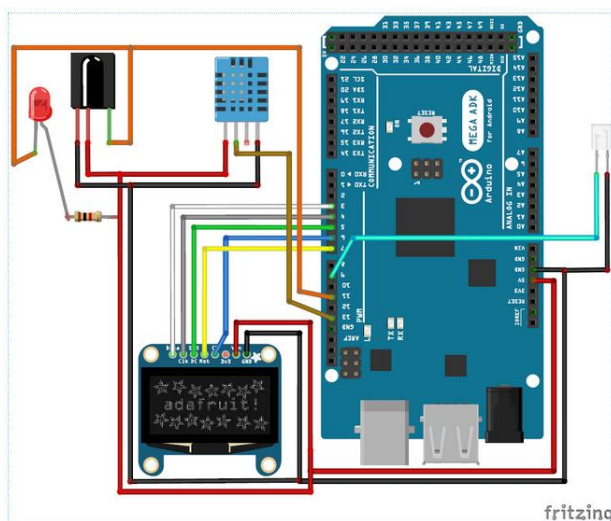
Wykorzystany czujnik podczerwieni TSOP jest używany jako dekodery sygnału przychodzącego z nadajnika – pilota. Odbiornik ten będzie połączony z płytką Arduino w celu wytworzenia sygnału dla klimatyzatora w zależności od wybranego przycisku na pilocie, w którym dioda IR wytworzy sygnał dla wykonania określonej funkcji. W ten sposób za pomocą płytki Arduino będzie można kontrolować klimatyzator [4].

W końcu pozostaje kwestia odczytu temperatury otoczenia za pomocą czujnika DHT11, aby odpowiednio poinstruować klimatyzator poprzez sygnał podczerwieni. Dla lepszej wizualizacji odczytu danych dodano wyświetlacz OLED, który wyświetla dane pomiarów temperatury, wilgotności oraz ustawionej na klimatyzatorze temperatury.

Po wykonaniu połączeń wszystkich komponentów trzeba przygotować i wgrać program wykonawczy. Do poprawnego działania programu należy zainstalować odpowiednie biblioteki, a potem przesłać kod programu do urządzenia.



Rys. 3. Po lewej: dioda IR emitująca podczerwień, po prawej: czujnik podczerwieni [6, 7]



Rys. 4. Schemat połączeń płytki Arduino z czujnikami i wyświetlaczem OLED [5]

Następnie w celu przetestowania poprawnego działania należy skierować pilota w stronę czujnika podczerwieni i nacisnąć dowolny przycisk. Odczyt sygnału zostanie pokazany na wyświetlaczu, po każdej zmianie temperatury na pilocie dane zostaną zaktualizowane na wyświetlaczu. Należy w ten sposób wygenerować kod dla różnych poziomów temperatur tak, aby przypisać wartości wygenerowane przez pilota i zapisać je w programie głównym.

Program działa następująco: czujnik DHT11 używany jest do odczytu temperatury i wilgotności w pomieszczeniu, a dane pomiarowe przesyłane są na wyświetlacz. Gdy temperaturę zostanie odczytana, jest porównywana z pożądaną ustawioną wartością stałą. W przypadku odczytu wyższej temperatury w pomieszczeniu niż pożądana, na klimatyzatorze będzie ustawiona temperatura niższa, aby jak najszybciej schłodzić pomieszczenie do pożądaney temperatury.

W ten oto sposób uzyskujemy możliwość automatycznego sterowania klimatyzatorem tak, aby bez ingerencji użytkownika utrzymywać dany poziom temperatury bez względu na wahanie temperatur otoczenia [4].

```

testtop | Arduino 1.8.3
File Edit Sketch Tools Help
testtop $
Adafruit_SSD1306 display(OLED_MOSI, OLED_CLK, OLED_DC, OLED_RESET, OLED_CS);

#define SSD1306_LCDHEIGHT 64 //Change if you are using a Different OLED

#define DHT11_PIN 13 //Sensor output pin is connected to pin 13
dht DHT; //Sensor object named as DHT

#define Desired_temperature 27 //The desired temperature is 27°C at any time

//Decoded Remote Signals for my AC CHANGE IT FOR YOUR REMOTE
unsigned int ACOeff[] = {2950,1750, 400,1100, 420,1100, 450,950, 450,950, 400,400, 400,400, 450,1100, 400,400, 400,400, 450,1100, 400,1100, 450,
unsigned int ACon[] = {2950,1700, 450,1100, 400,1100, 450,350, 450,350, 450,400, 450,1050, 450,350, 450,400, 450,1050, 450,1100, 400,4
unsigned int Temp23[] = {3000,1650, 550,950, 550,1000, 500,300, 550,250, 550,1000, 500,300, 550,250, 550,1000, 500,300, 550,1000, 550,950, 550,:
unsigned int Temp24[] = {3000,1650, 500,1050, 500,1000, 500,300, 500,300, 500,350, 500,1000, 500,300, 500,350, 500,1000, 500,300, 500,1050, 500
unsigned int Temp25[] = {3050,1650, 500,1000, 550,950, 550,300, 500,300, 500,300, 550,1000, 500,300, 500,300, 550,1000, 550,950, 550,:
unsigned int Temp26[] = {3050,1650, 500,1000, 550,1050, 500,300, 500,300, 500,350, 500,1000, 500,300, 500,350, 500,1000, 500,1050, 450
unsigned int Temp27[] = {3050,1600, 550,1000, 500,1000, 550,300, 500,300, 550,250, 550,1000, 500,300, 500,300, 550,1000, 550,1000, 550
unsigned int Temp28[] = {3100,1600, 550,950, 550,1000, 550,250, 550,250, 550,1000, 500,300, 500,300, 550,1000, 500,1000, 550,:
unsigned int Temp29[] = {3100,1550, 600,950, 500,1000, 550,300, 500,300, 500,300, 550,950, 550,300, 550,250, 550,1000, 500,1000, 550,:
unsigned int Temp30[] = {3000,1650, 500,1000, 550,1000, 500,300, 500,300, 550,250, 550,1000, 500,300, 500,300, 550,1000, 550,950, 550
//Change it for your remote

IReard IReard:
int Measured_temp;
int Measured_humi;
<
Done Saving

```

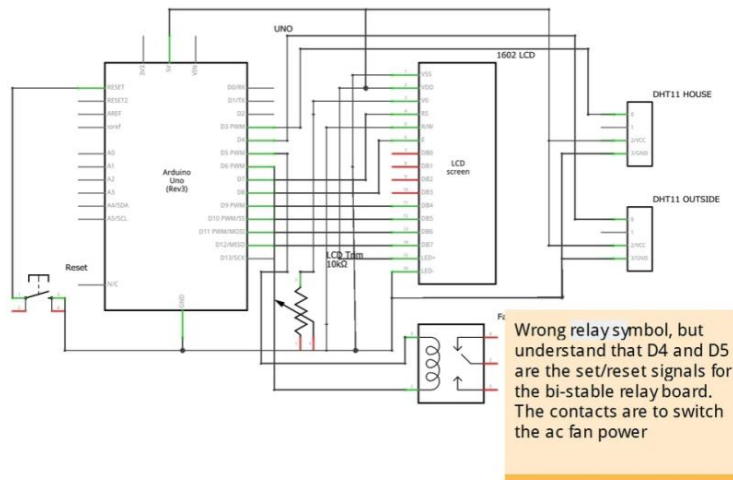
Rys. 5. Widok kodu programu wykonawczego z wyróżnionymi kodami odczytanymi z pilota [4]

## UKŁAD ZARZĄDZANIA PRACĄ WENTYLACJI NA BAZIE PLATFORMY ARDUINO

Kolejnym przykładem zastosowania platformy Arduino we własnym domu będzie system zarządzania wentylacją domu. Głównym założeniem zautomatyzowania procesu wentylacji jest wygoda i energooszczędność. Użytkownik nie musi martwić się ręcznym załączaniem i wyłączeniem systemu domowej wentylacji, nie zawsze też ma możliwość nadzorowania jej przez cały czas. Dlatego ideą tego projektu jest załączanie i wyłączenie systemu wentylacji w pomieszczeniach, które narażone są na wilgoć tak, aby system nie pracował ciągle. Zbyt długa praca wentylacji mogłaby znacząco obniżyć temperaturę w pomieszczeniach, zwłaszcza zimą, latem zaś włączać do domu zbyt dużo gorącego powietrza, dlatego celem jest wyeliminowanie ingerencji użytkownika i automatyzacja procesu wentylowania.

Sterowanie systemem odbywa się poprzez pętlę działającej na płycie Arduino, na której znajdują się dwa czujniki temperatury. Jeden z nich służy do odczytu temperatury wewnątrz domu, drugi zaś na zewnątrz. Moduł Arduino steruje przekaźnikiem do sterowania wentylatorem [8].





Rys. 6. Schemat układu regulacji domowej wentylacji [8]

Z uwagi na prawdopodobieństwo długotrwałej pracy w dowolnym stanie zastosowano przekaźnik bistabilny, który nie musi być stale zasilany, aby utrzymać którąkolwiek pozycję. Dodatkowo dla umożliwienia podglądu mierzonych parametrów zastosowano wyświetlacz LCD.

W pierwszej linii wyświetlana jest temperatura w budynku i na zewnątrz, w drugiej zaś stan wentylatora i tryb jego pracy. Do budowy systemu użyto:

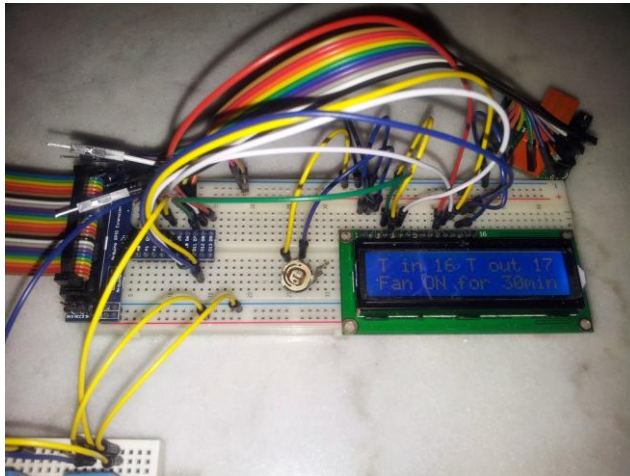
- płytki Arduino UNO, montaż w skrzynce sterowniczej
- ładowarka do telefonu komórkowego, 1 A, wtyczka USB
- bistabilna płytki przekaźnikowa 5 V
- wyświetlacz LCD, typ 1602, dwuwierszowy, 16-kanałowy
- 2 czujniki temperatury DHT11.

Sterowanie odbywa się poprzez ciągłe powtarzanie cyklu 30+1 (w minutach). Opiera się również o zdefiniowaną temperaturę komfortu (zdefiniowaną przez użytkownika), do której osiągnięcia będzie dążył cały układ. Cały cykl pracy polega na tym, że wentylator pracuje przez minutę, jeżeli temperatura zewnętrzna pomoże ogrzać lub schłodzić dom do temperatury komfortu, lub ją utrzymać, wentylator pozostanie włączony przez 30 minut. Jeżeli jednak temperatura zewnętrzna zbyt szybko schłodzi lub ogrzeje dom, to wentylator pozostanie wyłączony na czas 30 minut. Gdy z kolei zewnętrzna temperatura będzie miała mniejszy wpływ na odchylenie temperatury wewnątrz od zdefiniowanej przez użytkownika (to znaczy, że na zewnątrz i wewnątrz są takie same temperatury) wentylator włączy się na 30 minut [8].

Cykl pracy jest opisany następująco:

- krok 1: włącz wentylator
- krok 2: czekaj 1 min
- krok 3: odczytaj z czujników temperatury na zewnątrz i wewnątrz
- krok 4: jeśli  $T_{\text{wewn}} < T_{\text{użyty}}$  i  $T_{\text{zewn}} < (T_{\text{wewn}} - 5^{\circ}\text{C})$  wtedy wyłącz wentylator, poczekaj 30 minut, przejdź do kroku 7
- krok 5: jeśli  $T_{\text{wewn}} > T_{\text{użyty}}$  i  $T_{\text{zewn}} > (T_{\text{wewn}} + 5^{\circ}\text{C})$  wtedy wyłącz wentylator, poczekaj 30 minut, przejdź do kroku 7
- krok 6: jeśli warunki w kroku 4 i 5 nie zostały spełnione wtedy:
  - 1: wentylator zostaje włączony na czas  $(T_{\text{zewn}} - T_{\text{użyty}}) * 5$  min
  - 2: wentylator zostaje wyłączony na czas  $30 - (T_{\text{zewn}} - T_{\text{użyty}}) * 5$  min
- krok 7: powtórz  
gdzie:  $T_{\text{wewn}}$  – zmierzona temperatura wewnątrz domu w  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{użyty}}$  – zdefiniowana temperatura komfortu, w  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{zewn}}$  – zmierzona temperatura na zewnątrz w  $^{\circ}\text{C}$ .

Po zestawieniu układu i połączeniu komponentów należy wgrać program i przetestować działanie. Dużym udogodnieniem użycia platformy Arduino jest możliwość zaprogramowania funkcji autotestu. Do poprawnego działania układu niezbędne jest również zastosowanie obwodu tłumiącego na stykach przełącznika w postaci kondensatora połączonego szeregowo z rezystorem na przełączanych stykach przełącznika. Wentylator nie jest obciążeniem czysto rezystancyjnym i jego włączanie może wpływać na zakłócenia wyświetlacza LCD [8].



Rys. 7. Widok połączonego układu na płytce prototypowej [8]

## PODSUMOWANIE

W dzisiejszych czasach technologia pozwala na wykonanie kosztem osiągalnym dla przeciętnego człowieka skutecznego systemu zarządzania pracą instalacji klimatyzacji i wentylacji. Użytkownik może w łatwy sposób opanować działanie wybranego układu mikroprocesorowego takiego jak Arduino czy STM32, aby zastosować go do automatyzacji działania wybranej instalacji w celu ograniczenia zużycia energii i zwiększenia komfortu użytkownika. Przytoczone wcześniej przykłady projektów do własnej realizacji pokazują, że skonstruowanie takiego systemu wiąże się z postępowaniem według określonych instrukcji i zakupieniem odpowiednich urządzeń i komponentów. Nie trzeba również pisać kodu programu w całości, wystarczy skorzystać z gotowych rozwiązań i w minimalnym stopniu dostosowywać je do własnych potrzeb. Jak już wcześniej pokazano w ten sposób można niewielkim nakładem uzyskać zautomatyzowany system kontroli klimatyzacji i wentylacji w swoim domu.

## LITERATURA

- [1] [http://www.eem.lv/docs/2019/6.darbibas\\_ataskaite\\_ENG/9\\_sadala\\_darb\\_6.pdf](http://www.eem.lv/docs/2019/6.darbibas_ataskaite_ENG/9_sadala_darb_6.pdf), zasoby z dnia 20.01.2021
- [2] <https://www.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/279-wydanie-12-2017-01-2018/4328-integracja-instalacji-hvac-w-uklady-bms.html>, zasoby z dnia 20.01.2021
- [3] Mikulik J., *Budynek inteligentny*, t. II – *Podstawowe Systemy bezpieczeństwa w budynkach inteligentnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010
- [4] <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-automatic-ac-temperature-control>, zasoby z dnia 20.01.2021
- [5] [https://circuitdigest.com/fullimage?i=circuitdiagram\\_mic/Automatic-AC-Temperature-Controller-using-arduino-circuit-diagram.png](https://circuitdigest.com/fullimage?i=circuitdiagram_mic/Automatic-AC-Temperature-Controller-using-arduino-circuit-diagram.png), zasoby z dnia 20.01.2021
- [6] [https://1.bp.blogspot.com/-HKa2bQcBQOk/XwmRgecGwGI/AAAAAAAAAANo/DKf\\_TKxLYbseYqM3LSl6AJZ1Ch-hvngMACLcBGAsYHQ/s1600/TSOP1738-Pinout.jpg](https://1.bp.blogspot.com/-HKa2bQcBQOk/XwmRgecGwGI/AAAAAAAAAANo/DKf_TKxLYbseYqM3LSl6AJZ1Ch-hvngMACLcBGAsYHQ/s1600/TSOP1738-Pinout.jpg), zasoby z dnia 20.01.2021
- [7] <https://www.cytron.io/image/cache/catalog/SN-IR-T3-0-2-1-800x800-Labelled-0-1-1-800x800.jpg>, zasoby z dnia 20.01.2021
- [8] <https://www.instructables.com/Home-Ventilation-Fan-Controller-Using-an-Arduino-U/>, zasoby z dnia 20.01.2021.

## PROJEKT WIRTUALNEGO MIERNIKA

### WSTĘP

Dziedzina metrologii w ostatnich dziesięcioleciach bardzo się rozwinęła. Obecnie wysoki nacisk jest kładziony na tworzenie przyrządów pomiarowych charakteryzujących się wysokim poziomem uniwersalności i elastyczności. Odpowiedzią na te wymagania jest konstruowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych wchodzących w skład systemu pomiarowego.

„Wirtualny” (z łac. *virtualis* – możliwy), wyraz ten według internetowego *Słownika wyrazów obcych* ze strony [edupedia.pl](http://edupedia.pl) oznacza „mogący zaistnieć, teoretycznie możliwy, potencjalny”. Pojęcie to określa coś czego nie ma w danej postaci w rzeczywistości, ale dla użytkownika jest tym co realizuje dane zadanie z użyciem innych elementów niż tradycyjne.

Wirtualny przyrząd pomiarowy jest zdolny do przeprowadzenia rzeczywistych pomiarów, przy czym niektóre funkcje może wykonać innymi metodami. Odnosi się to do obsługi wirtualnego przyrządu. W tradycyjnych przyrządach pomiarowych nastawy czy wybranie danej funkcji odbywa się za pomocą przycisków, pokręteł czy suwaków na panelu czołowym przyrządu. Panel czołowy wirtualnego miernika zazwyczaj jest symulowany na ekranie monitora, gdzie do sterownia używa się np. myszki, klawiatury czy ekranu dotykowego.

Zgodnie z teorią, „Przyrząd wirtualny to rodzaj inteligentnego przyrządu pomiarowego, powstałego w wyniku sprzężenia sprzętu nowej generacji z komputerem osobistym ogólnego przeznaczenia i przyjaznym dla użytkownika oprogramowaniem, które umożliwia użytkownikowi współpracę z komputerem na zasadach takich, jakby obsługiwał tradycyjny przyrząd pomiarowy” [1].

### ROZWÓJ PRYZRĄDÓW POMIAROWYCH

Przyrządy pomiarowe rozwijały się wraz z nauką i techniką. Zmiany następowały w sposobie konwersji sygnału, w technikach konstrukcji aparatury

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, [daniel.pizun@pollub.edu.pl](mailto:daniel.pizun@pollub.edu.pl)

i także w sposobie używania danego urządzenia, jak i stopniu integracji elementów systemu pomiarowego. Pierwszą generację urządzeń pomiarowych stanowiły przyrządy analogowe sterowane ręcznie. Użytkownik dokonywał odczytu wskazania wychylenia wskazówki na tle odpowiadającej danej wartości wielkości mierzonej skali. Druga generacja mierników nastąpiła, kiedy zastosowano blok cyfryzacji sygnału w skutek czego wynik pomiaru przedstawiono na wyświetlaczu cyfrowym co wyeliminowało błąd przy odczycie wychylenia wskazówki, jednak przyrząd nadal posiadał sterowanie ręczne [2].

Przyrządy trzeciej generacji mogą pracować samodzielnie w trybie autonomicznym, a także dzięki wbudowanym kanałom komunikacji cyfrowej mogą być sterowane zdalnie. Sterowanie tych urządzeń oparte jest na interfejsie, którym przesyłane są instrukcje sterujące z komputera do przyrządu gdzie są interpretowane. Wprowadzenie interfejsów komunikacyjnych przyczyniło się do projektowania bardziej złożonych przyrządów pomiarowych i upowszechniło systemy pomiarowe [2].

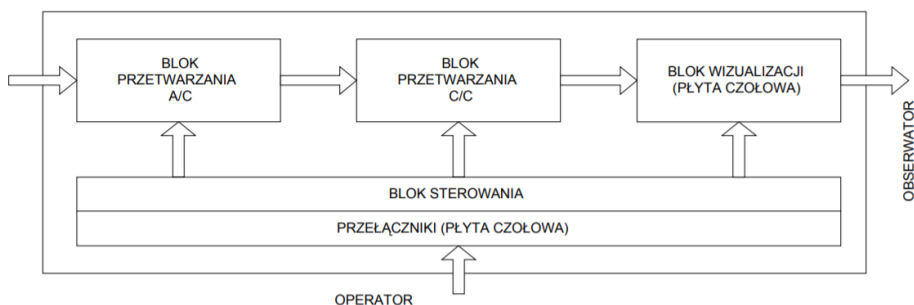
Czwartą i obecną generacją przyrządów pomiarowych są przyrządy wirtualne. Jak już zostało wspomniane we wstępie, przyrząd wirtualny to rodzaj inteligentnego urządzenia, w którego skład wchodzi odpowiednio dostosowany i skonfigurowany przyrząd pomiarowy oraz komputer posiadający oprogramowanie sterujące procesem pomiarowym [2].

Przyrząd wirtualny charakteryzuje się istotną cechą, czyli funkcjonalną elastycznością i dowolną rekonfigurowalnością. Oznacza to, że dany sprzęt w postaci karty przetworników czy przyrządu posiadającego kanały komunikacyjne, podłączone do komputerów przez porty COM 1 i COM 2 dają możliwość stworzenia wiele różnych przyrządów wirtualnych [6].

## **TRADYCYJNY I WIRTUALNY PRYZRĄD POMIAROWY**

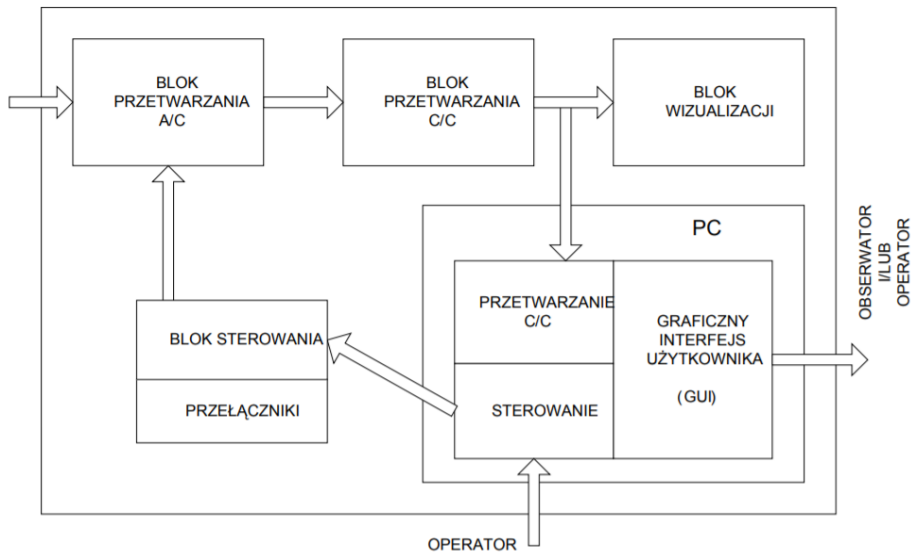
Omawiając przyrząd pomiarowy należy wyjaśnić, czym jest pomiar. Otóż pomiar jest procesem bądź zbiorem operacji, które mają na celu uzyskanie informacji o cechach badanego obiektu. Dana cecha czy też wielkość mierzona jest określona wartością wyrażoną iloczynem liczby i jednostki miary, który określany jest jako wynik pomiaru. Informacja charakteryzująca daną cechę jest przenoszona w formie sygnałów. Sygnały zawierające informacje ilościową o wielkościach mierzonych w formie ilościowej określone są jako sygnały pomiarowe. Pobranie informacji z obiektu mierzonego wykonane jest z użyciem czujnika pomiarowego. Czujniki podają informacje do urządzenia pomiarowego.

Tradycyjne cyfrowe urządzenie pomiarowe zamknięte jest w jednej obudowie i ma określone możliwości pobierania i wyświetlania danych, z niezmiennym sposobem komunikacji z obsługującym poprzez przyciski, pokrętki i cyfrowe wyświetlacze. Struktura takiego urządzenia to zintegrowane wzajemnie poszczególne bloki odpowiadające za kondycjonowanie sygnału, przetwarzanie z postaci analogowej na cyfrową, a także wbudowana magistrala danych, bloki pamięci i mikroprocesory. Taki przyrząd przetwarza, analizuje i przekształca sygnał, a wyniki prezentuje na wyświetlaczu. Funkcje urządzenia są ustalone przez producenta i nie mogą być konfigurowane przez użytkownika. Na poniższym Rys. 1 przedstawiono schemat blokowy takiego urządzenia [5].



Rys. 1. Struktura tradycyjnego przyrządu pomiarowego [5]

Przyrząd wirtualny wykonuje te same funkcje co przyrząd tradycyjny z tą różnicą, że ma inną budowę (Rys. 2). W skład przyrządu wchodzi komputer zazwyczaj klasy PC i jeden lub więcej pomiarowych bloków sprzętowych jak np. moduły akwizycji danych czyli karta gromadzenia danych z oprogramowaniem, przyrządy z interfejsem IEC-625, i inne. Połączenie tych elementów z komputerem realizowane jest jako karta typu "plug-in" umiejscowiona bezpośrednio w komputerze lub połączenie przez interfejs jako urządzenie zewnętrzne. Główną zaletą jest możliwość zbudowania przyrządu wirtualnego przez użytkownika. Projekt i budowa przyrządu wirtualnego nie jest zarezerwowana tylko dla producenta użytkownik może wykonać przyrząd i dostosować jego funkcje do swoich potrzeb. Jest to możliwe dzięki temu, że użytkownik może dobrać sobie odpowiadające mu oprogramowanie i napisać własny program sterujący przyrządem realizujący założone funkcje pomiarowe. Zatem oprogramowanie jest nieodłącznym elementem przyrządu wirtualnego, gdyż integruje komputer z blokami pomiarowymi [5].



Rys. 2. Struktura wirtualnego przyrządu pomiarowego [5]

Typowy tor pomiarowy przyrządu wirtualnego składa się z trzech bloków głównych:

- blok akwizycji danych pomiarowych
- blok analizy i przetwarzania zebranych danych pomiarowych
- blok interfejsu użytkownika.

Wirtualny przyrząd pomiarowy charakteryzuje się otwartą architekturą, czyli dostępna jest magistrala interfejsu, przez który obywa się komunikacja komputera ze sprzętem. Wspomnianą magistralą dla wewnętrznych sprzętowych bloków jest magistrala mikroprocesorowa komputera, a dla bloków zewnętrznych zazwyczaj standardowy interfejs pomiarowy typu RS-232, RS-485, IEC-625. Ponadto możliwe jest wykonanie wirtualnego przyrządu, w którym nie ma fizycznego połączenia pomiędzy wyświetlającym wyniki komputerem a częścią sprzętową wykonującą pomiary. Zależy to dzięki oprogramowaniu, które umożliwia komunikację tych elementów ze sobą przez sieć internetową. Przyrząd wirtualny także cechuje funkcjonalna elastyczność, co oznacza, że dany sprzętowy blok funkcjonalny bądź zbiór bloków daje możliwość realizacji rozległego zbioru rozmaitych przyrządów wirtualnych wykonujących różne funkcje. Zatem dzięki tej funkcjonalności docelowe jest zredukowanie części sprzętowej przyrządu, co zmniejsza koszty, czas projektowania i późniejszych modyfikacji [5, 6].

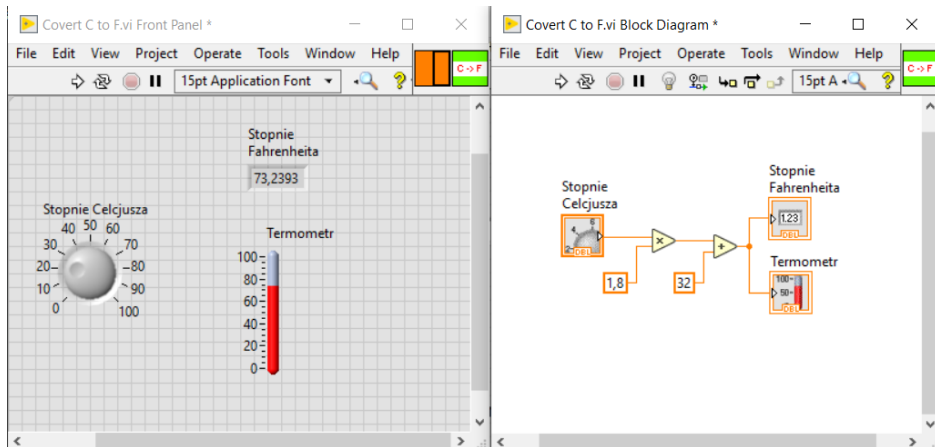
## OPROGRAMOWANIE PRZYRZĄDU WIRTUALNEGO

Jest to istotna składowa wirtualnego przyrządu pomiarowego. Oprogramowanie w dużej mierze stanowi o funkcjach danego urządzenia. Rodzaj i jakość środowiska programistycznego determinuje sposób, w jaki zostanie przeprowadzona analiza danych czy ich prezentacja oraz określa, ile czasu zajmie napisanie programu realizującego wirtualny przyrząd. Rodzaj oprogramowania znacząco wpływa na możliwości kooperacji z innymi programami oraz integracji sieci komputerowej.

Przyrząd wirtualny może być wykonany na dwa sposoby. Pierwszym sposobem jest pisanie programu od podstaw obsługującego kartę pomiarową lub przyrząd systemowy z wykorzystaniem klasycznych języków wysokiego poziomu takich jak C++, Pascal, Basic w środowisku np. Delphi. Drugi sposób polega na wykorzystaniu dużych zaawansowanych środowisk programowych, w których współpracują funkcje sterowania pracą przyrządu, zbierania i konwertowania danych pomiarowych, a także prezentacji wyników. Obecnie najczęściej wykorzystuje się narzędzia zaawansowane. Te narzędzia dają możliwość pracy na językach programowania wysokiego poziomu (graficznych), oferują różne edytory, rozruszniki (ang. *debugger*). Ponadto te środowiska mają złożone mechanizmy wspomagające pracę przyrządów pomiarowych i również ułatwiają pisanie programu sterującego systemem pomiarowym. Najbardziej rozpowszechnione zintegrowane środowiska pomiarowe to produkty firm: Hewlett-Packard (HP VEE®), Keithley (TestPoint®) i National Instruments (LabWindows® for DOS, LabWindows®/CVI, LabView®). Te środowiska posiadają rozbudowane menu tekstowe, szerokie zasoby funkcji w postaci symboli graficznych i wiele dodatkowych opcji wspomagających programowanie [5].

LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) jest to zintegrowane środowisko programowania, w którym używany jest graficzny język programowania (tzw. język „G”) obsługujący systemy pomiarowe. LabView posiada niezbędne narzędzia do akwizycji danych, przetwarzania i prezentacji wyników. Edycja programu przeprowadzana jest w dwóch oknach. Strukturę programu tworzy się w postaci schematu blokowego w oknie diagramu. Natomiast drugim z nich jest okno panelu, w którym prezentuje się wyniki i wprowadza dane za pomocą symboli graficznych symulujących rzeczywiste przyciski na przyrządzie. Oba okna (Rys. 3) zawierają odpowiednie palety narzędzi. LabView posiada szeroką gamę funkcji, podprogramów i bibliotek ułatwiających realizację większości zadań [4].

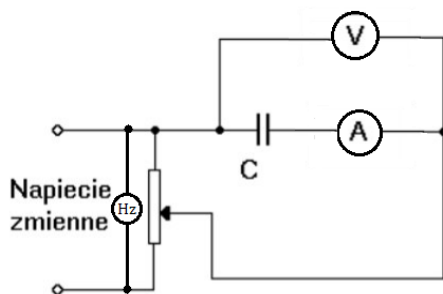




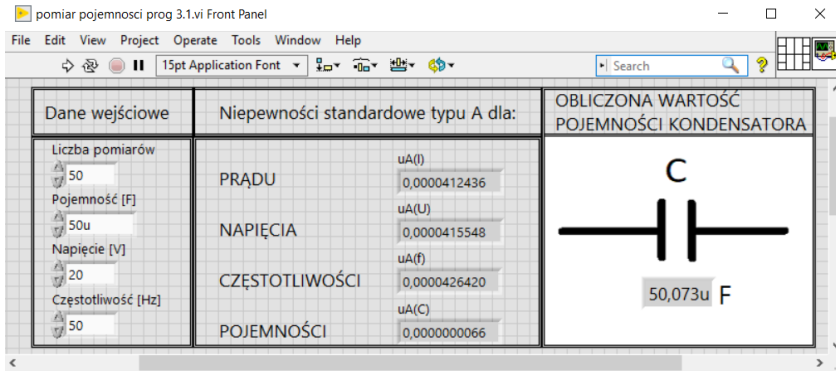
Rys. 3. Przykładowy program w Labview. Okno panelu po lewej i okno diagramu po prawej

## PROJEKT WIRTUALNEGO MIERNIKA POJEMNOŚCI ELEKTRYCZNEJ

Miernik został wykonany jako przyrząd wirtualny w środowisku LabView. Do pomiaru pojemności elektrycznej kondensatora wybrano metodę techniczną. Metoda polega na pomiarze prądu i napięcia przy znanej częstotliwości. Układ połączeń jest przedstawiony na Rys. 4. Układ ten jest zasilany napięciem przemiennym, wobec czego z pomiaru prądu  $I$  oraz napięcia  $U$  wyznaczamy impedancję  $Z$ . Pomijamy rezystancję  $R$  kondensatora gdyż nie ma znaczącego wpływu i przyjmujemy, że zastępcza impedancja  $Z$  jest równa reaktancji kondensatora  $X_C$  [3].

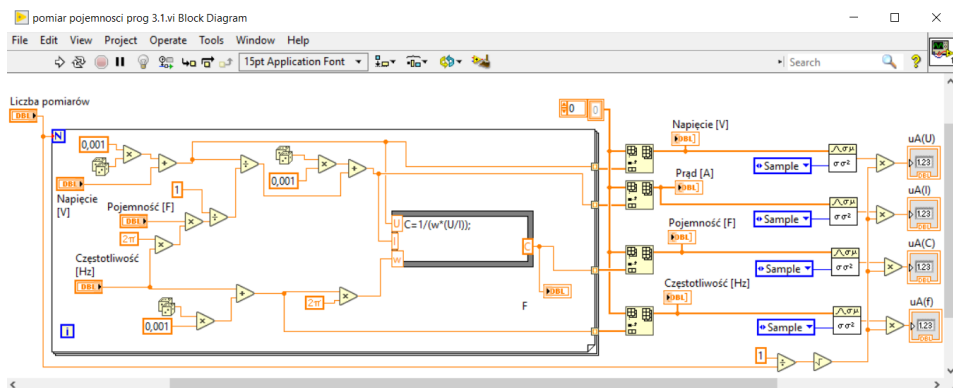


Rys. 4. Schemat do pomiaru pojemności kondensatora metodą techniczną



Rys. 5. Panel czołowy wirtualnego miernika pomiaru pojemności

Struktura programu jest przedstawiona na Rys. 6 natomiast prezentacja wyników na Rys. 5. Przyrząd wirtualny został opracowany na symulacji danych wejściowych, jednakże główne zadanie, którym jest obliczenie wartości pojemności mierzonego kondensatora, zrealizuje również dla rzeczywistych danych pomiarowych po drobnej modyfikacji programu i dołączeniu aparatury pomiarowej do komputera. Program oblicza pojemność na podstawie wzoru (5) oraz oblicza wartość niepewności pomiarowej typu A dla każdego sygnału.



Rys. 6. Diagram wirtualnego miernika pomiaru pojemności

## PODSUMOWANIE

Przyrząd wirtualny oprócz realizacji tych samych funkcji, co przyrząd tradycyjny daje nieporównywalnie więcej możliwości konstrukcji wszelkiego rodzaju mierników i złożonych systemów pomiarowych. Środowiska programistyczne dedykowane do budowy takich przyrządów mają szeroką bazę bibliotek, funkcji

i modułów przetwarzania sygnału. Dzięki oprogramowaniu komputer osobisty może stać się stanowiskiem pomiarowym. Praca w środowisku LabView jest intuicyjna, a programowanie w języku graficznym ułatwia zrozumienie procesów zachodzących na przetwarzanych danych. LabView jest oprogramowaniem, w którym można wykonać większość zadań nie tylko związanych z pomiarami.

## LITERATURA

- [1] Rak R., *Wirtualny przyrząd pomiarowy – realne narzędzie współczesnej metrologii*, OW PW, Warszawa 2003
- [2] Dobrowolski A., *Wirtualne przyrządy pomiarowe w laboratorium układów elektronicznych WAT*, Materiały XXXVI Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów MKM'04, 2004, 374–376
- [3] Cedro M., Wilczkowski D., *Pomiary elektryczne i elektroniczne*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2020
- [4] Tłaczała W., *Środowisko LabVIEW w eksperymencie wspomaganym komputerowo*, WNT, Warszawa 2014
- [5] <http://www.ee.pw.edu.pl/~nozykop1/wpp.pdf>, zasoby z dnia 07.01.2021
- [6] <http://imeia.elekt.polsl.pl/files/materials/lzm/2/WPP2.pdf>, zasoby z dnia 07.01.2021.

## **PROJEKT AUTOMATYCZNEJ REGULACJI ORAZ SAMOPOZIOMOWANIA BELKI OPRYSKIWACZA PRZY UŻYCIU CZUJNIKÓW ULTRADŹWIĘKOWYCH**

### **WSTĘP**

Aktualnie wszędzie następuje automatyzacja procesów zarówno w przemyśle, jak również rolnictwie. Obecnie wielu rolników korzysta już z prowadzenia równoległego korzystając przy tym z sygnału GPS. W obecnych czasach liczy się szybkość i oszczędność, a to właśnie jest w stanie zaoferować ten projekt, który zakłada wykorzystanie czujników ultradźwiękowych do automatycznej regulacji wysokości belki opryskiwacza od ziemi lub – w późniejszym stadium wzrostu uprawy – utrzymania zadanej wysokości od roślin. System wyposażony w 3 czujniki ultradźwiękowe, mikrokontroler Arduino oraz panel sterowania potrafi obniżyć czas pracy jak również pozwolić na jak najwyższą jej efektywność.

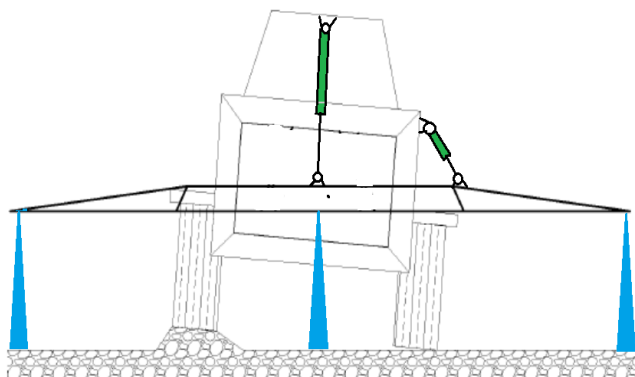
### **SCHEMAT DZIAŁANIA SYSTEMU**

System ma za zadanie w sposób niemalże natychmiastowy wykonać odpowiednie działania tak aby zapobiegać działaniom niepożądanym takim jak uderzenia belki o ziemię, niszczenie rośliny uprawnej itp. Dodatkowo zachowanie odpowiedniej, wysokości belki dla danego typu zabiegu wpłynie na jego skuteczność. Belka na całej jej szerokości powinna utrzymać stałą wysokość. Układ samopoziomowania składa się z 3 czujników ultradźwiękowych znajdujących się kolejno po jednym na końcach belki i jeden na jej środku. Na opryskiwaczu znajduje się również sterownik którego podstawowym elementem jest mikroprocesor Arduino, a także cewki łączące poszczególne elementy wykonawcze, kolejnym składnikiem całego systemu są elementy wykonawcze, czyli siłowniki elektryczne, ostatnim elementem jest panel użytkownika, który jest elementem dołączanym przy pomocy wtyczki do sterownika, tak aby możliwym było zamontowanie go w jak najbardziej odpowiednim miejscu wybranym przez

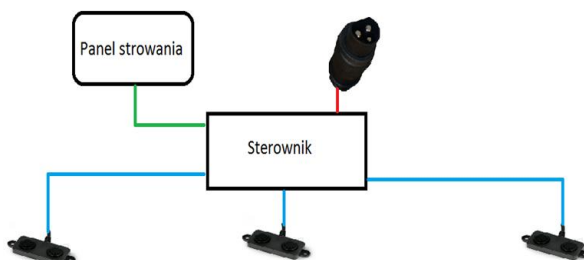
---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, adam.rudnik@pollub.edu.pl

użytkownika. Cały system zasilany jest z akumulatora maszyny ciągnącej przy pomocy złącza 3 pinowego. Na rysunku niebieskim kolorem oznaczone zostały wiązki tworzone przez czujniki ultradźwiękowe wraz z ich rozmieszczeniem na belce, natomiast zielonym kolorem elementy wykonawcze układu.



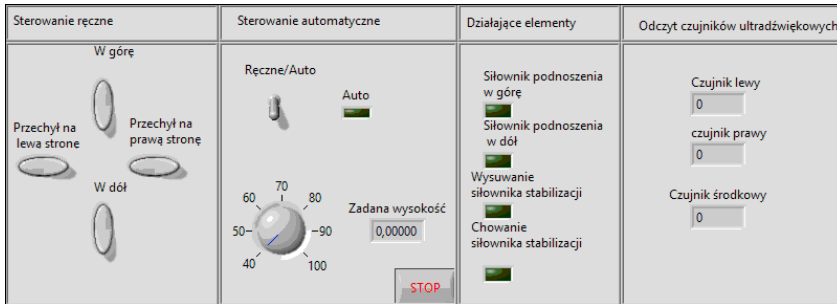
Rys. 1. Rozmieszczenie elementów roboczych i czujników ultradźwiękowych



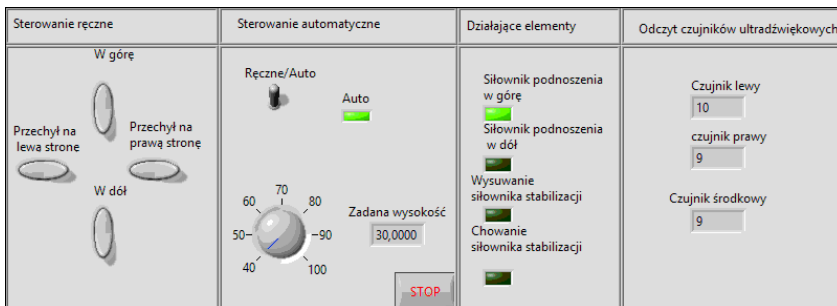
Rys. 2. Schemat ideowy systemu

Na rysunku 2. widzimy schemat ideowy budowanego systemu. Kolorem zielonym oznaczony został przewód sterowniczy XSTDYz 14 x 0,5 mm<sup>2</sup>, łączący sterownik z panelem sterowania, kolorem niebieskim zostały oznaczone przewody LIYY 4 x 0,34 mm<sup>2</sup>, łączące sterownik z czujnikami ultradźwiękowymi, natomiast kolorem czerwonym oznaczony jest przewód ONPD H07RN-F 3 x 1,5 mm<sup>2</sup>. Zamontowane przewody są na stałe przymocowane do elementów konstrukcyjnych opryskiwacza. Sterownik zamknięty jest w obudowie szczelnej IP68, a panel sterowania jest wykonany z klasą IP67.

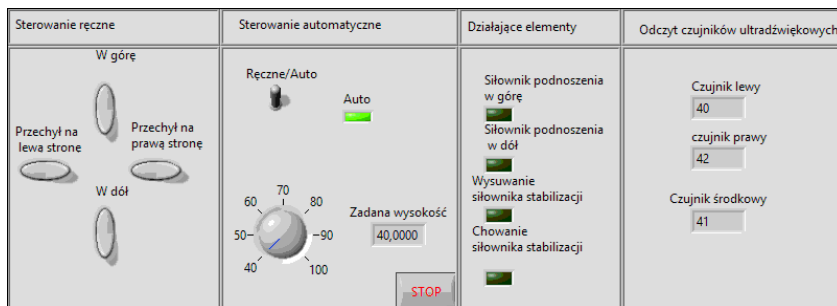
Aby zaprezentować możliwości funkcjonalne systemu wykonano symulację sterownika wraz z symulacją czujników oraz panelem sterowania w programie LabView, która ukazuje sposób działania układu.



Rys. 3. Panel sterowania wykonany w LabView

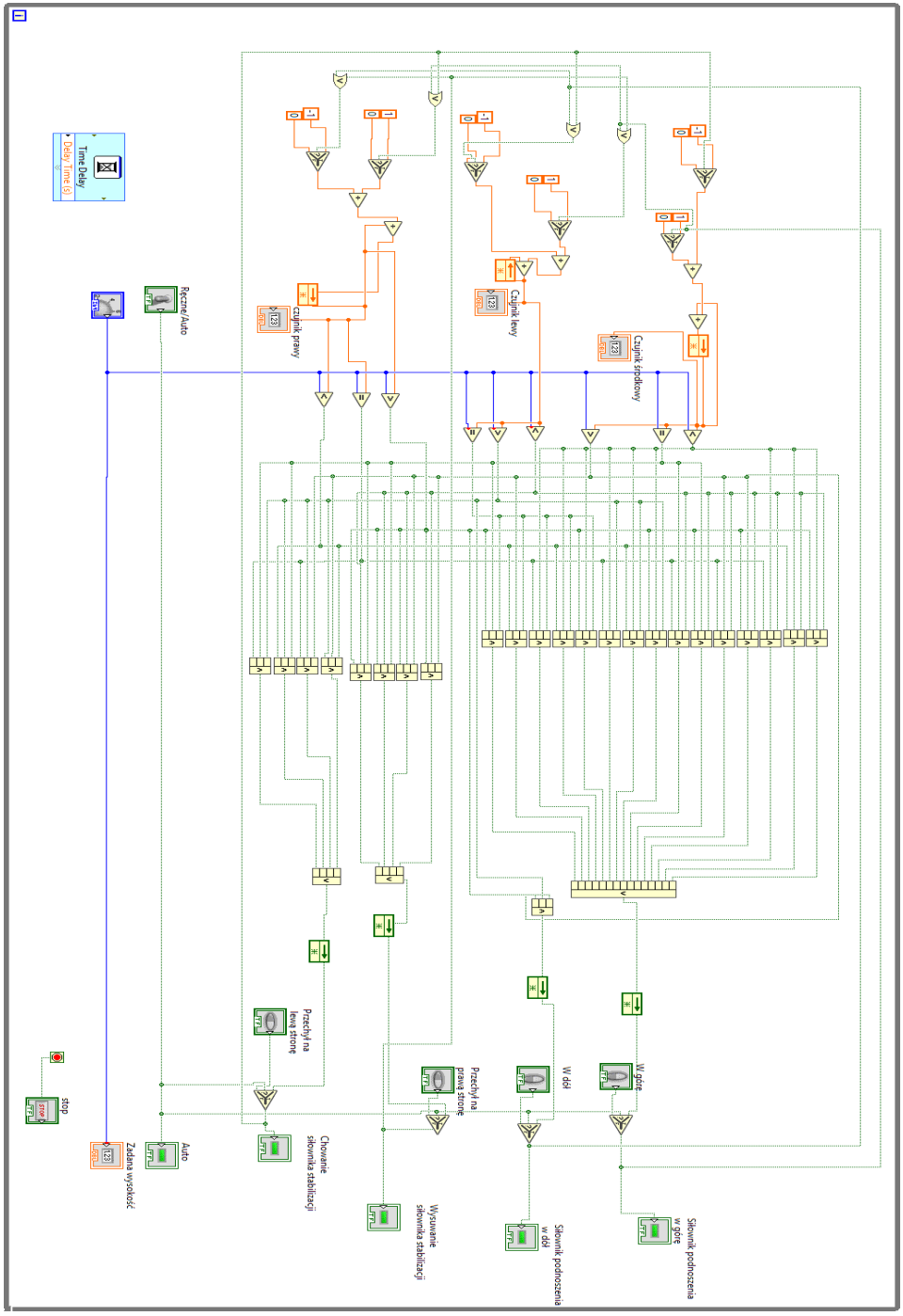


Rys. 4. Panel sterowania w trakcie pracy programu



Rys. 5. Panel sterowania po osiągnięciu założonej wartości

Jak widać na panelu sterowania oprócz pokręta regulacyjnego wysokość belki znajdują się kontrolki działania poszczególnych elementów układu, odczyt wartości czujników ultradźwiękowych, przełącznik trybu pracy z automatycznego na ręczny i przyciski pozwalające na ręczną regulację wysokości i pozomowania. Podstawą jest utrzymanie wysokości jak najbliższej ustalonej pokrętłem.



Rys. 6. Schemat układu zaprojektowany w programie LabView

## ELEMENTY UŻYTE W RZECZYWISTYM PROJEKCIE

- Trzy czujniki ultradźwiękowe A02YYUW



Rys. 7. Czujnik ultradźwiękowy A02YYUW

- Dwa siłowniki liniowe HARL1210 oraz HARL1224



Rys. 8. Siłownik liniowy użyty w projekcie

- Moduł przekaźnika SRD-05VDC-SL-C o maksymalnym prądzie 10 A



Rys. 9. Moduł SRD-05VDC-SL-C



- Moduł Arduino uno Rev3–A000066



*Rys. 10. Moduł Rev3–A000066*

## **WADY I ZALETY UKŁADU**

Wady projektowanego układu :

- Konieczność dokładnego siewu jak i jazdy w trakcie wykonywania prac z pomocą projektowanego układu w uprawach rzędowych takich jak kukurydza
- Brak możliwości zainstalowania w opryskiwaczach nie posiadających wbudowanego miejsca na zastosowanie poziomowania manualnego.

Zalety rozwiązania:

- Oszczędności wynikające z możliwości zmniejszenia ilości stosowanych środków ochrony roślin poprzez uzyskanie wyższej skuteczności
- Oszczędność czasu potrzebnego na wykonanie pracy poprzez odciążenie operatora
- Ochrona środowiska poprzez zmniejszenie możliwości znoszenia cieczy.

## **PODSUMOWANIE**

Podczas gdy dostępne na rynku rozwiązania automatycznego samopoziomowania są dedykowane do konkretnych maszyn, ten projekt może zostać zastosowany niemalże w każdym opryskiwaczu polowym. Rzeczą, która wyróżnia to rozwiązanie od innych, jest stosunkowo niska cena elementów wchodzących w skład całej instalacji. Koszt zamontowania takiego układu jest znikomy w po-

równaniu do korzyści które jest w stanie przynieść. Poprzez zastosowanie układu automatycznego samopoziomowania i korekcji wysokości umożliwiamy pracę z maszyną po zmroku, co nie pozostaje bez znaczenia dla pożytecznych owadów. Zwiększona skuteczność działania zastosowanych środków w znaczący sposób wpływa na ostateczny wynik dochodu z produkcji roślinnej. Automatyzacja i optymalizacja rolnictwa jest przyszłością tego działu. Wykorzystanie elementów dostępnych pozwala na długą i bezawaryjną pracę całego systemu.

## LITERATURA

- [1] Kapica J., Ścibisz M., *Wykorzystanie środowiska LabView do tworzenia instrumentów wirtualnych wspomagających pomiary w inżynierii rolniczej*. „Inżynieria Rolnicza”, 2007, 11, 77–83
- [2] Targowski P., Sylwestrzak M., Bajraszewski T., *Środowisko LabVIEW-własności i przykłady zastosowań*. „Postępy Fizyki”, 2009, 60, 255–256
- [3] Rząsa M., *Zastosowanie pakietu LabView*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, 2006, 4, 10–12
- [4] Ścibisz M., *Zastosowanie środowiska LabView do symulacji pracy panela operatorskiego maszyny rolniczej*. „Inżynieria Rolnicza”, 2008, 12, 215–220
- [5] Lipiński A., Sobotka J., Szczepan M., Lipiński S., *Przegląd systemów stabilizacji belek polowych opryskiwaczy*. „Inżynieria Rolnicza”, 2011, 15, 181–187
- [6] Szewczyk A., Wilczok G., *Wpływ zmiany ustawienia belki polowej w płaszczyźnie podłużnej opryskiwacza na rozkład poprzeczny opadu cieczy*. „Inżynieria Rolnicza”, 2006, 10, 281–288
- [7] Szewczyk A., Wilczok G., *Położenie belki polowej opryskiwacza a rozkład przestrzenny rozpylonej cieczy i pokrycie opryskiwanych powierzchni*. „Eksploatacja i Niezawodność”, 2008, 57–60
- [8] Boxall J., *Arduino. 65 praktycznych projektów*. Helion, 2013
- [9] Chodakowski P., *An Arduino library, which implements basic structures of PID regulator with autotuning procedures*. 2019, PhD Thesis. Instytut Automatyki i Robotyki.

## WIRTUALNA PRZETWORNICA STEP-UP, STEP-DOWN W ŚRODOWISKU MATLAB

### WSTĘP

Przetwornica step-up, step-down (*buck-boost converter*) to rodzaj zasilacza impulsowego prądu stałego łączącego zasadę działania przetwornicy obniżającej i podwyższającej napięcie, który umożliwia przy stałym napięciu wejściowym (np. baterii, akumulatora, nieregulowanego zasilacza) lub przemiennym (falownik, napięcie sieciowe) regulację napięcia wyjściowego do wartości odpowiednio niższej, równej bądź wyższej. Celem takiego zabiegu jest modulacja napięcia odpowiednio do potrzeb naszego układu [2,3].

Część układu obniżająca wytwarza napięcie wyjściowe w zakresie od 0 V do wartości bliskiej, ale niższej niż napięcie wejściowe z powodu zaistniałych strat i spadków napięcia na elementach pasywnych. Natomiast część podwyższająca z tych samych powodów niedoskonałości komponentów zapewnia zasięg napięcia od wartości poniżej napięcia wejścia aż do wielkości znacznie wyższych. Oczywiście jest to w pewnym momencie obarczone problemami i ograniczeniami, na których skupię się w dalszej części pracy opisującej wirtualne odwzorowanie badanego urządzenia [1–3].

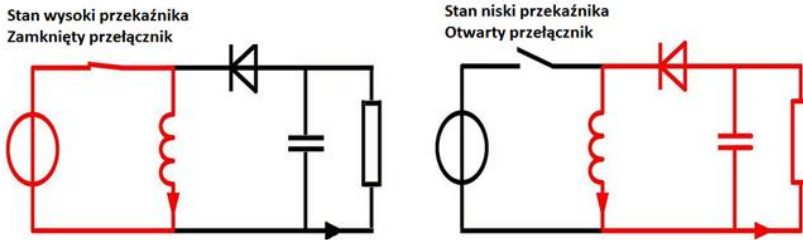


Rys. 1. Przetwornica typu step-up/step-down z widocznymi elementami pasywnymi [5]

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, maciej.tor@pollub.edu.pl

## IDEA DZIAŁANIA PRZETWORNICY



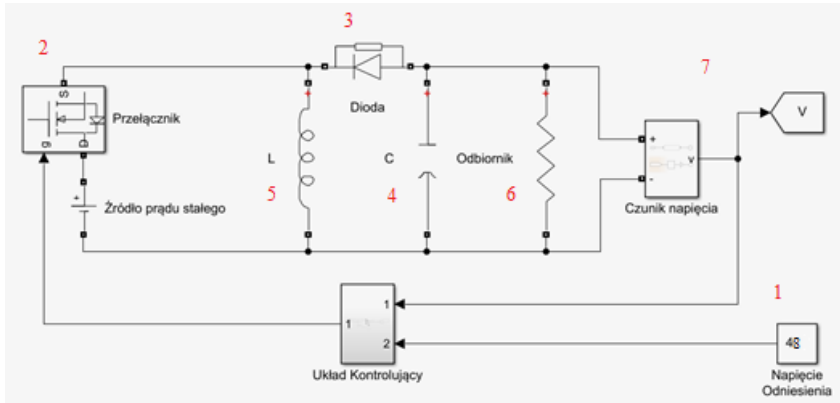
Rys. 2. Schemat ideologiczny działania przetwornicy buck-boost w dwóch stanach pracy  
a) stan ładowania prądem cewki w jej polu magnetycznym b) stan rozładowania cewki odbiornika. Poszczególne elementy opisane są lepiej w późniejszych screenach z modelu MatLAB

Najważniejszą zaletą połączenia dwóch rodzajów przetwornic jest układ samoregulujący, dzięki któremu – przy pewnym zadanym napięciu odniesienia – układ może utrzymywać ciągle tę samą wartość napięcia wyjściowego. Jednym z głównych typów urządzeń wykorzystujących tę zależność są układy zasilane z baterii i akumulatorów. Nowe ogniwa elektryczne posiadają zazwyczaj wyższe napięcie niż znamionowe, natomiast w trakcie zużywania źródła zasilania, napięcie na ich biegunach maleje do wartości niższej niż nominalna. Regulacja w przetwornicy odpowiednio zareaguje na różnicę napięcia wejściowego do odniesienia [4,00206].

Uwzględniając prawo Ohma, warto pamiętać przy tym, że przy stałej możliwej mocy zasilania, zmniejszając bądź zwiększając napięcie wyjściowe przetwornicy, adekwatnie zwiększa lub zmniejsza się możliwy maksymalny pobór natężenia wyjściowego. Dlatego wykorzystując zasilacz o zbyt słabej mocy względem potrzeb prądowych układu, można go spalić już na przykład przy zwykłej żarówce 230 V. By temu przeciwdziałać, należy przeprowadzić obliczenia sumujące wymagane natężenie przy oczekiwanym napięciu wyjściowym [1].

## SCHEMAT W PROGRAMIE MATLAB

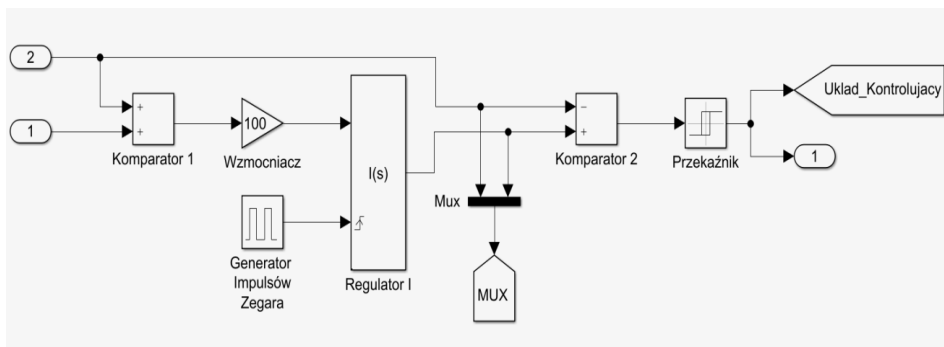
Używając podstawowych elementów biblioteki MatLAB, skonstruowano wirtualny odpowiednik schematu ideologicznego. Warto zwrócić uwagę na zamianę przełącznika na tranzystor MOSFET ze względu na jego szybką przełączalność, nadzorowaną przez układ kontrolujący. Układ ten natomiast porównuje przez sprzężenie zwrotne napięcie wyjściowe z nieregulowanym napięciem odniesienia.



Rys. 3. Schemat układu głównego przetwornicy buck-boost DC

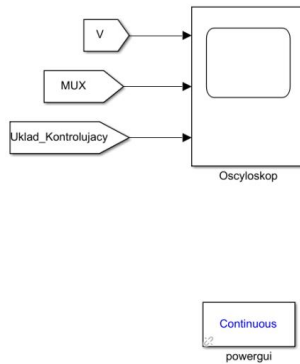
Tab. 1. Opis komponentów układu głównego

Element	Wartość znamionowa	Uwagi
Zasilacz (1)	48 V <sub>DC</sub>	Napięcie wejściowe
MOSFET (2)	10 kHz	Realizacja zmiany między stanami pracy układu
Dioda Schottkiego (3)	0,3 V <sub>F</sub>	Ukierunkowywanie przepływu prądu, szybka przełączalność
Kondensator (4)	40 mF	Podtrzymanie stałego napięcia na wyjściu źródła zasilania podczas pierwszego stanu pracy
Cewka (5)	10 μH	Ładowanie pola magnetycznego, źródło zasilania podczas drugiego stanu pracy
Obwód odbiorczy (rezystancyjny) (6)	100 Ω	Odbiornik, na potrzeby badania dobrano rezystor
Woltomierz i oscyloskop (7)	---	Pomiar, prezentacja i kontrola napięcia wyjściowego



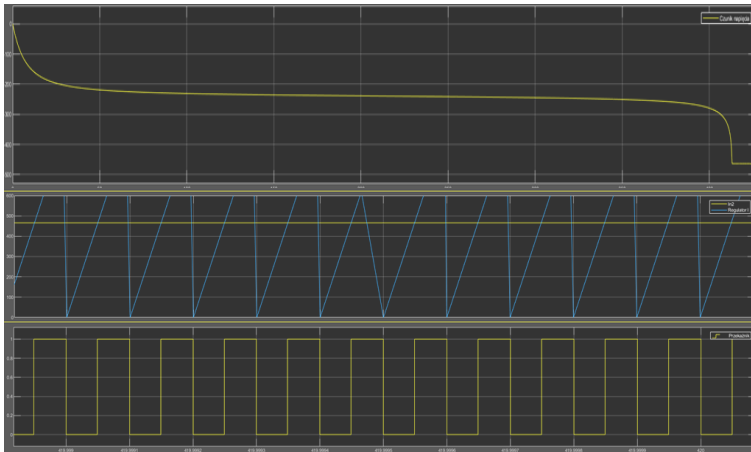
Rys. 4. Schemat układu kontrolującego przetwornicę buck-boost DC

Układ ten porównuje napięcie wyjściowe (in 1) do napięcia odniesienia (in 2), wzmacnia sygnał i podaje na regulator całkujący z sygnałem z generatora impulsów zegara (impulsy te mają bardzo dużą częstotliwość rzędu 10 kHz). Następnie sygnał z regulatora ponownie jest porównywany z napięciem odniesienia, by na koniec podać informację przekaźnikowi odnośnie zmiany stanu, bądź pozostawieniu aktualnego położenia przekaźnika w miejscu. Przekaznik steruje bramką tranzystora MOSFET, który powoduje zmianę stanu pracy. Możliwa operacja przez użytkownika jedynie blokiem „napięcie odniesienia”. Zazwyczaj w układzie scalonym jest to mała śrubka od potencjometru.

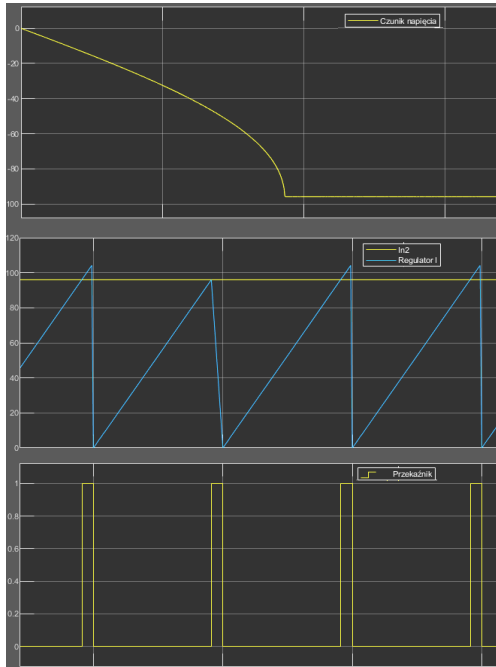


Rys. 5. Schemat oscyloskopu z wybranymi wartościami mierzonymi

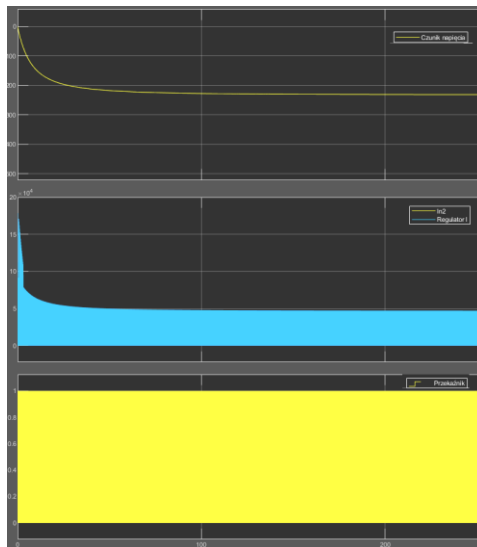
## PODWYŻSZANIE NAPIĘCIA W PRZETWORNICY – OSCYLOSKOP



Rys. 6. Wykres max. napięcia podwyższonego (466 V) na odbiorniku z podziałką 50 s oraz napięcia na regulatorze z napięciem odniesienia i stan przekaźnika w czasie z podziałką 0,0001 s

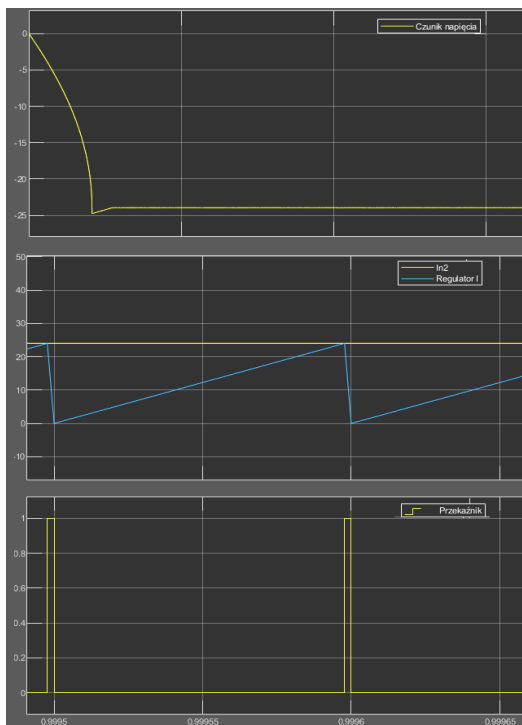


Rys. 7. Wykres podwojonego napięcia na odbiorniku (96 V) z podziałką 1 s oraz napięcia na regulatorze z napięciem odniesienia i stan przełącznika w czasie z podziałką 0,0001 s

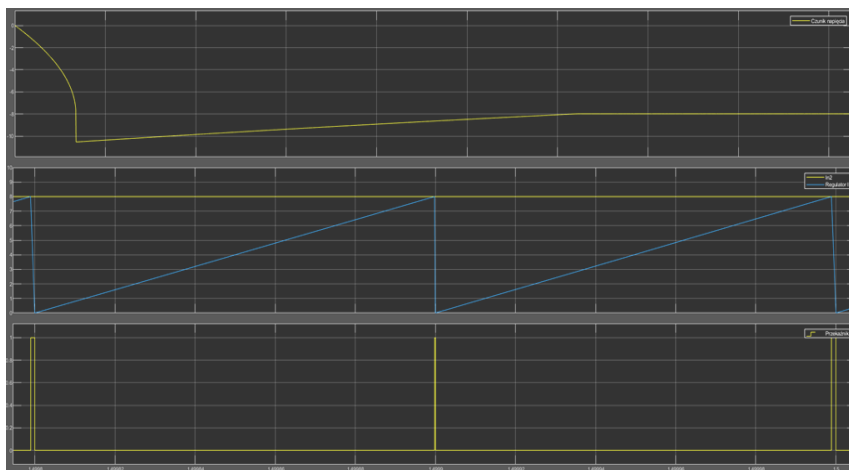


Rys. 8. Powyżej maksymalnego napięcia podwyższającego (467 V), Napięcie odniesienia ustala się na znacznie mniejszej wartości, około 230 V – oznaka niepoprawnego działania układu; zaniechanie dalszego badania przebiegów

## OBNIŻANIE NAPIĘCIA W PRZETWORNICY – OSCYLOSKOP

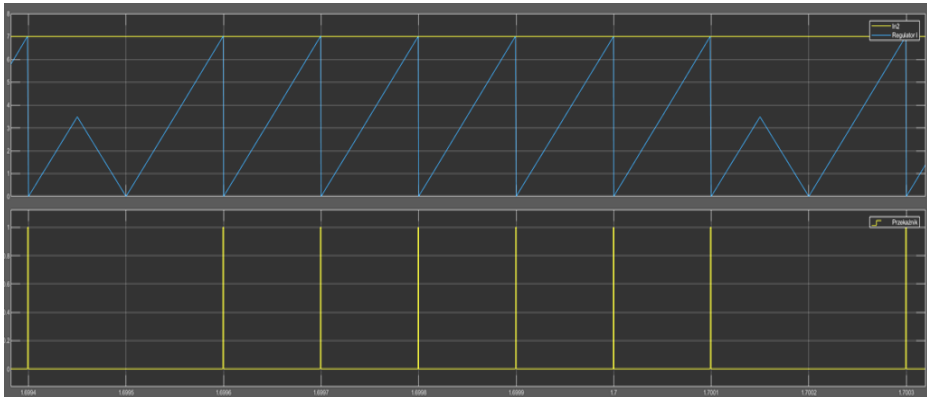


Rys. 9. Wykres podwójnie zmniejszonego napięcia na odbiorniku (24 V) z podziałką 1 s oraz napięcia na regulatorze z napięciem odniesienia i stan przełącznika w czasie z podziałką 0,00005 s



Rys. 10. Wykres minimalnego napięcia obniżającego odbiorniku (8 V) z podziałką 0,2 s oraz napięcia na regulatorze z napięciem odniesienia i stan przełącznika w czasie z podziałką 0,0002 s





Rys. 11. Wykres poniżej minimalnego napięcia na odbiorniku (7 V; pojawiają się niekontrolowane i samoczynne zmiany Regulatora I niezależne od sygnału z przełącznika)

## WYNIKI I PODSUMOWANIE

Wraz ze wzrostem oczekiwanego napięcia odniesienia, układ potrzebuje więcej czasu, by się ustabilizować. Analogicznie, przy próbie obniżania napięcia, im mniejsze napięcie oczekiwane na wyjściu, tym szybciej układ się nasycy i działa poprawnie. Należy pamiętać o tej zależności, ponieważ są urządzenia, dla których zbyt niskie napięcie zasilające może spowodować uszkodzenie. Powyżej maksymalnego napięcia podniesienia wystąpiło zjawisko przesylenia regulatora I. Szerokość impulsów na generatorze zegara ustawiłem na 50%, dlatego przy przekroczeniu pewnej wartości napięcia odniesienia, układ rozregulowuje się, a napięcie na odbiorniku ustala się na o wiele niższej wartości. To samo tyczy się najmniejszej wartości. W przypadku przekroczenia progu minimum, pojawiają się co kilka pulsów nieoczekiwane zmiany sygnału na tym regulatorze całkującym.

W przedziale min.–max. wykres ukazuje zależność włączonego przełącznika, od zachowania się regulatora całkującego. Jest to potwierdzenie działania przełącznika z tranzystora MOSFET i tym samym ideologii działania przetwornicy.

Program Matlab jest wymagający w kwestii mocy obliczeniowej, dlatego warto prowadzić analizy modeli na odpowiednio mocnym sprzęcie. W przypadku używania programu dłużej niż godzinę, byłem zmuszony wyłączać program menagerem zadań z powodu zapchania pamięci RAM komputera.

Ujemne wartości napięć wyjściowych na oscyloskopie są wynikiem niedopatrzania z mojej strony. Z powodu problemów technicznych nie mogłem ponowić obliczeń już z właściwym podłączeniem wyjść na oscyloskopie.

## LITERATURA

- [1] Pałczyński B., Stefański W., *Półprzewodnikowe układy i urządzenia techniki impulsowej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1973
- [2] P. Basso C., *Switch-Mode Power Supply SPICE Cookbook*, McGraw-Hill Professional; 1st edition, New York, 2001
- [3] Kaczmarek J., Mazurek A., *Nowa idea sterowania przetwornicami DC/DC*, VI Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówek, 2007
- [4] *Wide VIN and High-Power Challenges with Buck-Boost Converters*, <https://www.powerselectronics.com/technologies/dc-dc-converters/article/21862686/wide-vin-and-highpower-challenges-with-buckboost-converters>, zasoby z dnia 22.06.2015
- [5] *Designing an Arduino-based Buck-boost Converter With Feedback*, <https://maker.pro/arduino/tutorial/designing-an-arduino-based-buck-boost-converter-with-feedback>, zasoby z dnia 20.02.2020
- [6] *Buck-Boost Converters*, <https://learnabout-electronics.org/PSU/psu33.php>, zasoby z dnia 29.12.2020.

## **MODEL STEROWNIKA INFRASTRUKTURY BRAMY WJAZDOWEJ, WYKORZYSTUJĄCY PLATFORMĘ ARDUINO**

### **WSTĘP**

W dzisiejszych czasach proces automatyzacji jest spotykany na co dzień i nie ogranicza się już tylko i wyłącznie do przemysłu, jak miało to miejsce kilkanaście lat temu. Ze względu na wysokie koszty zakupu, dostępność oraz skomplikowany proces obsługi urządzeń automatycznych ekonomicznie uzasadnione było stosowanie automatyki tylko w przemyśle. Aktualnie jest one coraz częściej wykorzystywana w gospodarstwach domowych do ułatwiania wykonywania codziennych czynności. Początkowo automatyzacja wykorzystywana w codziennym życiu dotyczyła tylko i wyłącznie sterowania bramą wjazdową. Z biegiem czasu była coraz częściej wykorzystywana do sterowania domem i w ten sposób powstały inteligentne budynki. Są one wyposażone w szereg czujników oraz detektorów, które są podłączone do jednego zintegrowanego systemu zarządzania budynkiem, jaki steruje wszystkimi instalacjami znajdującymi się w nim. W kolejnym etapie rozwoju automatyzacji, oprócz paneli sterujących zamontowanych w budynkach, ze względu na rozpowszechnienie urządzeń mobilnych oraz ich możliwości, sterowanie odbywa się również za pomocą urządzeń mobilnych z dedykowanymi aplikacjami dostarczonymi przez producentów. W domach mieszkalnych automatykę stosuje się między innymi do sterowania oświetleniem, bramą wjazdową, ogrzewaniem bądź klimatyzacją, roletami, załączaniem gniazd zasilających o odpowiednich porach, sterowaniem systemem audio, monitoringiem, instalacją alarmową, utrzymaniem odpowiedniej wilgotności gleby w ogrodzie i tym podobnych. Coraz powszechniejsze wykorzystanie automatyki w gospodarstwach domowych jest zasługą dużej dostępności oraz niskiej ceny komponentów używanych do zrealizowania danego rozwiązania oraz chęci poprawienia komfortu życia.

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, dominik.struzek@pollub.edu.pl

Celem pracy jest zaprojektowanie i wykonanie modelu sterownika infrastruktury bramy wjazdowej, który będzie wykorzystywał platformę Arduino. Sterownik ma za zadanie zrealizować takie funkcje jak sterowanie bramą wjazdową za pomocą fizycznych przycisków, pilota radiowego, pilota zdalnego sterowania wykorzystującego podczerwień oraz urządzenia mobilnego z systemem Android wyposażonego w moduł komunikacji bezprzewodowej bluetooth. Dodatkowo sterownik będzie obsługiwał czujnik parkowania zamontowany na ścianie modelu, dzięki któremu, w odniesieniu do rzeczywistości, samochód będzie mógł podjechać bardzo blisko ściany.

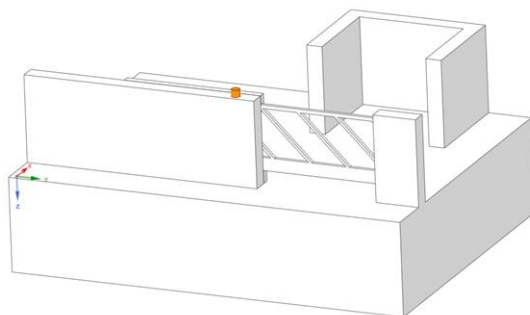
## WYMAGANIA

Wymagania, jakie musi spełniać model:

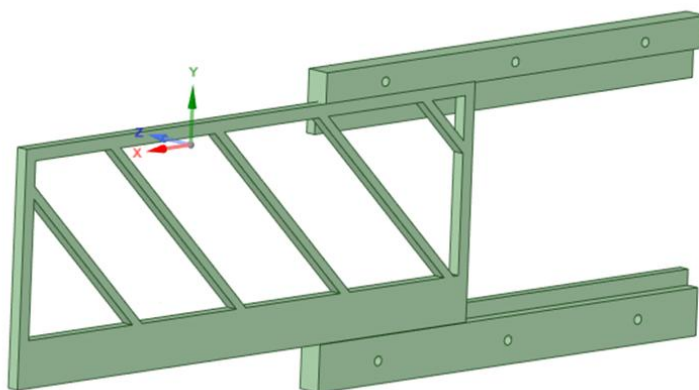
- sterowanie bramą za pomocą przycisków fizycznych
- sterowanie bramą za pomocą pilota radiowego
- sterowanie bramą za pomocą pilota zdalnego sterowania wykorzystującego podczerwień
- sterowanie bramą urządzeniem mobilnym z systemem Android
- sygnalizacja świetlna podczas pracy bramy
- zatrzymanie ruchu bramy w momencie pojawienia się obiektu w świetle bramy
- czujnik parkowania z sygnalizacją świetlną.

## PROJEKT MODELU

Projekt modelu (Rys. 1) zakłada wykonanie elementów podstawy garażu oraz ogrodzenia za pomocą białej płyty MDF o grubości 18 mm. Model bramy z prowadnicami (Rys. 2) zaprojektowano i wydrukowano na drukarce 3D.



Rys. 1. Model 3D konstrukcji



Rys. 2. Model 3D bramy oraz prowadnic (źródło: opracowanie własne)

## PROGRAM NA PLATFORMĘ ARDUINO

Aby możliwe było osiągnięcie założonych celów napisano kod programu, który po wgraniu do Arduino UNO będzie sterował pracą całego układu. W pierwszym etapie zdefiniowano stałe oraz została załączona biblioteka obsługująca odbiornik podczerwieni, co zostało pokazane na rysunku 3. W następnym kroku napisano kod programu w funkcji „void setup ()” w celu ustawienia trybu pracy poszczególnych pinów mikrokontrolera oraz przypisania początkowych stanów logicznych. Kod programu przedstawiony na rysunku 3 zostanie wykonany tylko raz podczas uruchomienia programu. W kolejnym etapie utworzono kod, który zawarty jest w funkcji „void loop ()”. Zawartość tej funkcji będzie wykonywana w pętli aż do momentu wyłączenia programu. Na rysunku 4 przedstawiono fragment kodu programu odpowiadający za sterowanie bramą za pomocą aplikacji mobilnej połączonej za pomocą bluetooth ze sterownikiem. Komunikacja odbywa się za pomocą portu szeregowego z wykorzystaniem protokołu UART.

```
Sterownik_bramy$
```

```
#include <IRremote.h> // dołączenie biblioteki do odbiornika IR
#define irPin 2 // Zdefiniowanie pinu 2 jako odbiornik IR
#define zielonyled 3 // Zdefiniowanie pinu 3 jako zielonej diody
#define czerwonyled 4 // Zdefiniowanie pinu 4 jako czerwonej diody
#define diodaostrzegawcza 5 // Zdefiniowanie pinu 5 jako diody ostrzegawczej
#define otwieranie 6 // Zdefiniowanie pinu 6 jako sygnału otwierania
#define zamykanie 7 // Zdefiniowanie pinu 7 jako sygnału zamykania
#define przyciskotwieranie 10 // Zdefiniowanie pinu 10 jako przycisku otwierania
#define przyciskzamykanie 11 // Zdefiniowanie pinu 11 jako przycisku zamykania
#define echoPin 12 // Zdefiniowanie pinu 12 jako echoPin
#define trigPin 13 // Zdefiniowanie pinu 13 jako trigPin
#define STOP 14 // Zdefiniowanie pinu 14 jako czujnik odbiciowy
#define czujnikotwarcia 15 // Zdefiniowanie pinu 15 jako czujnik otwarcia
#define czujnikzamkniecia 16 // Zdefiniowanie pinu 16 jako czujnik zamkniecia
#define pilototwieranie 17 // Zdefiniowanie pinu 17 jako przycisk otwierania z pilota
#define pilotzamykanie 18 // Zdefiniowanie pinu 18 jako przycisk zamykania z pilota
#define pilotstop 19 // Zdefiniowanie pinu 19 jako przycisk stop z pilota
IRrecv irrecv(irPin);
decode_results results;
String readString; // Nadanie typu zmiennej funkcji readString
```

Rys.3. Fragment kodu odpowiadającego za zdefiniowanie stałych oraz dołączenie biblioteki

```
Sterownik_bramy$
```

```
void setup() {
  pinMode(otwieranie, OUTPUT); // Ustawienie pinu otwieranie jako wyjście
  pinMode(zamykanie, OUTPUT); // Ustawienie pinu zamykanie jako wyjście
  pinMode(diodaostrzegawcza, OUTPUT); // Ustawienie pinu diodaostrzegawcza jako wyjście
  pinMode(STOP, INPUT_PULLUP); // Ustawienie pinu STOP jako wejście podciągające
  pinMode(przyciskotwieranie, INPUT_PULLUP); // Ustawienie pinu przyciskotwieranie jako wejście podciągające
  pinMode(przyciskzamykanie, INPUT_PULLUP); // Ustawienie pinu przyciskzamykanie jako wejście podciągające
  pinMode(trigPin, OUTPUT); // Ustawienie pinu trigPin jako wyjście
  pinMode(echoPin, INPUT); // Ustawienie pinu echoPin jako wejście
  pinMode(zielonyled, OUTPUT); // Ustawienie pinu zielonyled jako wyjście
  pinMode(czerwonyled, OUTPUT); // Ustawienie pinu czerwonyled jako wyjście
  pinMode(czujnikotwarcia, INPUT_PULLUP); // Ustawienie pinu czujnikotwarcia jako wejście podciągające
  pinMode(czujnikzamkniecia, INPUT_PULLUP); // Ustawienie pinu czujnikzamkniecia jako wejście podciągające
  pinMode(pilototwieranie, INPUT_PULLUP); // Ustawienie pinu pilototwieranie jako wejście podciągające
  pinMode(pilotzamykanie, INPUT_PULLUP); // Ustawienie pinu pilotzamykanie jako wejście podciągające
  pinMode(pilotstop, INPUT_PULLUP); // Ustawienie pinu pilotstop jako wejście podciągające
  pinMode(9, OUTPUT); // Ustawienie pinu 9 jako wyjście
  analogWrite(9, 130); // Wypełnienie sygnału PWM do sterowania obrotami silnika DC
  digitalWrite(diodaostrzegawcza, LOW); // Ustawienie stanu niskiego na pinie diodaostrzegawcza
  Serial.begin(9600); // Rozpoczęcie transmisji szeregowej z prędkością 9600
  irrecv.enableIRIn(); // Aktywacja odbierania sygnału z odbiornika IR
}
```

Rys. 4. Zawartość funkcji „void setup”

W momencie wykrycia przez program transmisji informacji o długości znaków większej od 0, odebrana informacja z urządzenia mobilnego jest zapisywana do zmiennej *c*. Następnym krokiem działania programu jest wykorzystanie warunku „if”, w którym – w zależności od zawartości zmiennej *c* – podejmowane są poszczególne działania w celu otwarcia, zamknięcia lub zatrzymania bramy poprzez ustawienie odpowiednich stanów logicznych na poszczególnych wyjściach mikroprocesora. Opóźnienie wynoszące 350 ms

zostało dodane do kodu programu w celu przemieszczenia się bramy nad czujnika otwarcia lub zamknięcia. W przypadku braku tego opóźnienia przycisk otwierania bądź zamykania musiałby być przytrzymany do momentu, w którym brama nie znajdowałaby się w polu działania czujnika magnetycznego. Dodatkowo, aby program nie odczytywał ponownie wysłanej informacji po wykonaniu warunku, na końcu zostało umieszczone wyczyszczenie zmiennej *c*. Sterowanie za pomocą przycisków fizycznych, pilota podczerwieni itd. zostało zrealizowane w analogiczny sposób [2].

```
Sterownik_bramy
void loop() {
while(Serial.available()) // Sterowanie za pomoca telefonu poprzez bluetooth
{
    delay(3);
    char c = Serial.read();
    readString += c;
}
if (readString.length() >0) {
    if (readString == "otwarcie")
    {
        digitalWrite(otwieranie,HIGH);
        digitalWrite(zamykanie,LOW);
        digitalWrite(diodaostrzegawcza,HIGH);
        if (digitalRead(czujnikzamkniecie)==LOW)
        {
            delay(350);
        }
    }
    if (readString == "zamkniecie")
    {
        digitalWrite(otwieranie,LOW);
        digitalWrite(zamykanie,HIGH);
        digitalWrite(diodaostrzegawcza,HIGH);
        if (digitalRead(czujnikotwarcia)==LOW)
        {
            delay(350);
        }
    }
}
if (readString == "stop")
{
    digitalWrite(otwieranie,LOW);
    digitalWrite(zamykanie,LOW);
    digitalWrite(diodaostrzegawcza,LOW);
}
readString = "";
}
```

Rys. 5. Kod programu odpowiadający za sterowanie za pomocą aplikacji mobilnej

Ostatnią część kodu przedstawiono na rysunku 6. Odpowiada on za działanie czujnika parkowania wykorzystującego czujnik ultradźwiękowy. W poniższym kodzie wykorzystano funkcję „Chile”, która wprowadza program w pętlę i pozostaje w niej do momentu niespełnienia warunku. Czujnik parkowania działa w momencie spełnienia pięciu warunków. Pierwszym z nich jest to, że brama jest w pełni otwarta, natomiast kolejne, pozwalające na wyjście z pętli „while” i dalsze sterowanie bramą, to wciśnięcie przycisku odpowiadającego za otwarcie bramy na jednym z dostępnych kontrolerów lub w aplikacji mobilnej. Działanie czujnika parkowania jest sygnalizowane działaniem zielonej diody. W momencie pojawienia się obiektu w odległości mniejszej niż 6 cm od czujnika, zielona dioda jest wyłączana i zapala się czerwona. Po wyjściu programu z powyższej pętli następuje wyłączenie zarówno czerwonej jak i zielonej diody. W związku z tym, że jest to model laboratoryjny, odległość zadziałania została ustawiona na 6 cm. W rzeczywistych warunkach, zarówno odległość minimalna jak i maksymalna jaka zostanie ustawiona jest ograniczona tylko i wyłącznie ze specyfikacji użytego czujnika ultradźwiękowego i może być dostosowywana do potrzeb indywidualnych [4].

```

while (digitalRead(czujnikotwarcia)==LOW && digitalRead(przyciskzamykanie)==HIGH && digitalRead(pilotzamykanie)==LOW
&& readString != "zamkniecie" && (results.value)!=0x9716BE3F )
{
    long czas; // Zdefiniowanie zmiennej "czas"
long dystans; // Zdefiniowanie zmiennej "dystans"
digitalWrite(trigPin, LOW); // Sygnał niski na czujnik ultradźwiękowy przez 2 mikrosekundy
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(trigPin, HIGH); // Sygnał wysoki na czujnik ultradźwiękowy przez 10 mikrosekund
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trigPin, LOW); // Sygnał niski na czujnik ultradźwiękowy (zakończenie pomiaru)

czas = pulseIn(echoPin, HIGH); // Pobranie wyniku pomiaru odległości do zmiennej czas
dystans = czas / 58; // Ustawienie zmiennej dystans tak aby pomiar był w cm
if (dystans < 6 ) // Ustalenie warunku jezeli dystans jest mniejszy od 6 zapala czerwona
// diodę i wyłącza zielona, jeśli nie to postępowanie odwrotne
{
    digitalWrite(czerwonyled, HIGH); // Włączenie czerwonej diody
delay(10); // Opóźnienie 10 milisekund
digitalWrite(zielonyled, LOW); // Wyłączenie zielonej diody
}
else // Jeżeli warunek nie spełniony to wykonaj:
{
    digitalWrite(czerwonyled, LOW); // Wyłączenie czerwonej diody
delay(10); // Opóźnienie 10 milisekund
digitalWrite(zielonyled, HIGH); // Włączenie zielonej diody
}
}
digitalWrite(czerwonyled, LOW);
digitalWrite(zielonyled, LOW);
}

```

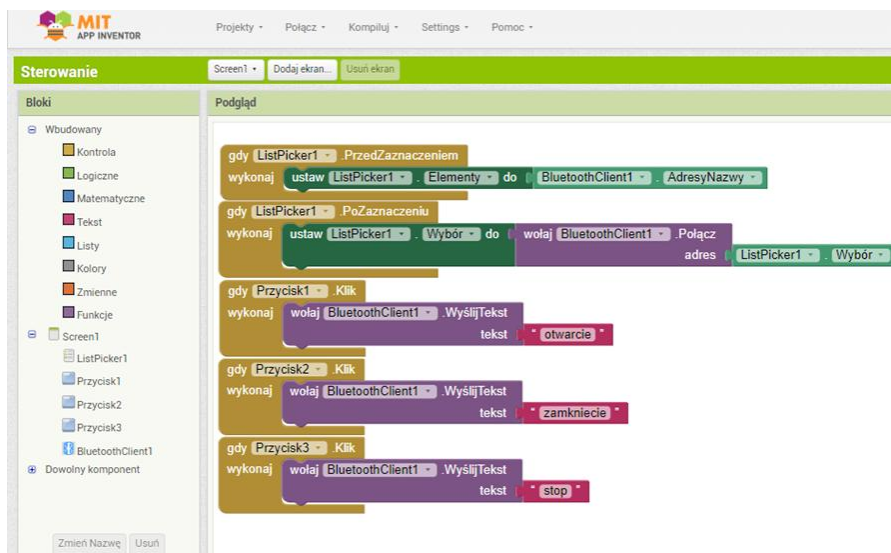
Rys. 6. Kod programu odpowiadający za działanie czujnika parkowania



## APLIKACJA MOBILNA

W celu sterowania za pomocą bluetooth została opracowana aplikacja mobilna na urządzenia z system operacyjnym Android. Aplikacja została stworzona za pomocą środowiska MIT App Inventor 2. Jej tworzenie rozpoczęło od umieszczenia listy wyboru oraz przycisków poprzez przeciągnięcie na ekran projektu z palety interfejs użytkownika. Następnie został dodany komponent klienta bluetooth z palety łączności. W następnym etapie zostały nadane nazwy poszczególnym przyciskom, wygląd oraz tło aplikacji w oknie właściwości.

W kolejnym etapie tworzenia aplikacji został stworzony kod blokowy działania. Budowanie kodu opiera się na wyborze bloków dostępnym w programie odpowiadającym poszczególnym funkcjom. Pierwszy stworzony blok odpowiada za dodanie do listy wyboru „połącz” nazwy dostępnych urządzeń bluetooth. Drugi blok zostaje aktywowany po wciśnięciu listy wyboru nazwanej „połącz” i wykonuje nawiązanie połączenia z wybranym urządzeniem bluetooth z listy. Trzeci blok odpowiada za wysłanie komunikatu przez bluetooth „otwarcie” po wciśnięciu przycisku 1. Kolejny blok analogicznie do poprzedniego wysyła komunikat „zamknięcie” po wciśnięciu przycisku 2. Ostatni blok aplikacji odpowiada za wysyłanie komunikatu „stop” po wciśnięciu przycisku 3. Na rysunku 7 przedstawiono kod blokowy aplikacji, natomiast na rysunku 8 ukazany jest finalny wygląd aplikacji na urządzeniu [3].



Rys. 7. Kod blokowy aplikacji mobilnej



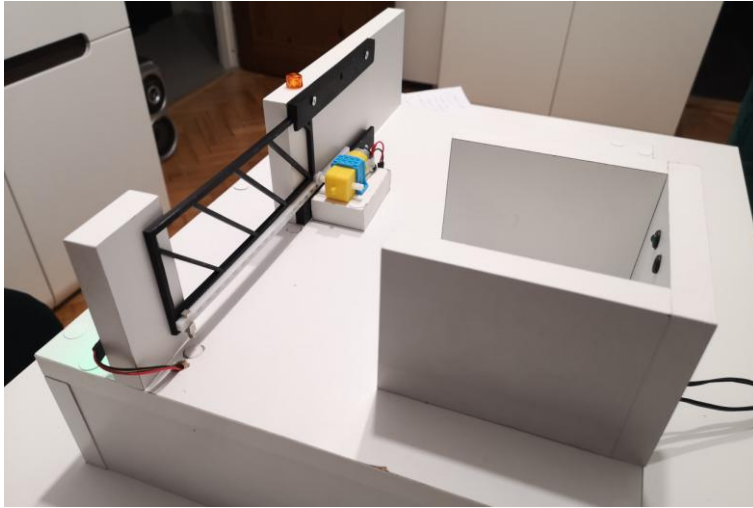
Rys. 8. Finalny wygląd aplikacji mobilnej

## BUDOWA MODELU

Pierwszym etapem realizacji budowy modelu laboratoryjnego było zaprojektowanie oraz wycięcie odpowiednich formatek z płyt HDF. Kolejnym etapem budowy był montaż czujników, diod, przycisków oraz reszty elementów elektronicznych wchodzących w skład sterownika.



Rys. 9. Widok modelu od przodu (źródło: opracowanie własne)



Rys. 10. Widok modelu z boku (źródło: opracowanie własne)

## POŁĄCZENIE ARDUINO Z SILNIKIEM PRĄDU STAŁEGO

Do napędu bramy został użyty Silnik DC zamontowany w napędzie z przekładnią 1:48 zasilany napięciem 6 V. Ze względu na to, że wyżej wymieniony silnik pracuje na napięciu 6 V, natomiast zasilanie Arduino wynosi 5 V, konieczne było dołączenie dodatkowego źródła zasilania. W związku z zastosowaniem zasilacza impulsowego 12 V, został zbudowany układ obniżający napięcie, składający się ze stabilizatora LM7806 oraz dwóch kondensatorów 220 nF. Prąd, jaki jest pobierany przez zastosowany silnik przy napięciu zasilającym 6 V, wynosi 350 mA, natomiast maksymalne obciążenie prądowe wyjścia Arduino uno wynosi 20 mA. W związku z tym, silnik został podłączony poprzez układ scalony L293D, który jest podwójnym mostkiem H. Wejście ENABLE zostało podłączone do pinu numer 9 w Arduino i jest nim podawany sygnał PWM, który odpowiada za prędkość obrotową silnika podłączonego do wyjścia OUTPUT 1 oraz OUTPUT 2. Wejścia INPUT 1 oraz INPUT 2 zostały podłączone do pinu 6 oraz 7. Sterują one kierunkiem obrotu silnika w lewo bądź prawo. Wyprowadzenie  $V_s$  służy do podłączenia napięcia, którym zostanie zasilony silnik, natomiast wyprowadzenie  $V_{ss}$  służy do zasilania części logicznej układu scalonego, które należy zasilić napięciem 6 V. W celu poprawnego działania wszystkie wyprowadzenia GND należy połączyć wraz z masą układów zasilających sterownik silnika [1].

## **POŁĄCZENIE ARDUINO Z CZUJNIKIEM ULTRADŹWIĘKOWYM**

Do realizacji funkcji czujnika parkowania został użyty czujnik ultradźwiękowy HC-SR04, zasilony napięciem 5 V bezpośrednio z Arduino. Wyjście Trig zostało podłączone do pinu 13, natomiast wejście Echo – do pinu 12 w Arduino.

## **REALIZACJA POŁĄCZENIA ARDUINO Z CZUJNIKAMI MAGNETYCZNYMI I CZUJNIKIEM ODBICIOWYM**

Do informowania o skrajnych położeniach bramy zostały zastosowane dwa czujniki magnetyczne, które zwierają obwód w momencie pojawienia się pola magnetycznego w polu działania czujnika. Zostały one podłączone pomiędzy masą układu a pin A1 oraz A2 w Arduino. Do zabezpieczenia przed kolizją bramy z innymi obiektami wykorzystano regulowany czujnik odbiciowy IR, który w momencie przecięcia wiązki podaje stan wysoki na wyjście sygnałowe. Został on podłączony do pinu A0 w Arduino.

## **REALIZACJA POŁĄCZENIA ARDUINO Z PRZYCISKAMI FIZYCZNYMI ORAZ DIODAMI SYGNALIZUJĄCYMI**

Fizyczne przyciski sterujące, zostały podłączone pomiędzy masę układu a pin 10 oraz pin 11 w Arduino. Diody sygnalizacyjne zostały podłączone poprzez rezystor 220  $\Omega$  w celu ograniczenia napięcia zasilającego każdej z diod. Dioda ostrzegawcza została podłączona do pinu 5 w Arduino, dioda zielona oraz czerwona została podłączona kolejno do pinu 3 oraz 4 w Arduino.

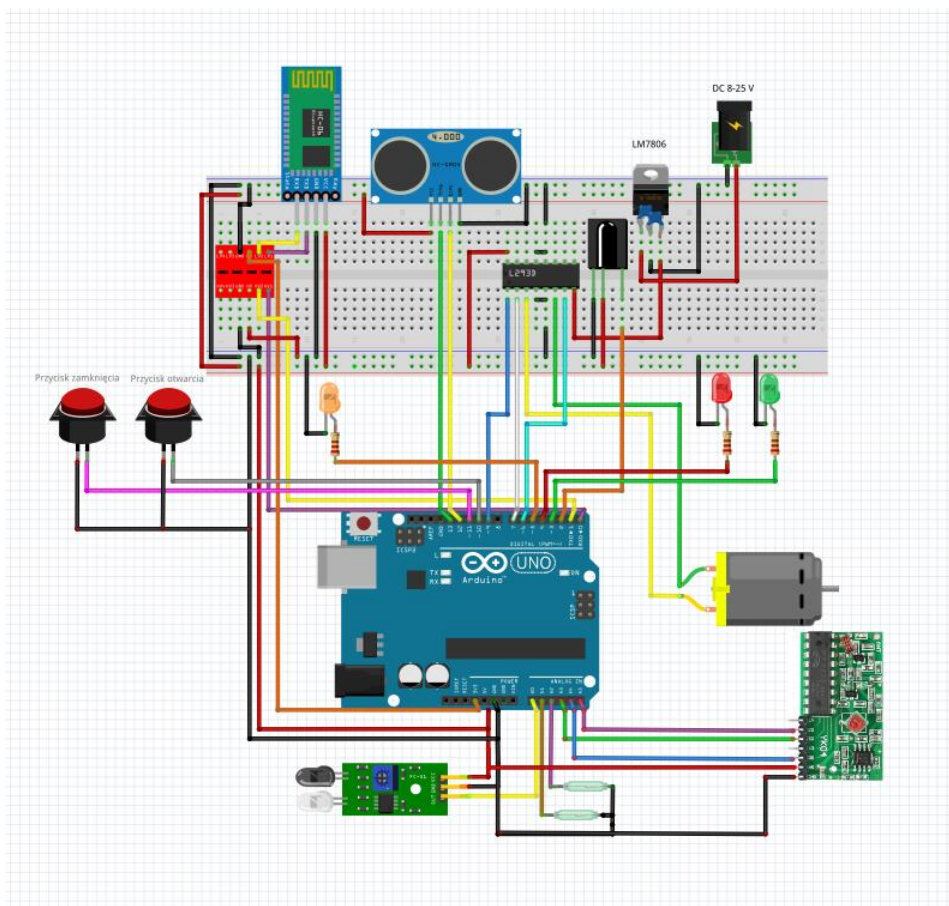
## **REALIZACJA POŁĄCZENIA ARDUINO Z MODULEM RADIOWYM**

Moduł radiowy wykorzystany w modelu pracuje na częstotliwości 315 MHz. Moduł wyposażony jest w 4 wyjścia sygnałowe, na których pojawia się stan wysoki w momencie wciśnięcia przycisku na pilocie. Wyjścia D2, D0 oraz D3 zostały kolejno podłączone do pinu A3 odpowiadającego za otwarcie, A4 odpowiadającego za zamknięcie oraz A5 odpowiadającego za zatrzymanie bramy w bieżącej pozycji.

## REALIZACJA POŁĄCZENIA ARDUINO Z MODULEM BLUETOOTH

Do komunikacji pomiędzy aplikacją mobilną a Arduino został zastosowany moduł bluetooth HC-06. W związku z tym, że jest to moduł uniwersalny dla różnych platform wymagane było zastosowanie konwertera poziomów logicznych z 5 V na 3,3 V, ponieważ podanie sygnału do modułu o poziomie napięcia 5 V mogłoby skutkować jego uszkodzeniem. Wyjście sygnałowe modułu RX zostało podłączone do pinu TX w Arduino natomiast wyjście sygnałowe modułu TX zostało podłączone do pinu RX w Arduino.

### SCHEMAT OGÓLNY POŁĄCZEŃ



Rys. 11. Schemat ogólny połączeń

## PODSUMOWANIE

Zbudowany model spełnia wszystkie założone wymagania, w tym sterowanie za pomocą aplikacji mobilnej. Podczas wykonywania modelu nie obyło się bez komplikacji, które były spowodowane początkowym wyborem silnika krokowego jako napędu bramy. Założone wymagania nie pozwalały w sposób efektywny sterować bramą wjazdową. Dodawanie dodatkowych funkcji do kodu programu spowodowało wydłużenie kodu i ze względu na specyfikę sterowania silnika krokowego powstawały przerwy pomiędzy poszczególnymi fazami sterowania ruchem silnika, co skutkowało widocznymi przerwami, a czasami nawet zatrzymaniem pracy silnika podczas obrotu. Ostatecznie został użyty silnik prądu stałego, co pozwoliło na rozwiązanie wszystkich problemów. Sterownik został zaprogramowany tak, aby obsługiwał szereg czujników zapewniających bezpieczeństwo i komfort użytkownika. W przyszłości istnieje możliwość rozbudowy funkcjonalności sterownika, chociażby o takie funkcje jak: sterowanie innymi elementami infrastruktury domowej, na przykład automatycznym zapaleniem światła w zależności od pory dnia oraz natężenia światła, jakie panuje na zewnątrz, sterowanie roletami, jako centrala alarmowa wykorzystując już zastosowane czujniki do monitorowania otwarcia bramy oraz – po zastosowaniu dodatkowych czujników – możliwość wykrywania obecności lub otwarcia drzwi i okien.

## LITERATURA

- [1] Hoffman J., *Zostań mistrzem Arduino. Projekty dla początkujących i zaawansowanych*, Helion, Gliwice 2019
- [2] Monk S., *Elektronika z wykorzystaniem Arduino i Raspberry Pi. Receptury*, Helion, Gliwice 2018
- [3] Strużek D., *Model laboratoryjny wykorzystujący platformę Arduino do sterowania infrastrukturą bramy wjazdowej*, Praca dyplomowa, Politechnika Lubelska, 2020
- [4] Wolber D. Abelson H. Sptus E., *App Inventor 2. Create Your Own Android Apps*. 2nd Edition, O'Reilly Media, 2014.

## WYKORZYSTANIE PLATFORMY ARDUINO DO ZARZĄDZANIA INSTALACJĄ BUDYNKOWĄ

### WSTĘP

W obecnym wieku, w erze technologii na co dzień spotykana jest automatyzacja. Automatyzacja (od gr. *automatos*, czyli samoczynny) jest to proces polegający na odciążeniu bądź całkowitemu ograniczeniu ludzkiej pracy fizycznej jak również umysłowej przy użyciu maszyn i urządzeń, które wykonują powtarzające się czynności w sposób automatyczny [1]. Proces ten coraz częściej jest wprowadzany do budynków użyteczności publicznej, hal przemysłowych czy nawet do mieszkań i domów prywatnych. Stosowane są ułatwienia dotyczące automatycznego sterowania temperaturą w zależności od pory dnia, oświetleniem w zależności od natężenia światła dziennego czy na przykład zasilaniem urządzeń elektronicznych względem potrzeb użytkownika. Wszystkie te funkcjonalności można uzyskać za pomocą platformy Arduino, czyli zestawu specjalnego środowiska programistycznego oraz mikrokontrolera [2]. Niniejszy artykuł traktuje o zarządzaniu instalacją elektryczną poprzez platformę Arduino w budynku mieszkalnym.

### PLATFORMA ARDUINO

Arduino to platforma elektroniczna typu *open source* co znaczy, że posiada oprogramowanie z kodem źródłowym, które każdy może sprawdzić, modyfikować i ulepszać [3]. Łatwość obsługi sprzętu i oprogramowania była ideą leżącą u podstaw powstania Arduino. Miało to na celu ułatwić naukę automatycznego sterowania urządzeniami elektrycznymi uczniom szkół średnich i studentom [4]. Płytkę (Rys. 1) wyposażoną jest w programowalny procesor z wbudowanym bootloaderem, oraz szereg portów wejściowych/wyjściowych. Na płytce znajdują się również diody sygnalizujące stan pracy urządzenia [5].

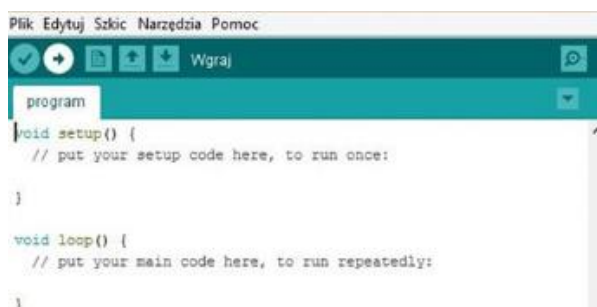
---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, jan.sierpinski@pollub.edu.pl



Rys. 1. Płytko Arduino Uno [6]

Środowiskiem umożliwiającym programowanie płytki Arduino jest darmowy program Arduino IDE (Rys. 2). Posiada ono wiele wbudowanych bibliotek pozwalających na łatwe zarządzanie kontrolerem. Każdy program składa się z dwóch głównych funkcji: *setup* oraz *loop*. *Setup* jest wywoływana przy starcie programu i konfiguruje początkowe ustawienia portów cyfrowych. *Loop* jest pętlą nieskończoną obsługującą instrukcje dotyczące wcześniej zadeklarowanych użyc portów obsługujących zazwyczaj elementy elektroniczne [7].



Rys. 2. Okno środowiska Arduino IDE

## MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA KOMPONENTÓW ARDUINO W INSTALACJACH BUDYNKOWYCH

Arduino Uno posiada wiele kompatybilnych podzespołów elektronicznych wykorzystywanych do zarządzania budynkami. W celu sterowania instalacją budynkową wykorzystywane są takie moduły jak: kontroler Arduino – służący do sterowania elementami elektronicznymi, elementy elektroniczne np. czujniki, silniki, protokół komunikacyjny – Bluetooth lub WiFi, kontroler mobilny – służący do wysyłania sygnałów do kontrolera Arduino.



Rozwiązania w instalacjach budynkowych, w których istnieje możliwość zastosowania platformy Arduino:

- sterowanie natężeniem światła w pomieszczeniu: regulacja intensywności oświetlenia, regulacja rolet okiennych w zależności od pory dnia oraz natężenia światła słonecznego
- sterowanie temperaturą w pomieszczeniach
- sterowanie bramą garażową
- sterowanie oknami połączowymi.

W celu stworzenia wymienionych instalacji należy wykorzystać czujniki:

- Czujnik natężenia światła, służący do badania intensywności oświetlenia. Przykładowym czujnikiem kompatybilnym z Arduino jest analogowy czujnik TEMA6000, którego zdjęcie zostało przedstawione na rysunku 3



Rys. 3. Czujnik TEMA6000 [8]

- Czujnik temperatury, służący do badania wysokości temperatury w pomieszczeniu. Przykładowy cyfrowy czujnik temperatury przedstawiony został na rysunku 4



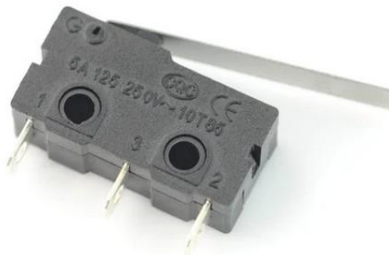
Rys. 4. Czujnik temperatury DS18B20 [9]

- Czujnik przerywania wiązki IR, służący do wykrycia przeszkody na danej linii. Przykładowy czujnik zamieszczony został na rysunku 5



Rys. 5. Czujnik przerwania wiązki IR [10]

- Czujnik krańcowy, służący do wykrycia maksymalnego wychylenia i zamknięcia bramy. Przykładowy czujnik przedstawia rysunek 6



Rys. 6. Czujnik krańcowy WK611 [11]

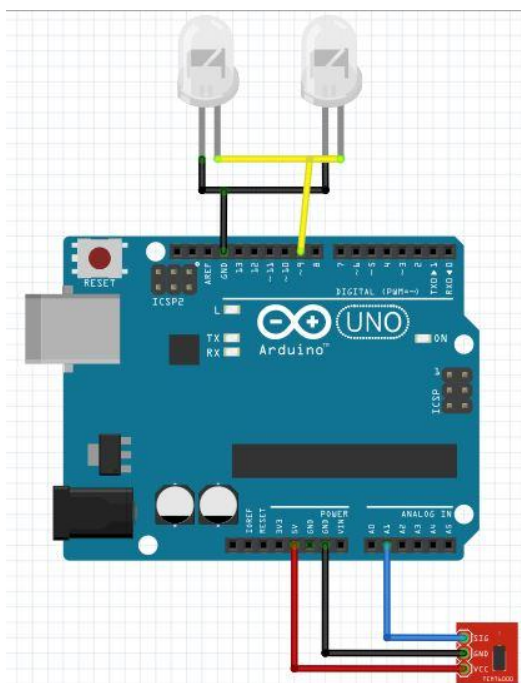
- Czujnik wilgotności, służący do wykrycia opadów atmosferycznych. Przykładowy element kompatybilny z platformą Arduino został przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Cyfrowy czujnik wilgotności i temperatury I2C-Adafruit 3251 [12]

## PRZYKŁADOWE WYKORZYSTANIE ARDUINO DO ZARZĄDZANIA OŚWIETLENIEM

Światłem można zarządzać na wiele sposobów. Jednym z nich jest automatyczne dostosowywanie się światła w pomieszczeniu, w zależności od światła dziennego. W przypadku zbyt niskiego natężenia światła dziennego, zapalane zostają lampy w pomieszczeniu. System oświetlenia dostosowuje moc świecenia tak, aby uzyskać wcześniej ustaloną wartość natężenia światła panującą w pomieszczeniu. Na rysunku 8 przedstawiony został schemat ideowy instalacji oświetleniowej z wykorzystaniem platformy Arduino.



Rys. 8. Schemat ideowy instalacji oświetleniowej z wykorzystaniem platformy Arduino

Poniżej przedstawiono program (rysunek 9) sterujący oświetleniem. Czujnik co 300 ms sprawdza poziom natężenia światła. W zależności od wartości zmierzonej czujnikiem natężenia światła, oświetlenie jest włączane z różną intensywnością.

```

void lightDiode(){

    sensorValue = analogRead(3);// odczytanie wartości z czujnika natężenia światła

    if (roznicaCzasuDiody >= 300) {
        zapamietanyCzasDiody = aktualnyCzasDiody;
        if(sensorValue < 20){
            analogWrite(diodPWM,120);
        }
        else if (sensorValue >= 21 && sensorValue < 50){
            analogWrite(diodPWM,90);
        }
        else if (sensorValue >= 51 && sensorValue < 89){
            analogWrite(diodPWM,60);
        }
        else if (sensorValue >= 90 && sensorValue < 119){
            analogWrite(diodPWM,30);
        }
        else if (sensorValue >= 120){
            analogWrite(diodPWM,0);
        }
    }
}
}

```

*Rys. 9. Funkcja sterująca oświetleniem pomieszczenia*

## PODSUMOWANIE

Arduino Uno jest kontrolerem, który posiada wiele dedykowanych komponentów i dlatego daje szerokie możliwości w użytkowaniu. Dzięki wykorzystaniu dedykowanego IDE można łatwo kontrolować sterownik, nawet nie posiadając szerokiej wiedzy programistycznej. Istnieje duża ilość artykułów oraz poradników dotyczących użytkowania platformy. W Internecie jest możliwość znalezienia dedykowanych for społecznościowych oraz grup, dzięki czemu w szybki sposób można rozwiązać napotkany problem.

Przy zastosowaniu Arduino w instalacji budynkowej należy pamiętać jednak o tym, że nie jest to urządzenie specjalistyczne spełniające pewne normy bezpieczeństwa. Urządzenia tego można używać jedynie na własny użytek pamiętając o niebezpieczeństwie i konsekwencjach związanych z ewentualną awarią spowodowaną np. przegrzaniem urządzenia.

## LITERATURA

- [1] *PokaYoke okiem automatyka*, <https://iautomatyka.pl/pokayoke-okiem-automatyka-recenzja-pick-to-light-od-weidmuller/>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [2] *What is Arduino?* <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>, zasoby z dnia 06.01.2021

- [3] *What is open source?*, <https://opensource.com/resources/what-open-source>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [4] *Empower scientists and artists of the future*, <https://www.arduino.cc/education>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [5] *X2 Introduction to the Arduino Board*, <https://www.arduino.cc/en/reference/board>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [6] *Arduino Uno Rev3*, <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [7] *Language Reference*, <https://www.arduino.cc/reference/en>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [8] *Czujnik TEMT6000*, <https://botland.com.pl/czujniki-swiatla-i-koloru/2260-temt6000-analogowy-czujnik-natezenia-swiatla-otoczenia-modul-sparkfun-bob-08688.html>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [9] *Czujnik temperatury DS18B20*, <https://botland.com.pl/cyfrowe-czujniki-temperatury/165-czujnik-temperatury-ds18b20-cyfrowy-1-wire-tht.html>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [10] *Czujnik przerwania wiązki IR*, <https://botland.com.pl/czujniki-ruchu/3079-czujnik-przerwania-wiazki-ir-led-3mm.html>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [11] *Wylacznik czujnik krańcowy mini z dźwignią – WK611*, <https://botland.com.pl/czujniki-krancowe/10824-wylacznik-czujnik-krancowy-mini-z-dzwignia-wk611.html>, zasoby z dnia 06.01.2021
- [12] *Cyfrowy czujnik wilgotności i temperatury I2C – Adafruit 3251*, <https://botland.com.pl/czujniki-multifunkcyjne/7681-si7021-cyfrowy-czujnik-wilgotnosci-i-temperatury-i2c-adafruit-3251.html>, zasoby z dnia 06.01.2021.

## **ANALIZA CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA MOC FARM FOTOWOLTAICZNYCH**

### **WSTĘP**

Z dnia na dzień coraz bardziej popularne stają się źródła energii odnawialnej. Ze względu na zasoby, które z biegiem czasu zaczną zanikać, np. węgiel, ludzie coraz częściej spoglądają właśnie w stronę wspomnianych źródeł. Jednym z nich jest energia słoneczna. Dzisiaj jest ona głównie używana do wytwarzania energii elektrycznej przy pomocy paneli fotowoltaicznych. Jest to opcja, która rozwija się z roku na rok, stającą się coraz bardziej popularna ze względu na duży wachlarz rozwoju, a także możliwość zaoszczędzenia środków finansowych. Innym plusem korzystania z fotowoltaiki jest popularny ostatnio aspekt ekologiczny. Owe konstrukcje są po prostu nieszkodliwe dla środowiska, a jednocześnie pozwalają na odciążenie elektrowni węglowych.

Panele w większej ilości tworzą farmy fotowoltaiczne. To konstrukcje zajmujące nawet kilka hektarów i mające moc od kilkudziesięciu kilowatów do kilku megawatów. Najczęściej budowane na dużych, wolnych obszarach. Taka instalacja, na podstawie promieniowania słonecznego padającego na panele, przekształca za pomocą falownika energię słoneczną w energię elektryczną. Następnie jest ona dostarczana bezpośrednio do domu lub do sieci elektrycznej [9,10].

Bardzo ważnym aspektem jest również cała geneza powstawania energii elektrycznej. To, jak dużą moc wygeneruje dany panel, zależy od wielu czynników, nawet najprostszych, takich jak dzień roku lub godzina.

### **ZAGADNIENIA TEORETYCZNE**

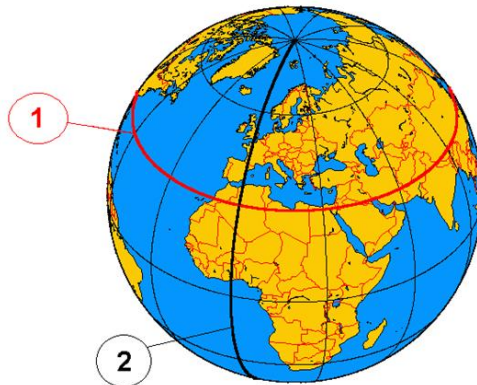
Przed przystąpieniem do budowy farmy, odpowiednią czynnością powinno być zapoznanie się z pojęciami, które pozwolą oszacować efektywność paneli, a także pozwolą na najlepszy wybór lokalizacji na budowę. Aby obliczyć moc

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, cezary.sawiarski@pollub.edu.pl

farmy, potrzebna jest do tego wartość globalnego napromieniowania. Składa się ona jednak z wielu czynników [1]. Są to pojęcia geograficzne:

- Długość i szerokość geograficzna – służą do ustalenia lokalizacji na ziemi

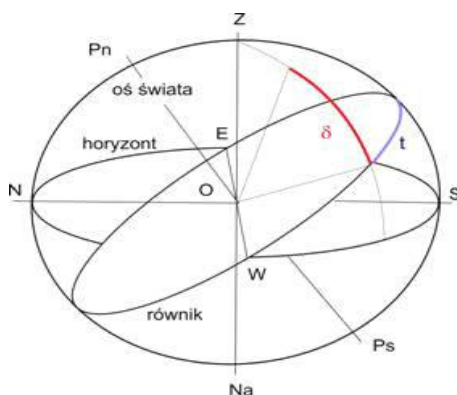


Rys. 1. Szerokość (1) i długość (2) geograficzna

- Deklinacja słoneczna – jest łukiem koła godzinnego zawartym pomiędzy promieniami słońca a płaszczyzną równika. Maksymalna wartość deklinacji ulega zmianom na skutek kołysania się osi ziemskiej [2]. Obecnie wynosi ona  $\pm 23^{\circ}27'$ . Wartość deklinacji jest obliczana według następującego wzoru:

$$\delta = 23,45 \sin \left[ 360 \left( \frac{284+n}{365} \right) \right] \quad (1)$$

gdzie:  $\delta$  – deklinacja;  $n$  – dzień w roku.



Rys. 2. Wizualne ukazanie deklinacji słonecznej[1]

- Kąt godzinny słońca – jest to współrzędna zawarta między płaszczyzną lokalnego południka a płaszczyzną koła godzinnego przechodzącego przez obiekt. Pozwala on na obliczenie czasu słonecznego:

$$\omega = 15 * (h - 12) \quad (2)$$

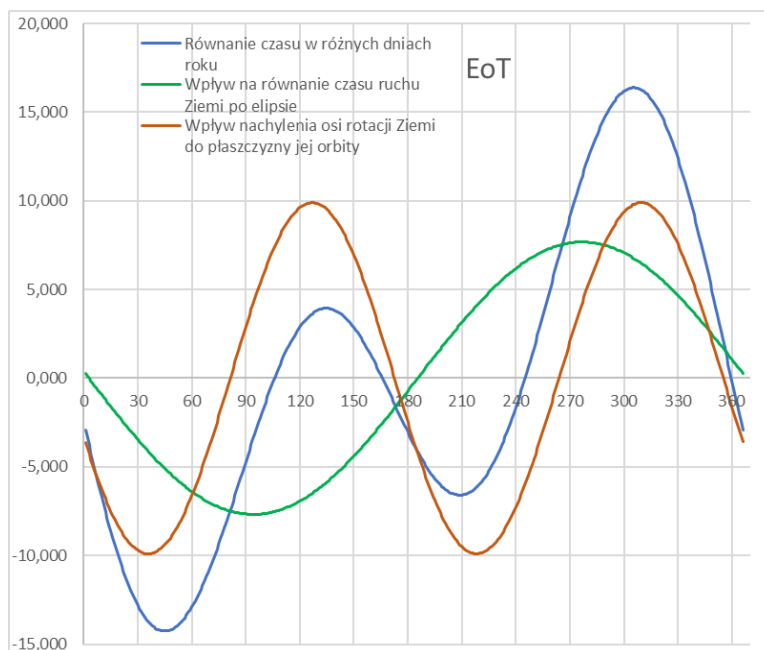
gdzie:  $h$  – godzina, dla której kąt ma zostać obliczony;  $\omega$  – kąt godzinny słońca.

- Kąt wysokości słońca – wartość opisująca wysokość słońca nad horyzontem o wybranej porze. Ten kąt jest jedną z najważniejszych wartości potrzebnych do uzyskania oczekiwanych wyników obliczeń [4]:

$$\sinh = \sin\delta\sin\varphi + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega \quad (3)$$

gdzie:  $\omega$  – kąt godzinny słońca;  $\varphi$  – szerokość geograficzna;  $\delta$  – deklinacja słońca;  $h$  – wysokość słońca.

- Równanie czasu – równanie czasu (EOT) pokazują różnicę między czasem słonecznym prawdziwym, a średnim. Oba czasy nie są równe, ponieważ ziemia porusza się po orbicie z różną prędkością, a także występują zmiany w nachyleniu osi ziemi względem płaszczyzny orbity [1]



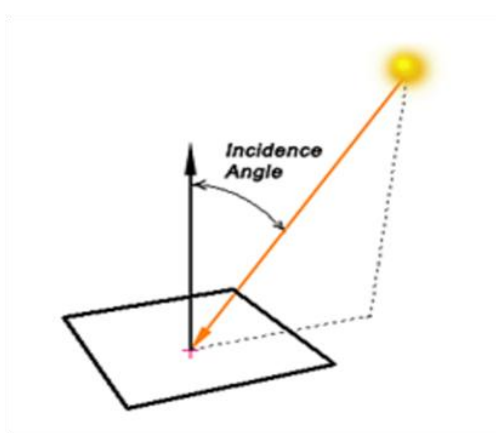
Rys. 3. Wykres równania czasu w ciągu roku



- Kąt padania promieniowania słonecznego – najważniejsza wartość, potrzebna do obliczenia globalnego natężenia promieniowania słonecznego. Może zostać określona jako kąt pomiędzy promieniami słonecznymi a linią prostopadłą do powierzchni panelu słonecznego [4,11]. Kąt ten jest połączeniem większości wartości lub współrzędnych opisanych w poprzednich podrozdziałach, a jest obliczany według wzoru:

$$v(\beta, \alpha) = \cos^{-1}(\cos\gamma_s * \cos\alpha_F * \sin\beta + \sin\gamma_s * \cos\beta) \quad (4)$$

gdzie:  $v(\beta, \alpha)$  – kąt padania promieniowania słonecznego;  $\gamma_s$  – kąt wysokości słońca;  $\beta$  – kąt nachylenia powierzchni panelu względem powierzchni płaskiej;  $\alpha_F$  – kąt azymutu słonecznego



Rys. 4. Ilustrowany kąt padania promieniowania słonecznego

- Globalne natężenie promieniowania na płaszczyźnie płaskiej oraz poziomej – natężenie promieniowania (napromieniowanie) na powierzchni płaskiej składa się z dwóch czynników: bezpośredniego oraz rozproszonego napromieniowania [8]. Ta wartość jest potrzebna przy obliczeniu globalnego napromieniowania dla płaszczyzny ruchomej, czy też po prostu pochylonej.

$$E_{g,hor} = E_{d,hor} + E_{b,hor} \quad (5)$$

$$E_{d,hor} = 16 * \sqrt{\gamma_s} - 0,4 * \gamma_s \quad (6)$$

$$E_{b,hor} = E_{b,norm} * \sin\gamma_s \quad (7)$$

gdzie:  $E_{b,hor}$  – bezpośrednie napromieniowanie na płaszczyźnie poziomej;  $E_{d,hor}$  – rozproszone napromieniowanie na płaszczyźnie poziomej;  $\gamma_s$  – kąt wysokości słońca.

Globalne natężenie promieniowania na powierzchni pochyłej jest podstawą do wyliczenia mocy jednego panelu, bądź całej instalacji. Jest najważniejszym działaniem wykonywanym podczas wszystkich obliczeń. To napromieniowanie składa się z napromieniowania bezpośredniego, rozproszonego i odbitego. Wartość napromieniowania tych trzech składowych jest zależna od kąta padania promieniowania, lub też od samego kąta nachylenia powierzchni panelu.

$$E_{g,pv} = E_{b,pv} + E_{d,pv} + E_{r,pv} \quad (8)$$

$$E_{b,pv} = \begin{cases} \frac{E_{b,hor} * \cos v(\beta, \alpha)}{\sin \gamma_s}, & \cos(\beta, \alpha) > 0 \\ 0, & \text{w innym wypadku} \end{cases} \quad (9)$$

$$E_{d,pv} = \begin{cases} E_{d,hor} * \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right), & \frac{1 + \cos(\beta)}{2} > 0 \\ 0, & \text{w innym wypadku} \end{cases} \quad (10)$$

$$E_{r,pv} = \begin{cases} E_{g,hor} * \rho_g * \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right), & \frac{1 - \cos(\beta)}{2} > 0 \\ 0, & \text{w innym wypadku} \end{cases} \quad (11)$$

$E_{g,pv}$  – globalne napromieniowanie na płaszczyźnie pochyłej

$E_{b,pv}$  – bezpośrednie napromieniowanie na płaszczyźnie pochyłej

$E_{d,pv}$  – rozproszone napromieniowanie na płaszczyźnie pochyłej

$E_{r,pv}$  – odbite napromieniowanie na płaszczyźnie pochyłej

$E_{d,hor}$  – rozproszone napromieniowanie na powierzchni płaskiej

$E_{g,hor}$  – globalne napromieniowanie na powierzchni płaskiej

$E_{b,hor}$  – bezpośrednie napromieniowanie na powierzchni płaskiej

$v(\beta, \alpha)$  – kąt padania natężenia promieniowania

$\beta$  – kąt nachylenia powierzchni panelu

$\gamma_s$  – kąt wysokości słońca

$\rho_g$  – stosunek napromieniowania padającego do odbitego.

Po zapoznaniu się z powyższymi zagadnieniami i po wykonaniu obliczeń, pozostaje obliczenie mocy panelu i całej instalacji PV.

$$P_{panel} = (E_{g,pv} * P_{pk,panel} * \eta_{rel} * \eta_{inv}) / E_{STD} \quad (12)$$

$$P_{system} = P_{panel} * num_{panels} \quad (13)$$

$P_{panel}$  – moc jednego panelu, kW

$P_{system}$  – moc całego systemu, kW

$P_{pk,panel}$  – moc znamionowa szczytowa panelu, kW

- $E_{STD}$  – standardowa wartość napromieniowania – 1000 W/m<sup>2</sup>  
 $E_{g,pv}$  – globalne napromieniowanie na płaszczyźnie panelu, W/m<sup>2</sup>  
 $num_{panels}$  – liczba paneli pracujących na jeden falownik  
 $\eta_{rel}$  – względna sprawność panelu  
 $\eta_{inv}$  – współczynnik wydajności falownika.

## ANALIZA WYKONANYCH OBLICZEŃ

Do analizy wybrano Górki Czechowskie znajdujące się w Lublinie, w województwie Lubelskim. Na podstawie mapy wyznaczono szerokość oraz długość geograficzną wybranego miejsca (51°16' N oraz 22°32' E) [6]. Po przeliczeniu wartości minutowych na dziesiętne wynoszą: szerokość geograficzna: 51,26 oraz długość geograficzna: 22,32.

Wykonano obliczenia dla każdego dnia w roku. W tabeli przedstawiono wyniki z piętnastego dnia każdego miesiąca. Przy wyliczaniu kąta padania promieniowania słonecznego ( $v(\beta, \alpha)$ ) przyjęto kąt  $\beta = 0$ , oraz azymut = 0. Obie te zmienne mogą być modyfikowane według uznania, a każda najmniejsza ich zmiana wpływa na wartość tego kąta.

Tab. 1. Wyniki obliczeń dla 15-tego dnia każdego miesiąca

	Dzień roku	Dzień miesiąca	$\delta$	$\gamma_s$	$EOT$	$v(\beta, \alpha)$
<b>Styczeń</b>	16	15	-21,27	17,48	-8,634	72,519
<b>Luty</b>	46	15	-13,29	25,46	-14,261	64,539
<b>Marzec</b>	73	15	-2,42	35,53	-9,921	54,469
<b>Kwiecień</b>	104	15	9,04	47,79	-0,503	42,206
<b>Maj</b>	134	15	18,55	57,30	3,936	32,702
<b>Czerwiec</b>	165	15	23,27	62,02	0,189	27,982
<b>Lipiec</b>	195	15	21,67	60,42	-5,662	29,575
<b>Sierpień</b>	226	15	14,11	52,86	-5,067	37,142
<b>Wrzesień</b>	257	15	2,62	41,37	4,266	48,632
<b>Październik</b>	287	15	-9,23	29,52	14,189	60,480
<b>Listopad</b>	318	15	-18,91	19,84	15,328	70,162
<b>Grudzień</b>	348	15	-23,29	15,46	5,383	74,542

gdzie:  $\delta$  – deklinacja;  $\gamma_s$  – kąt wysokości słońca;  $EOT$  – równanie czasu;  $v(\beta, \alpha)$  – kąt padania promieniowania słonecznego.

Na podstawie wzorów na globalne napromieniowanie na powierzchni płaskiej, a następnie pochyłej, zakończono kolejny etap obliczeń.

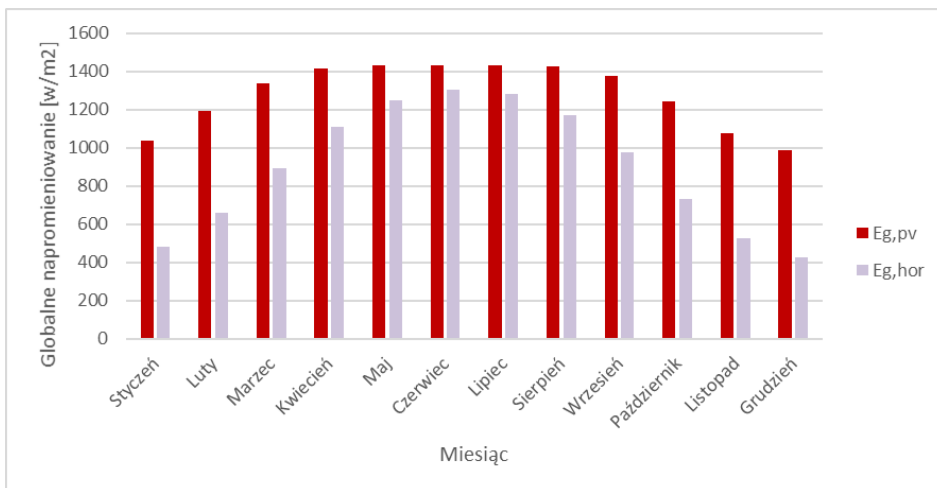
W tabeli przedstawiono średnie wartości natężenia promieniowania, zarówno na płaszczyźnie płaskiej, jak i pochyłej. Można zauważyć, że dla kąta  $\beta = 0$  i azymutu  $\alpha = 0$ , wartości będą takie same.

Tab. 2. Porównanie wartości napromieniowania na płaszczyźnie płaskiej i pochyłej

	$\phi$	Kąt $\beta$	Azymut	śr $E_{g,hor}$	śr $E_{g,pv}$
	°	°	°	w/m <sup>2</sup>	w/m <sup>2</sup>
<b>Styczeń</b>	51,25	0	0	480,531	480,531
<b>Luty</b>				656,651	656,651
<b>Marzec</b>				890,700	890,700
<b>Kwiecień</b>				1109,970	1109,970
<b>Maj</b>				1251,197	1251,197
<b>Czerwiec</b>				1306,092	1306,092
<b>Lipiec</b>				1281,509	1281,509
<b>Sierpień</b>				1171,035	1171,035
<b>Wrzesień</b>				976,322	976,322
<b>Październik</b>				733,934	733,934
<b>Listopad</b>				523,563	523,563
<b>Grudzień</b>				425,894	425,894

Tab. 3. Porównanie napromieniowania przy kącie  $\beta = 30^\circ$  i  $\alpha = 45^\circ$

	$\phi$	Kąt $\beta$	Azymut	śr $E_{g,hor}$	śr $E_{g,pv}$
	°	°	°	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
<b>Styczeń</b>	51,25	30	45	480,531	1039,083
<b>Luty</b>				656,651	1190,944
<b>Marzec</b>				890,700	1337,917
<b>Kwiecień</b>				1109,970	1416,497
<b>Maj</b>				1251,197	1434,110
<b>Czerwiec</b>				1306,092	1433,070
<b>Lipiec</b>				1281,509	1434,157
<b>Sierpień</b>				1171,035	1427,391
<b>Wrzesień</b>				976,322	1375,804
<b>Październik</b>				733,934	1246,178
<b>Listopad</b>				523,563	1079,185
<b>Grudzień</b>				425,894	985,566
<b>Średnia:</b>				900,617	1283,325



Rys. 5. Porównanie wartości napromieniowania przy ustalonych kątach ( $E_{g,pv}$  – globalne napromieniowanie na płaszczyźnie pochylej;  $E_{g,hor}$  – napromieniowanie na powierzchni płaskiej)

Dzieje się tak, ponieważ kąt  $\beta = 0$ , a to oznacza, że panel fotowoltaiczny jest położony równolegle do płaszczyzny płaskiej. Jednak najważniejszą czynnością przed ustawieniem paneli słonecznych jest ustalenie najlepszej dla użytkownika wartości kątów  $\beta$  i  $\alpha$ . Należy znaleźć takie wartości kąta, aby w miejsce paneli docierała jak największa ilość natężenia promieniowania słonecznego

## NAPROMIENIOWANIE A MOC INSTALACJI

Posiadając wartości napromieniowania, droga do obliczenia mocy instalacji jest już bardzo krótka i prosta. Obliczono moc, jaką wygeneruje cała farma fotowoltaiczna. Tabela 4. dokładnie pokazuje zależność zarówno między napromieniowaniem a mocą, jak i między kątem wysokości słońca a mocą. Wszystkie wyniki są do siebie w pewnym stopniu proporcjonalne.

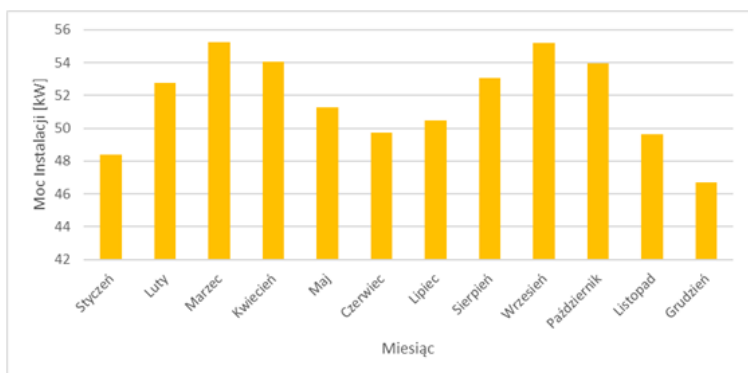
Im większy jest kąt, tym większa jest moc instalacji. Jednak ta zasada nie sprawdza się w każdym możliwym przypadku. Przy innych wartościach kątów  $\beta$  i  $\alpha$ , ta zależność przestaje być wiarygodna. Dlatego też zależnością, która zawsze będzie zgodna z prawdą, jest zależność mocy od napromieniowania na płaszczyznę pochyłą. Im większe jest napromieniowanie, tym większa będzie wygenerowana moc.

Tab. 4. Średnie wyniki napromieniowania, mocy oraz kąta wysokości słońca

	$\phi$	Kąt $\beta$	Azymut	$E_{g,pv}$	Wysokość słońca	$P_{system}$
	°	°	°	W/m <sup>2</sup>	°	kW
<b>Styczeń</b>	51,26	30	0	1016,552	17,89	38,243
<b>Luty</b>				1086,953	25,41	40,891
<b>Marzec</b>				1148,850	36,35	43,220
<b>Kwiecień</b>				1189,237	48,23	44,739
<b>Maj</b>				1217,451	57,55	45,800
<b>Czerwiec</b>				1231,686	61,82	46,336
<b>Lipiec</b>				1224,964	59,84	46,083
<b>Sierpień</b>				1200,495	52,04	45,163
<b>Wrzesień</b>				1165,608	40,73	43,850
<b>Październik</b>				1110,564	28,89	41,779
<b>Listopad</b>				1035,925	19,69	38,972
<b>Grudzień</b>				989,852	15,64	37,238
<b>Średnia:</b>				1134,845	38,67	42,693

## USTALENIE NAJLEPSZEJ KONFIGURACJI

W przypadku wybranej wcześniej lokalizacji, wymagane jest ustalenie wartości obu tych kątów, aby uzyskać jak najbardziej efektywną średnią. Szukając jak najlepszej kombinacji, wykazano, że kąty  $\beta$  oraz  $\alpha$  powinny wynosić kolejno  $52^\circ$  oraz  $46^\circ$ . W tym przypadku średnia moc systemu jest największa. Co ciekawe, największe wartości mocy wypadały na miesiące wiosenne oraz jesienne. To jest najlepszym przykładem i dowodem na to, że najwyższe położenie słońca nad horyzontem, które ma miejsce w czerwcu, wcale nie musi oznaczać największego napromieniowania.



Rys. 6. Średnie wartości mocy instalacji fotowoltaicznej dla  $\beta = 52^\circ$  i  $\alpha = 46^\circ$

To wszystko spowodowane jest ustawieniem paneli pod odpowiednim kątem, dla uzyskania jak najlepszej rocznej średniej. Należy jednak wziąć pod uwagę, że to mogą być idealnie dobrane dane tylko dla konkretnej lokalizacji. Dobór tych samych wartości kątów dla innego miejsca może skutkować gorszymi bądź lepszymi wynikami.

Tab. 5. Średnie wyniki napromieniowania i mocy instalacji dla  $\beta = 52^\circ$  i  $\alpha = 46^\circ$

	$\phi$	Kąt $\beta$	Azymut	śr $E_{g,pv}$	śr $P_{system}$
	°	°	°	W/m <sup>2</sup>	kW
<b>Styczeń</b>	51,26	52	46	1286,805	48,410
<b>Luty</b>				1402,164	52,749
<b>Marzec</b>				1468,614	55,249
<b>Kwiecień</b>				1436,695	54,048
<b>Maj</b>				1363,141	51,281
<b>Czerwiec</b>				1321,790	49,726
<b>Lipiec</b>				1341,316	50,460
<b>Sierpień</b>				1410,182	53,051
<b>Wrzesień</b>				1467,667	55,214
<b>Październik</b>				1434,745	53,975
<b>Listopad</b>				1319,725	49,648
<b>Grudzień</b>				1240,907	46,683
<b>Średnia:</b>				1374,479	51,708

## PODSUMOWANIE

Przeanalizowano wpływ różnych zjawisk geograficznych i astronomicznych na moc farm fotowoltaicznych. Zaczynając od podstawowych pojęć, takich jak współrzędne geograficzne, przez wysokość słońca nad horyzontem i równanie czasu, aż do napromieniowania, każdy z tych elementów jest składową kolejnego. Większą część tej pracy stanowiło szukanie, porównywanie i opisywanie zaobserwowanych zmian, spowodowanych przez modyfikację jednej z danych.

Wykazano, co, dlaczego i w jaki sposób wpływa na efektywność instalacji fotowoltaicznych. Na podstawie wykonanych porównań, tabel oraz wykresów, można stwierdzić, że największy wpływ na moc farm fotowoltaicznych mają dwa kąty. Kąt  $\beta$ , czyli kąt nachylenia panelu względem podłoża, a także kąt azymutu  $\alpha$ , czyli poziomy kąt między południkiem a powierzchnią panelu. To właśnie na bazie zmian wartości tych kątów zmienia się wartość napromienio-

wania na płaszczyźnie pochyłej, a to napromieniowanie jest głównym czynnikiem potrzebnym do obliczenia mocy instalacji.

Użytkownik modyfikując ustawienie paneli, może zdecydować, czy zależy mu na wysokiej rocznej średniej, czy też wystarczy mu większa ilość mocy w okresie letnim, lub zimowym. Z drugiej strony, ogromny wpływ na efektywność farm ma po prostu lokalizacja, w której owa farma się znajduje. Jednak to jest czynnik, o którym nie zawsze można decydować według własnego uznania.

## LITERATURA

- [1] Braun J. E. and J. C. Mitchell., *Solar geometry for fixed and tracking surfaces*, Solar Energy, 1983, 31, 439–444
- [2] Klein S.A., *Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces*, Solar Energy, 1977, 19, 325–329,
- [3] Wagner A., *Photovoltaik Engineering*, Springer, 2009
- [4] Paulescu E., Paulescu M., Gravila P. and Badescu V., *Weather Modeling and Forecasting of PV systems*, Springer, 2013
- [5] Stryczewska D.H., *Technologie energii odnawialnej*, Wyd. Komitet Inżynierii Środowiska PAN, 2011
- [6] <https://www.google.com/maps>, wybór lokalizacji, współrzędne geograficzne
- [7] <https://odkrywcyplanet.pl/azymut/>, informacje na temat kąta azymutu
- [8] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-geometry> – rola promieniowania w projektowaniu systemu fotowoltaicznych, zasoby z 20.01.2021
- [9] <https://stiloenergy.pl/2019/09/19/farma-fotowoltaiczna-co-to-jest-i-jak-dziala/>, informacje na temat farm fotowoltaicznych, zasoby z dnia 20.01.2021
- [10] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Fotowoltaika>, zasoby z dnia 20.01.2021
- [11] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/solar-incidence-angle> – kąt padania promieni słonecznych – definicja, zasoby z dnia 20.01.2021
- [12] <https://dobrapogoda24.pl/artykul/natezenie-promieniowania-slonecznego-fotowoltaika> – zależność między natężeniem promieniowania a instalacją fotowoltaiczną, zasoby z dnia 20.01.2021
- [13] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie\\_rozproszone](http://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_rozproszone), zasoby z dnia 20.01.2021.



## **PRZEGLĄD OPROGRAMOWANIA WSPOMAGAJĄCEGO PROTOTYPOWANIE 3D**

### **WSTĘP**

W dobie technologii proces prototypowania jest znacznie uproszczony ze względu na dostęp do oprogramowania oraz maszyn, które jeszcze kilka lat temu były nieosiągalne dla przeciętnego człowieka ze względu na koszty. Obecnie na rynku dostępne są programy typu CAD (ang. *computer aided design*), które umożliwiają prototypowanie elementów 3D bez potrzeby fizycznego produkowania elementu. W niniejszym artykule zostaną przedstawione różne dostępne oprogramowania CAD porównane pod względem wymagań sprzętowych, dostępnych funkcji oraz trudności obsługi.

### **OPROGRAMOWANIE WSPOMAGAJĄCE PROTOTYPOWANIE 3D**

Projektowanie wspomagane komputerowo jest to zastosowanie sprzętu i oprogramowania komputerowego w projektowaniu technicznym. Metoda ta obecnie znajduje zastosowanie w takich branżach jak:

- inżynieria mechaniczna
- inżynieria elektryczna i elektroniczna
- inżynieria budowlana.

Oprogramowanie CAD jest w dzisiejszych czasach powszechnie stosowane ze względu na to, że znaczna większość procesu prototypowania odbywa się właśnie za pomocą oprogramowania komputerowego, a nie poprzez ciągłe wytwarzanie fizycznych prototypów oraz testowanie ich. Stosowanie metody komputerowego projektowania 3D pozwala na znaczne zmniejszenie kosztów produkcji finalnego produktu. Niektóre programy CAD posiadają także dodatkowe moduły pozwalające na wykonanie symulacji takich jak przepływy cieczy, naprężenia mechaniczne lub symulacja zachowania elementu na zmiany temperatury.

---

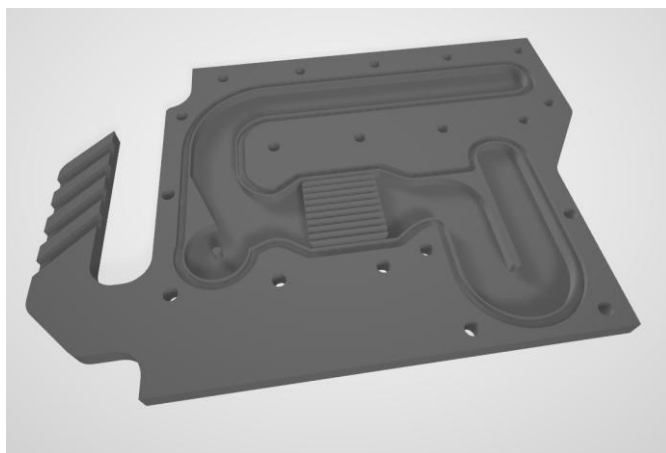
<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, mateusz.pawlikowski@pollub.edu.pl

## PLATFORMA TESTOWA

Każde z omawianego w artykule oprogramowania wspomagającego prototypowanie 3D zostanie przetestowane na tej samej jednostce komputerowej o parametrach:

- Procesor: AMD RYZEN 5 1400 taktowanie rdzenia 4 x 3,4 GHz
- Karta Graficzna GIGABYTE GTX 1050ti o pojemność RAM 4 GB
- Pamięć RAM HYPERX Fury RGB pojemność pamięci 16 GB, taktowanie pamięci 3200 MHz
- Płyta główna MSI B350-M gaming pro
- Zasilacz CORSAIR CV550 moc 550 W
- Dysk SSD WD GREEN 120 GB.

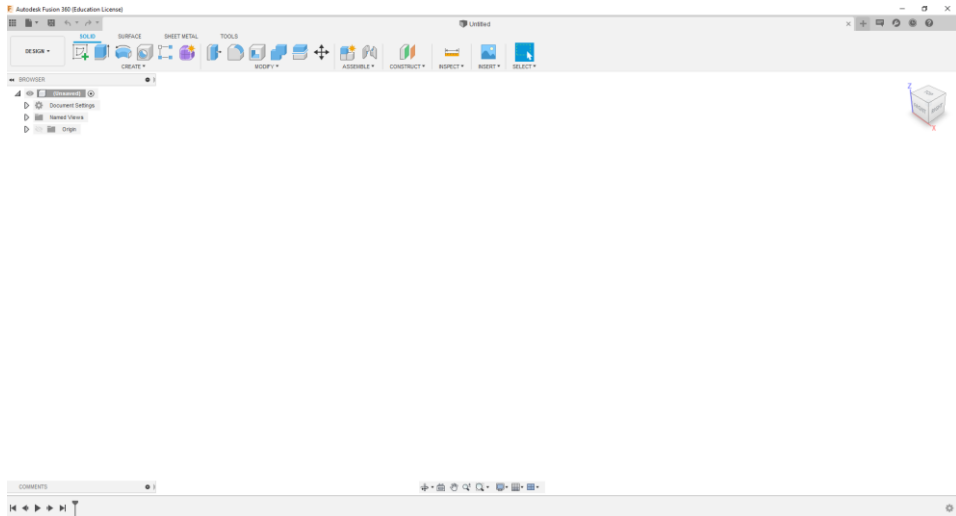
Testy obciążenia sprzętowego będą przeprowadzane za pomocą importowania modelu 3D do programu. Importowanym modelem będzie blok wodny na kartę graficzną GTX1050ti pokazany na rysunku 1.



Rys. 1. Zrzut ekranu modelu testowego z przeglądarki obiektów 3D firmy Microsoft

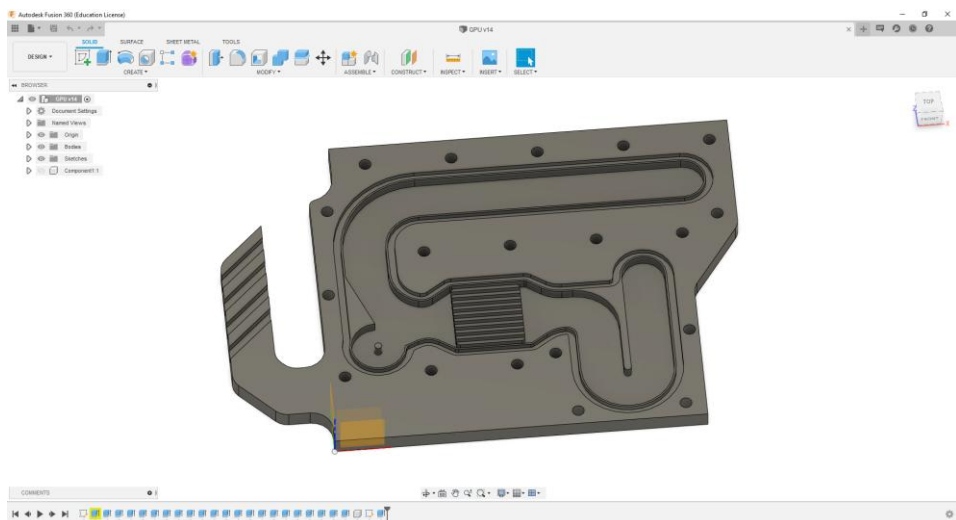
## OPROGRAMOWANIE FUSION360

Oprogramowanie Fusion360 zostało wydane przez firmę Autodesk, jest to kompletne choć nieskomplikowane rozwiązanie, idealnie sprawujące się w procesie prototypowania. Program wyposażony jest nie tylko w moduł do projektowania obiektów 3D, ale i moduł renderujący, animacji, symulacyjny i CAM. Program posiada praktycznie we wszystkie narzędzia potrzebne do prototypowania, ułatwia i przyspiesza pracę.



Rys. 2. Zrzut ekranu z programu Fusion360

Minimalne wymagania sprzętowe potrzebne do działania programu podane przez producenta to procesor o architekturze 64-bit, pamięć RAM 4Gb lub więcej, karta graficzna minimum 512Mb RAM, miejsce na dysku 2,5Gb, połączenie z Internetem i system Windows 8.1.



Rys. 3. Zrzut ekranu z programu Fusion360 z otwartym modelem testowym

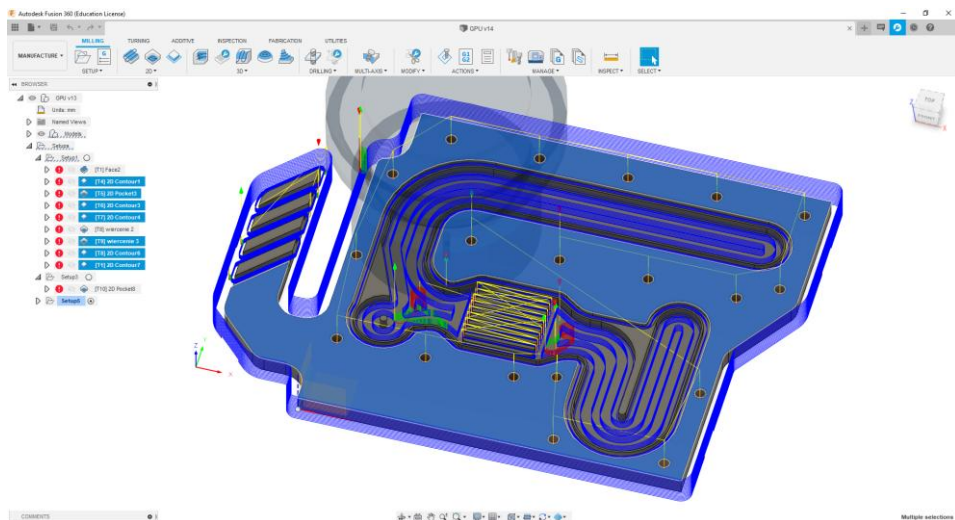
Menedżer zadań						
Plik Opcje Widok						
Procesy	Wydajność	Historia aplikacji	Uruchamianie	Użytkownicy	Szczegóły	Usługi
Nazwa	Stan		40%	50%	0%	0%
			Procesor CPU	Pamięć	Dysk	Sieć
Aplikacje (7)						
>	F Autodesk Fusion 360 (6)		28,2%	542,4 MB	0 MB/s	0 Mb/s
						33%
						Procesor graficzny

Rys. 4. Zrzut ekranu z menedżera zadań Windows

Program podczas pracy z zaimportowanym modelem testowym zużywa 10–30% zasobów procesora, około 600 MB pamięci RAM oraz około 30% zasobów karty graficznej.

Minimalne wymagania sprzętowe definiowane przez producenta zwykle podawane są tak, aby na komputerze o takiej specyfikacji można było tylko uruchomić program. Zaleca się, aby komputer, na którym używane będzie oprogramowanie, miał nieco wyższą specyfikację.

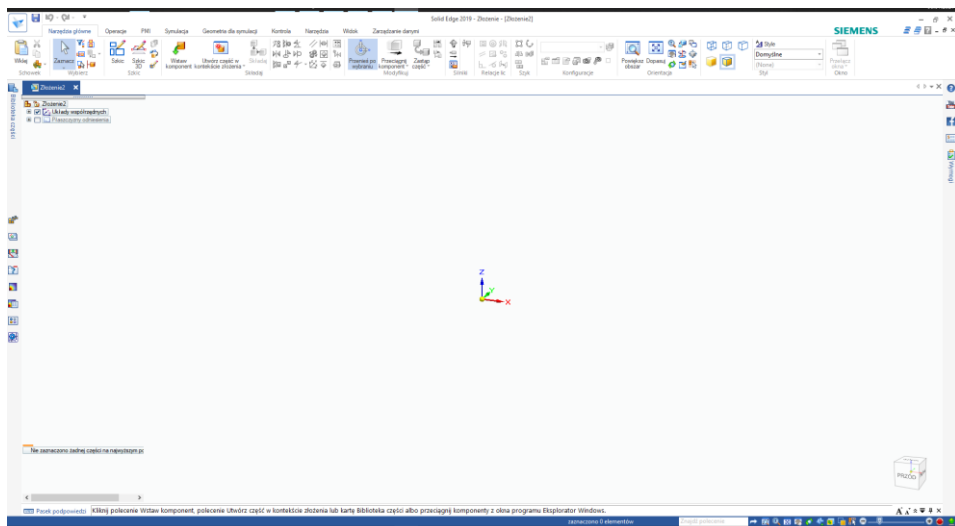
Nie należy zapominać także, że Fusion360 to nie tylko moduł CAD. W programie znajdziemy także moduł CAM (ang. *computer aided manufacturing*) z pomocą którego będziemy w stanie zaprojektowany element wytworzyć przy użyciu maszyn CNC.



Rys. 5. Zrzut ekranu z modułu CAM programu Fusion360

## OPROGRAMOWANIE SOLIDEDGE

Oprogramowanie SolidEdge firmy SIEMENS jest wyposażone tylko w moduł CAM, lecz nie sprawia to że program jest gorszy od wcześniej wspomnianego Fusion360. Oprogramowanie w pierwszej chwili sprawia wrażenie bardzo skomplikowanego, ale to tylko złudzenie, po zapoznaniu z podstawowymi narzędziami programu praca z nim staje się coraz przyjemniejsza.

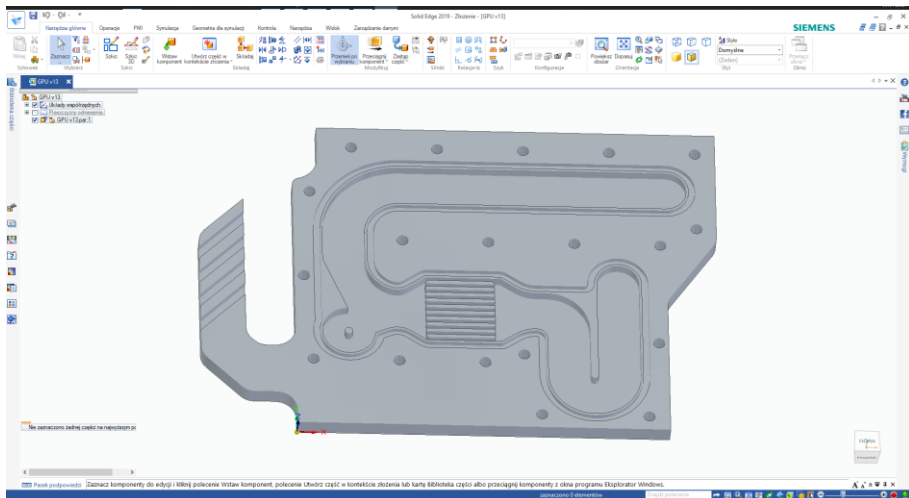


Rys. 6. Zrzut ekranu z programu SolidEdge

Producent oprogramowania podaje, że program potrafi osiągnąć bardzo dużą wydajność przy bardzo niskich wymaganiach sprzętowych, które prezentują się następująco:

- system operacyjny Windows 7
- pamięć RAM 4Gb
- rozdzielczość ekranu 1280 x 1024
- miejsce na dysku 6,5 GB.

Na stronie producenta nie ma żadnych informacji odnośnie wymagania dotyczącego procesora lub karty graficznej, można założyć więc, że program będzie działał poprawnie na komputerze, który spełni podane wyżej wymagania.



Rys. 7. Zrzut ekranu z programu SolidEdge z wgranym modelem testowym

Menedżer zadań

Plik Opcje Widok

Procesy	Wydajność	Historia aplikacji	Uruchamianie	Użytkownicy	Szczegóły	Usługi
Nazwa	Stan			27%	47%	0%
				Procesor CPU	Pamięć	Dysk
						5%
						Procesor graficzny
Aplikacje (7)						
Solid Edge						
				14,7%	380,4 MB	0 MB/s
						0 Mb/s
						22,9%

Rys. 8. Zrzut ekranu z menedżera zadań Windows

Po załadowaniu modelu testowego, można zauważyć że program zużywa około 10% zasobów procesora, 400 MB pamięci operacyjnej oraz około 20% wydajności karty graficznej.

## WYNIKI

Po przeprowadzeniu testu, polegającego na zaimportowaniu gotowego modelu testowego przez oba programy, można stwierdzić, że oprogramowanie SolidEdge pozwala na użytkowanie programu na sporo słabszym komputerze ze względu na bardzo dobrą optymalizację procesów obróbki obiektów 3D.

## PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule programy posiadają płatne subskrypcje oraz nie należą one do najtańszych, lecz producenci zapewniają także dostęp do darmo-

wych wersji dla studentów oraz hobbystów. Płatna subskrypcja jest wymagana jedynie podczas komercyjnego użytkowania tych programów. Są doskonałymi narzędziami pomocnymi w prototypowaniu 3D, z przewagą Fusion360 ponieważ posiada on w pakiecie bardzo przydatne wbudowane moduły ułatwiające dalsze sfabrykowanie części za pomocą drukarek 3D lub maszyn skrawających CNC. Wybór programu CAD jest kwestią indywidualną zależną od potrzeb projektanta oraz sprzętu komputerowego, jakim dysponuje. Jeżeli jest to jednostka o bardzo słabej specyfikacji dobrym wyborem będzie SolidEdge wspomagany innym programem CAM, których jest bardzo dużo na rynku, lecz jeśli posiada jednostkę o większej mocy obliczeniowej wybór Fusion360 będzie idealny, ponieważ jest to swego rodzaju kombajn do prototypowania posiadający wszystkie potrzebne funkcje w jednym miejscu. Poza przedstawionymi w artykule programami jest jeszcze wiele innych podobnych oprogramowań darmowych oraz płatnych, w których każdy może znaleźć coś, co będzie odpowiadało jego preferencjom oraz pracy, do jakiej dany program ma być wykorzystywany.

## LITERATURA

- [1] Jaskulski A., *Metodyka projektowania*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2017
- [2] Mazur J., Kosiński K., Polakowski K., *Grafika inżynierska z wykorzystaniem metod CAD*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004
- [3] Jonak J., *Systemy CAD/MES w zastosowaniach praktycznych. Cz. 1*, Politechnika Lubelska, Lublin 2013.

## KOREKCJA SYGNAŁU AUDIO W ELEKTROAKUSTYCE

### WSTĘP

Przy zapisie ścieżki dźwiękowej w studiu muzycznym, nagłośnieniu sali koncertowej, czy zwyczajnego odsłuchu muzyki w domu, wszystkie instrumenty powinny brzmieć w harmonii, wzajemnie się dopełniać i być ściśle związane w jedną całość. Aby słuchacz mógł usłyszeć muzykę konieczne jest przekształcenie sygnału audio w formie elektronicznej na postać fali akustycznej za pomocą przetwornika elektroakustycznego, który potocznie zwany jest „głośnikiem”. Przeszkodą są czynniki fizyczne, które mają negatywny wpływ na przetwarzanie sygnału audio na falę akustyczną oraz jej odbiór przez słuchacza. Jednymi z tych zjawisk są rezonans, interferencja fal oraz fale stojące. Rozwiązaniem tych problemów jest ingerencja w charakterystykę częstotliwościową sygnału dźwiękowego w postaci cyfrowej lub analogowej i zmiana amplitudy sygnału dla wybranych zakresów częstotliwości za pomocą korektora częstotliwościowego. W niniejszym artykule omówiono problematykę związaną z przetwarzaniem sygnału dźwiękowego i jego korekcją, wytłumaczono czym jest korektor częstotliwościowy oraz w kolejnej części zaprezentowano projekt korektora graficznego, który obejmuje schemat urządzenia, jego realizację, badanie oraz wnioski z uzyskanych wyników.

### SYGNAŁ AUDIO

Sygnał audio jest sygnałem elektrycznym, który może występować w postaci analogowej i cyfrowej. Sygnał ten zawiera informacje o dźwięku i może zostać zamieniony na falę akustyczną. Fala akustyczna, trafiając do ludzkiego ucha, wywołuje wrażenie słuchowe, a jest nim dźwięk. Wrażenia słuchowe, które odbierane są za pośrednictwem fal akustycznych opisywane są jako barwa dźwięku, wysokość czy głośność. Do opisu sygnału audio zamiast „głośności” używa się słowa „amplituda”, natomiast zamiast „wysokość”, czy „barwa

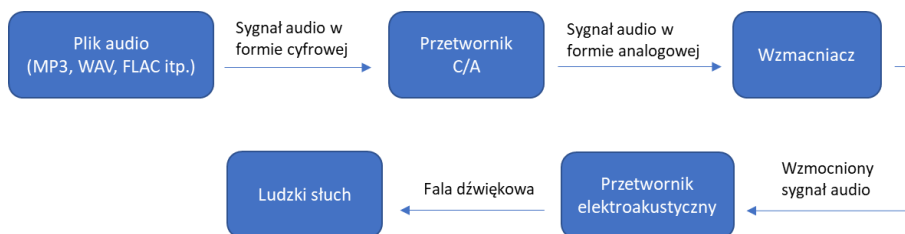
---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, dominik.ignaczak@pollub.edu.pl



dźwięku” używa się słowa „częstotliwość”, która wyrażona jest w hercach. Człowiek jest w stanie usłyszeć częstotliwości w zakresie od 16 Hz do 20 kHz [1]. Sygnał audio zawiera się w tym przedziale częstotliwości, dlatego został nazwany „sygnałem audio” od łacińskiego słowa *audio*, które oznacza *słyszę*.

Powszechnie stosowanymi formatami plików muzycznych są na przykład WAV, MP3 oraz FLAC. Aby zamienić plik muzyczny na możliwy do usłyszenia dźwięk konieczna jest jego konwersja na sygnał audio w postaci analogowej, przy pomocy przetwornika cyfrowoanalogowego. Następnie sygnał należy wzmocnić i podać do przetwornika elektroakustycznego (głośnika). Zadaniem przetwornika elektroakustycznego jest zamiana sygnału audio w formie analogowej na postać fali akustycznej. Finalnie fala akustyczna może zostać odebrana przez ludzki zmysł słuchu. Drogę przetwarzania sygnału audio przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy przetwarzania sygnału audio

Na rozchodzenie się fali w pomieszczeniu odsłuchowym i odbiór dźwięku przez słuchacza mają wpływ negatywne zjawiska fizyczne takie jak rezonans, interferencja czy powstawanie fal stojących. Są spowodowane niedoskonałością pomieszczeń odsłuchowych, a także samych przetworników elektroakustycznych.

W wyniku tych zjawisk, odsłuchując muzykę, można odnieść wrażenie, że niektóre instrumenty brzmią głośniejsz lub ciszej oraz w sposób inny niż zaplanował to artysta. W tej sytuacji muzyka może być nieprzyjemna w odbiorze, a niektóre niuanse wcale niesłyszalne.

Przykładowo, słuchając muzyki w pokoju z użyciem kolumn głośnikowych, fala akustyczna, która jest przez nie wytwarzana ulega interferencjom w pewnych przedziałach pasma częstotliwościowego. Fala akustyczna wytwarzana przez kolumny odbija się od przeciwnej ściany, następnie powraca w stronę kolumn i ponownie odbija się od ściany przy której stoją kolumny. W wyniku tego zjawiska fale akustyczne, które pochodzą bezpośrednio z kolumn głośni-

kowych, wchodzą w interakcje z falami odbitymi, o tych samych przedziałach częstotliwości. Jeżeli fale, które się spotkają będą w przeciwfazie, nastąpi wzmocnienie amplitudy fali w danym zakresie częstotliwości. Jeżeli w tej sytuacji fale będą w tej samej fazie, amplituda fali się zmniejszy.

W rozwiązaniu tych problemów stosuje się korektory częstotliwościowe, za pomocą których możliwa jest zmiana amplitudy sygnału w wybranych zakresach częstotliwości, w jakich występują problemy akustyczne.

## KOREKTOR CZĘSTOTLIWOŚCIOWY

Korektor to urządzenie, które służy do poprawy właściwości akustycznych sygnału audio, poprzez zmianę jego charakterystyki częstotliwościowej. Może być wykorzystywany także do celowej zmiany brzmienia np. instrumentu muzycznego w studiu nagraniowym. Najpopularniejszymi rodzajami korektorów częstotliwościowych są korektory graficzne i parametryczne.

Korektor graficzny składa się z wielu potencjometrów suwakowych ustawionych obok siebie. Każdy z potencjometrów reprezentuje określoną częstotliwość środkową filtru, którą za pomocą nastawy potencjometru można stłumić lub wzmocnić. Składa się on z zespołu filtrów elektronicznych. Częstotliwości środkowe i szerokości pasma dla każdego korektora graficznego są ustawione na stałe. Ilość potencjometrów użytych w każdym kanale wynosi od 10 do 31 sztuk na kanał. Korektory graficzne, które posiadają od 10 zakresów regulacji nazywa się korektorami oktawowymi, natomiast te, które mają już 31 zakresów nazywa się tercjowymi.



Rys. 2. Analogowy korektor graficzny DBX 131s [5]

Korektor graficzny najczęściej służy do korekcji częstotliwościowej akustyki pomieszczenia lub niedoskonałości systemu audio. Stąd angielska nazwa *equalizer*, czyli „wyrównywacz”. Położenie nastaw potencjometrów suwakowych takiego urządzenia odwzorowuje w sposób graficzny charakterystykę przenoszenia korektora. W domowym sprzęcie audio można spotkać wiele modeli takich urządzeń. Mogą być wbudowane we wzmacniacze jako dodatkowa funkcja lub stać jako osobne urządzenie. Korektory tego typu występują

także jako programy wbudowane do odtwarzaczy muzycznych w komputerach i smartfonach. Equalizery wywodzą się z profesjonalnego sprzętu, w szczególności z systemów sprzętu nagłośnieniowego, gdzie jest on często używany do końcowej korekcji częstotliwościowej systemu.

Korektory parametryczne zwykle nie są spotykane w domowym sprzęcie audio. Składają się one z co najmniej dwóch regulatorów obrotowych. Jednym z nich wybiera się częstotliwość, którą zamierza się regulować, a drugi z nich służy do regulacji poziomu wzmocnienia bądź tłumienia tej częstotliwości.



Rys. 3. Analogowy korektor parametryczny Yamaha NE-1 [6]

Dość często występuje także trzeci regulator odpowiedzialny za regulację szerokości pasma wokół wybranej częstotliwości środkowej, tak zwana regulacja dobroci filtru. Głównym zastosowaniem korektorów parametrycznych są wszelkiego rodzaju studia nagraniowe. W zależności od sposobu działania, możemy wyróżnić typowe filtry: środkowozaporowe, środkowoprzepustowe, górnoprzepustowe oraz dolnoprzepustowe [2, 4]. Do konstrukcji filtrów stosowanych w korektorach używa się najczęściej wzmacniaczy operacyjnych. Filtr z zastosowanym wzmacniaczem operacyjnym nazywa się filtrem aktywnym ze względu na potrzebę zasilenia wzmacniacza dodatkowym napięciem, które często jest napięciem symetrycznym [3].

## ZAŁOŻENIA PROJEKTU

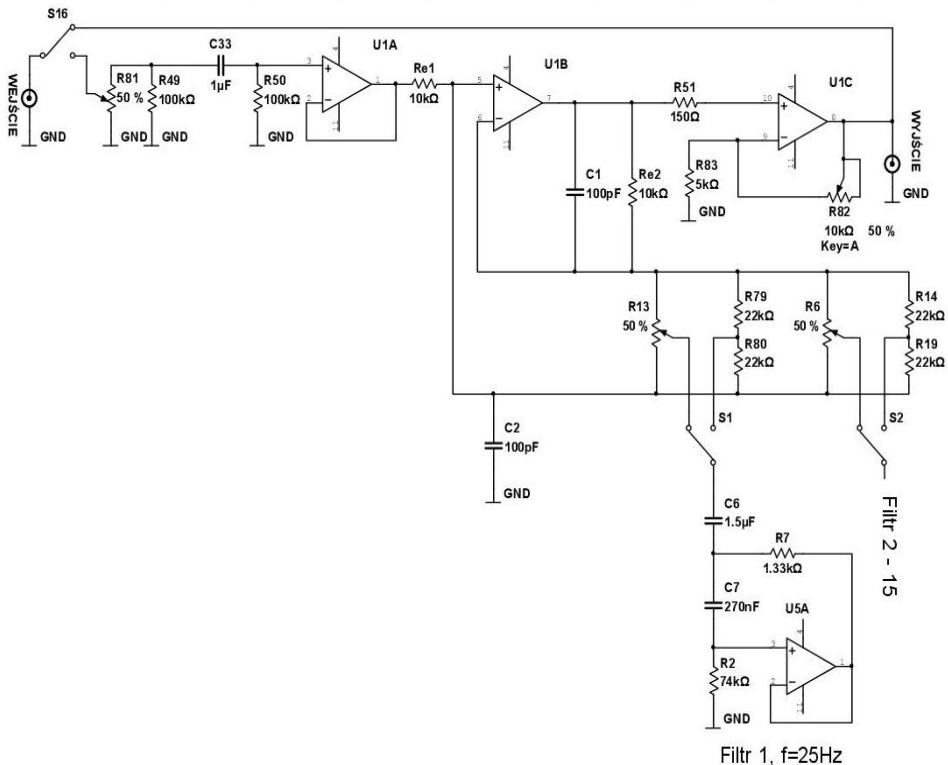
Celem projektu była realizacja urządzenia, które umożliwi zmianę charakterystyki częstotliwościowej sygnału audio w wybranych zakresach pasma akustycznego. Jest nim korektor graficzny. Do jego realizacji niezbędne było opracowanie schematu urządzenia i komputerowa symulacja jego działania. Symulacja układu pozwoliła zapobiec ewentualnym błędom doboru i połączeń

elementów elektronicznych przed jego konstrukcją oraz wprowadzić potrzebne zmiany. Zdecydowano się na budowę korektora graficznego z uwagi na możliwość dokładnej korekcji w wielu zakresach pasma akustycznego jednocześnie. Podstawowymi założeniami były:

- możliwość korekcji analogowego sygnału audio w piętnastu punktach pasma akustycznego za pomocą potencjometrów suwakowych
- możliwość zmiany amplitudy sygnału w zakresie  $-7 \div +7$  dB w wybranym zakresie
- zastosowanie wzmacniaczy operacyjnych i filtrów aktywnych
- konstrukcja zasilacza o napięciu symetrycznym 12 V.

## SCHEMAT UKŁADU

W pierwszej kolejności opracowano w programie National Instruments Multisim schemat układu, który przedstawiono na rysunku 4.



Rys 4. Schemat układu korektora graficznego z jednym filtrem

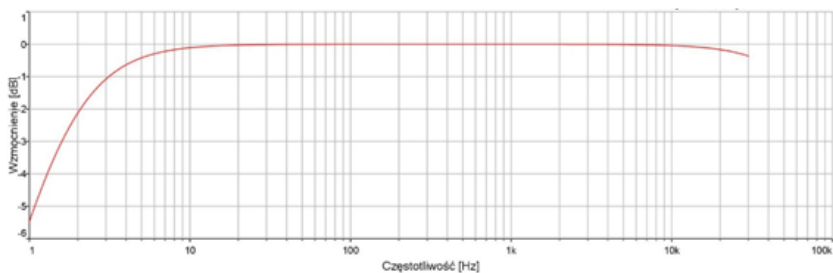
Analizując schemat układu można go podzielić na dwie części: układ główny i sekcje filtrów. Układ główny składa się z trzech wzmacniaczy operacyjnych – *UIA*, *UIB* oraz *UIC*. Zadaniem wzmacniacza *UIA* jest oddzielenie części wejściowej układu od części realizującej filtry. Pracuje on jako wtórnik napięciowy zapewniający dużą impedancję wejściową, w efekcie czego źródło podawanego sygnału audio na wejściu nie jest obciążane przez inne części układu.

Sekcja filtrów aktywnych połączona została z wejściem odwracającym i nieodwracającym wzmacniacza *UIB*. W dolnej części schematu widoczny jest jeden filtr o częstotliwości środkowej równej 25 Hz, ponieważ kolejne czternaście filtrów nie zmieściłoby się na prezentowanym schemacie. Brakujące filtry zostały oznaczone jako „Filtr 2–15”, a ich połączenie z układem jest analogiczne do filtru pierwszego. Każdy filtr posiada potencjometr suwakowy. Potencjometry te włączone są pomiędzy wejście odwracające i nieodwracające wzmacniacza *UIB* i odpowiadają za sterowanie wzmocnieniem oraz tłumieniem sygnału audio w zakresie częstotliwości środkowej, jaką posiada dany filtr. Wychylenie nastawy potencjometru w stronę wejścia odwracającego wzmacniacza *UIB* spowoduje wzmocnienie sygnału, natomiast w stronę wejścia nieodwracającego – jego tłumienie. Kiedy potencjometr ustawiony zostanie w pozycji środkowej sygnał audio nie zostanie zmodyfikowany.

Za wyjście układu odpowiada wzmacniacz operacyjny *UIC*. Pracuje on jako wzmacniacz nieodwracający umożliwiający wzmocnienie sygnału w zakresie od 1 V/V do 3 V/V. Za regulację zakresu odpowiada potencjometr 10 k $\Omega$ . Finalnie sygnał audio trafia do złącza RCA, które jest wyjściem układu. W całym układzie zastosowano wzmacniacze operacyjne o oznaczeniu *TL074ACN*.

## SYMULACJA UKŁADU

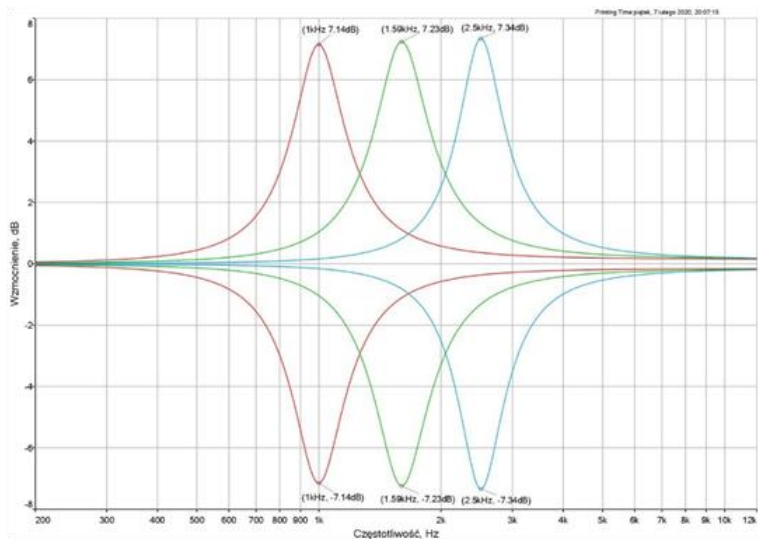
W celu sprawdzenia poprawności pracy symulowanego układu przeprowadzono dwa testy. Podczas pierwszego z nich ustawiono wszystkie potencjometry w pozycji środkowej. Na wejście układu podano sygnał testowy, którego częstotliwość została płynnie zmieniana przez program w zakresie od 1 Hz do 30 kHz. Badana była zmiana amplitudy sygnału na wyjściu względem amplitudy sygnału na wejściu. Teoretycznie sygnał przy środkowym ustawieniu nastaw wszystkich potencjometrów nie powinien ulec zmianie. Wyniki testu zaprezentowano na rysunku 5 (patrz rys. na s. 85).



Rys. 5. Charakterystyka przenoszenia korektora wyznaczona przy środkowym ustawieniu nastaw potencjometrów

Analizując wynik testu, sygnał w zakresie częstotliwości słyszalnych dla człowieka nie ulega znaczącej zmianie. W zakresie od 1 Hz do 10 Hz amplituda sygnału osiąga wartości ujemne co oznacza, że sygnał jest tłumiony. Spowodowane jest to celowym zabiegiem i odpowiednią konstrukcją układu wejściowego. Częstotliwości w tym zakresie nie są słyszalne dla człowieka.

Drugi test przebiegał podobnie do pierwszego. Wysłunięto nastawy wszystkich potencjometrów na maksimum i podano sygnał testowy. Następnie porównano jego amplitudę na wejściu względem wyjścia w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 30 Hz, a potem czynność powtórzono przy minimalnym ustawieniu nastaw potencjometrów. Wyniki testu z obu przypadków przedstawiono na jednym wykresie.

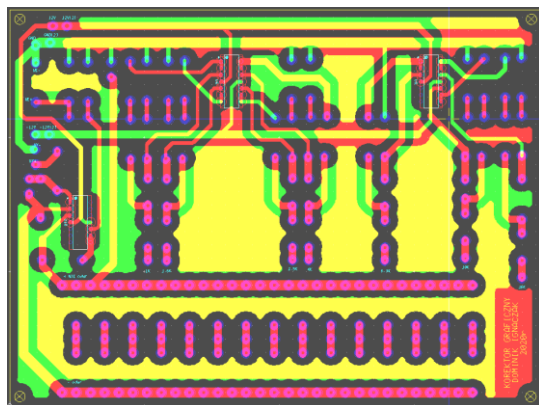


Rys. 6. Charakterystyki przenoszenia korektora przy aktywnych filtrach o częstotliwości środkowej 1 kHz, 1,6 kHz oraz 2,5 kHz

W celu przejrzystej analizy wyników przedstawiono charakterystyki dla trzech filtrów o częstotliwości środkowej 1 kHz, 1,6 kHz oraz 2,5 kHz. Wzmocnienie i tłumienie sygnału dla każdego filtru wynosi około 7 decybeli. Największa i najmniejsza wartość amplitudy odpowiada częstotliwości środkowej danego filtru. Wyniki wykonanych badań potwierdzają poprawność działania układu i postawione wcześniej założenia projektowe.

## REALIZACJA PROJEKTU

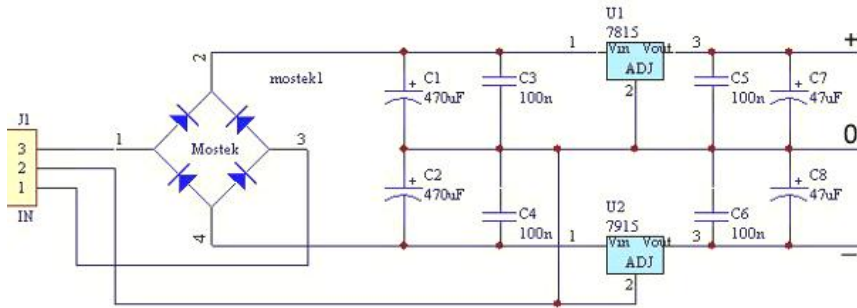
W celu realizacji korektora graficznego zaprojektowano układ połączeń i rozmieszczenie elementów na trzech płytkach drukowanych według wcześniej przedstawionego schematu przy pomocy programu National Instruments Ultiboard. Przykład zaprojektowanej płytki drukowanej przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Płytki układu głównego zaprojektowana w programie Ultiboard

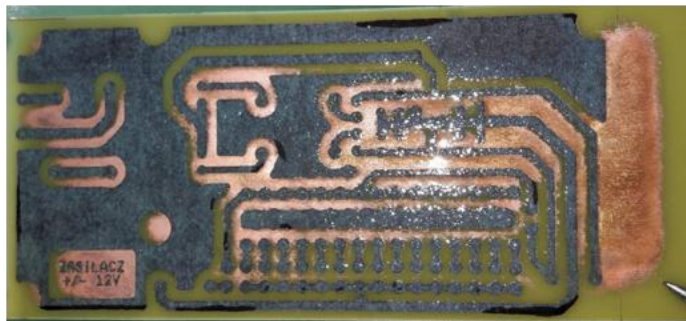
Na prezentowanej płytce znajduje się układ główny z wejściem i wyjściem sygnału audio oraz sekcją siedmiu filtrów aktywnych. Pozostałe osiem filtrów zostało umieszczonych na drugim laminacie o tych samych wymiarach. Laminaty, których użyto do konstrukcji urządzenia to laminaty dwustronne FR4. Kolorem czerwonym oznaczono docelowo dolną warstwę miedzi laminatu, a kolorem zielonym warstwę górną.

Układ opiera się na wzmacniaczach operacyjnych *TL074ACN*, które do prawidłowego działania potrzebują zasilania symetrycznego  $\pm 12$  V. Na potrzeby zasilania urządzenia zaprojektowano układ zasilacza na oddzielnym laminacie w oparciu o schemat przedstawiony poniżej [7].

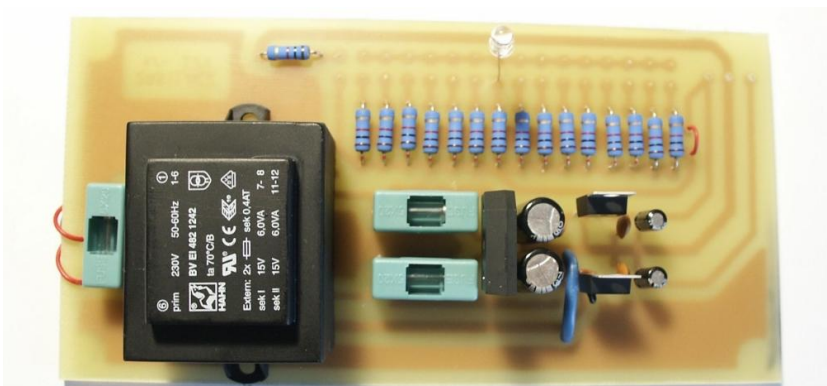


Rys. 8. Schemat zasilacza [7]

Po zaprojektowaniu wzoru ścieżek i ich rozmieszczenia na laminatach przystąpiono do procesu trawienia płytek. Laminat zasilacza podczas procesu trawienia zaprezentowano na poniższej fotografii.



Rys. 9. Laminat podczas procesu trawienia



Rys. 10. Zrealizowany zasilacz



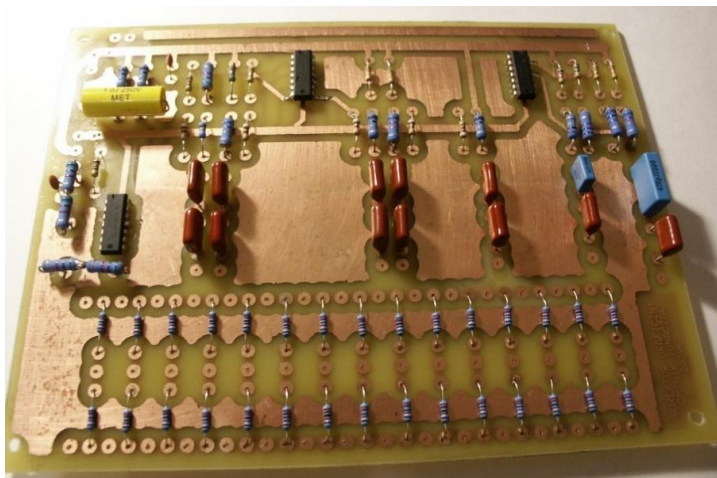
Laminaty, których użyto, to laminaty dwustronne o oznaczeniu FR4. Po zakończeniu procesu trawienia laminatów oczyszczono ich powierzchnię, a następnie wywiercono otwory w przeznaczonych do tego celu miejscach, na potrzeby przylutowania elementów elektronicznych. Finalnie gotowy zasilacz zaprezentowano na rysunku 10.

Największym spośród wszystkich elementów układu zasilacza jest transformator zalewany, który posiada dwa uzwojenia wtórne o napięciu 15 V i mocy 6 VA. Są to wartości w zupełności wystarczające na potrzeby zasilenia urządzenia. W układzie zastosowano także dwa bezpieczniki topikowe po stronie wtórnej transformatora oraz jeden po stronie pierwotnej w przypadku ewentualnego zwarcia. Kolejnymi elementami widocznymi na laminacie są stabilizatory napięcia, które stabilizują wartość napięcia wtórnego transformatora do wartości +12 V oraz -12 V. Zastosowane stabilizatory to odpowiednio *MC7812CTG* oraz *MC7912CTG*. Pozostałe elementy to kondensatory filtrujące oraz rezystory do zasilania diod LED. Przeprowadzono także test zasilacza w celu sprawdzenia poprawności napięć wyjściowych. Wyniki testu potwierdzają prawidłowe działanie i zostały przedstawione w tabeli 1.

*Tab. 1. Wyniki pomiarów wartości napięć wyjściowych zasilacza*

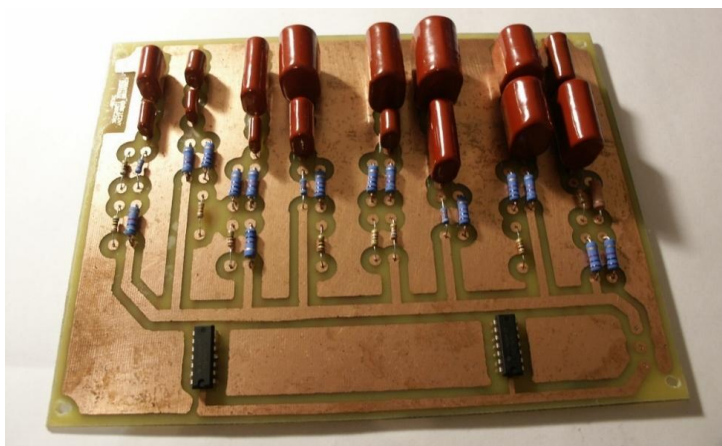
<b>Punkty pomiaru</b>	<b>Założona wartość napięcia w projekcie</b>	<b>Zmierzona wartość napięcia bez obciążenia</b>	<b>Zmierzona wartość napięcia z obciążeniem</b>
Linia +12 V, GND	+12 V	+12,00 V	+11,99 V
Linia -12 V, GND	-12 V	-12,01 V	-12,04 V

Po zakończeniu budowy zasilacza zrealizowano projekt pozostałych dwóch płytek PCB. Pierwszą z nich był laminat z układem głównym i sekcją siedmiu filtrów o częstotliwościach środkowych: 1 kHz, 1,6 kHz, 2,5 kHz, 4 kHz, 6,3 kHz, 10 kHz oraz 16 kHz. Gotową płytkę z przylutowanymi elementami zaprezentowano na poniższej fotografii.



*Rys. 11. Płytkę z układem głównym i sekcją siedmiu filtrów*

Ostatnią płytka PCB był laminat na którym umieszczono pozostałe osiem filtrów o częstotliwościach środkowych: 25 Hz, 40 Hz, 63 Hz, 100 Hz, 160 Hz, 250 Hz, 400 Hz oraz 630 Hz.



*Rys. 12. Płytkę z sekcją ośmiu filtrów*

Ostatecznie wszystkie trzy płytki umieszczono w skonstruowanej obudowie i odpowiednio ze sobą połączono. Gotowy korektor graficzny został przedstawiony na rysunku 13 (patrz rys. na s. 90).

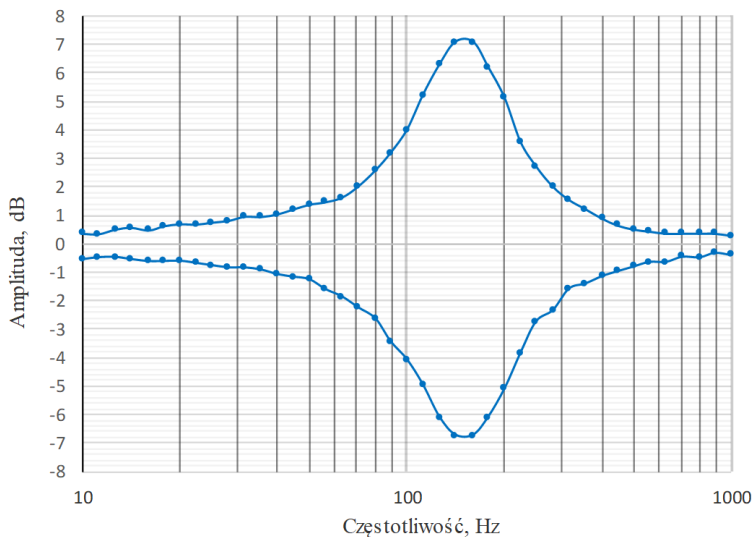


Rys. 13. Zrealizowany korektor graficzny

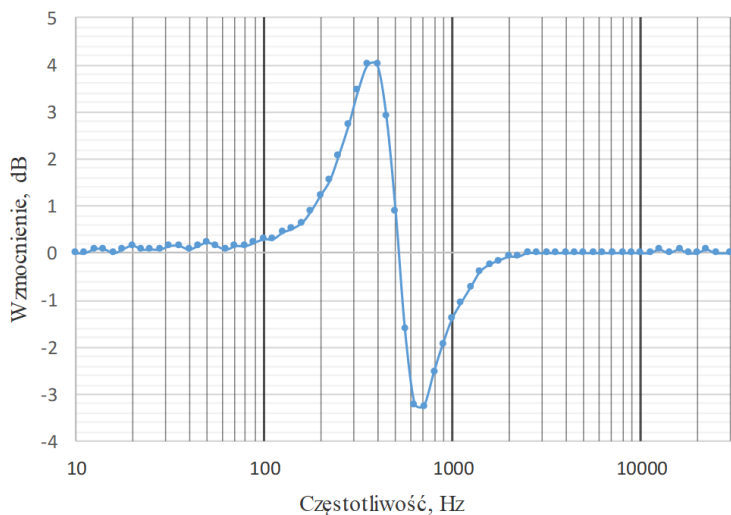
Korektor posiada 15 potencjometrów suwakowych. Każdy z potencjometrów połączony jest z jednym filtrem i umożliwia regulację wzmocnienia bądź tłumienia sygnału w zakresie częstotliwości środkowej filtru do którego podłączony jest używany potencjometr. Na panelu czołowym korektora umieszczono przełączniki poniżej każdego potencjometru. Służą one do włączania lub wyłączania z układu danego filtru, a o aktywności filtrów informują diody LED znajdujące się nad potencjometrami. Dodatkowo w lewej dolnej części panelu czołowego umieszczono potencjometry obrotowe, które odpowiedzialne są za wystawienie sygnału audio na wejściu i wyjściu oraz przełącznik i diodę funkcji „bypass”, dzięki której możliwe jest pominięcie układu korektora i skierowanie sygnału bezpośrednio do wyjścia korektora.

## **BADANIE SKONSTRUOWANEGO KOREKTORA GRAFICZNEGO**

Badanie zrealizowanego korektora było bardzo podobne do testów przeprowadzonych podczas symulacji układu. Na wejście układu podano sygnał sinusoidalny o stałej amplitudzie i zmiennej częstotliwości w zakresie od 10 Hz do 20 kHz, a następnie badano zmianę amplitudy sygnału na wyjściu korektora względem sygnału wejściowego. W ramach badań przeprowadzono dwa testy. Pierwszy z nich polegał na wyznaczeniu zmiany sygnału wyjściowego względem wejściowego przy maksymalnym i minimalnym wysunięciu nastawy wybranego potencjometru. Wyniki pierwszego testu przedstawiono na rysunku 14 (patrz rys. na s. 91).



Rys. 14. Charakterystyka przenoszenia korektora przy aktywnym filtrze o częstotliwości środkowej 160 Hz



Rys. 15. Charakterystyka przenoszenia korektora wyznaczona podczas drugiego testu przy aktywnych filtrach o częstotliwości środkowej 160 Hz oraz 630 Hz

W celu przedstawienia przykładu zaprezentowano wynik testu filtru o częstotliwości środkowej wynoszącej 160 Hz. Maksymalne wzmocnienie i tłumienie sygnału w zakresie częstotliwości środkowej filtru posiada wartość na

poziomie 7 dB, co potwierdza wcześniej postawione założenia projektowe. Test drugi przeprowadzono dla filtrów o częstotliwości środkowej 160 Hz i 630 Hz. Polegał na zbadaniu wzajemnego wpływu i oddziaływania dwóch sąsiadujących ze sobą filtrów o bliskiej wartości częstotliwości środkowej i ustawieniu nastawy potencjometru w pozycji maksymalnej i drugiego w minimalnej.

Analizując wyniki testu, możemy stwierdzić, że punkty charakterystyki o największym wzmocnieniu i tłumieniu odpowiadają częstotliwościom środkowym użytych filtrów w tym badaniu. Przy przeciwnym ustawieniu potencjometrów dwóch sąsiadujących filtrów uzyskana wartość wzmocnienia i tłumienia jest niższa niż 7 dB co także jest prawidłowym wynikiem i potwierdza wzajemne oddziaływanie filtrów.

## PODSUMOWANIE

Przedstawione badania wykazały poprawność działania skonstruowanego korektora graficznego. Wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe, które potwierdzają poprawne działanie układu i dowodzą zrealizowanie wcześniej postawionych założeń projektowych. Tym samym cel projektu prezentowanego w niniejszym artykule został osiągnięty.

## LITERATURA

- [1] Górecki P., *Elektronika dla wszystkich: Korektor graficzny, Equalizer 5-kanalowy*, Wydawnictwo AVT, Warszawa, 2001
- [2] Górecki P., *Elektronika dla wszystkich: Filtry aktywne, część 1*, Wydawnictwo AVT, Warszawa, 2001
- [3] Górecki P., *Wzmacniacze operacyjne: podstawy, aplikacje, zastosowania*, Wydawnictwo BTC, Wydanie 2 poprawione, Warszawa, 2001
- [4] Korbel K., *Szum, sygnał, filtracja w jądrowej spektrometrii amplitudowo-czasowej*, Wydawnictwo AGH, Kraków, 2011
- [5] Katalog produktów DBX, <https://dbxpro.com/en/products/131s>, zasoby z dnia 10.01.2021
- [6] Katalog produktów muzycznych, [https://muzyczny.pl/158254\\_Yamaha-NE1](https://muzyczny.pl/158254_Yamaha-NE1), zasoby z dnia 10.01.2021
- [7] Schemat zasilacza, <https://ssl.diyaudio.pl/content.php/30-Zasilacz-symetryczny-filtra-lub-przedwzmacniacza>, zasoby z dnia 10.01.2021.

## IMPLEMENTACJA REGULATORA PID DLA SILNIKA DC Z ENKODEREM Z WYKORZYSTANIEM MIKROKONTROLERA STM32

### WSTĘP

Intensywny rozwój przemysłu przyczynił się do zwiększenia udziału systemów napędowych wykorzystujących układy energoelektroniczne. Zastosowanie przekształtników umożliwia precyzyjne sterowanie parametrami maszyny, takimi jak położenie czy prędkość. Jednym z podstawowych sposobów zapewnienia regulacji prędkości systemów napędowych są układy wykorzystujące regulatory PID. Są to urządzenia, które na podstawie sygnału wejściowego, będącego uchybem regulacji, kształtują sygnał wyjściowy sterujący obiektem regulacji. W niniejszej pracy opisano proces budowy układu napędowego z silnikiem DC, do którego sterowania wykorzystano algorytm regulatora PID zaimplementowanego na mikrokontrolerze STM32F4. W końcowej części artykułu przedstawiono wyniki pracy układu uzyskane w STMStudio dla nastaw regulatora dobranych w sposób doświadczalny.

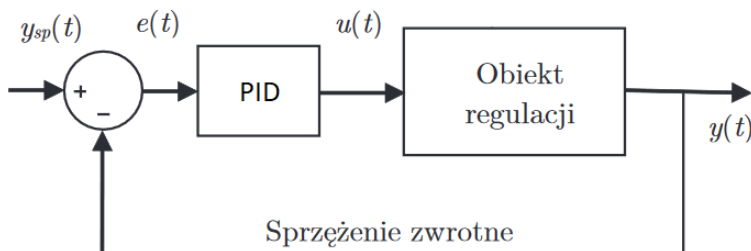
### REGULATOR PID

Regulator jest to urządzenie, które w odpowiedzi na różnicę pomiędzy wartością zadaną a wartością zmierzoną sygnału regulowanego, działa w taki sposób na obiekt regulacji, aby ten osiągnął wartość możliwie bliską wartości zadanej. Sygnałem wejściowym regulatora PID jest błąd regulacji, natomiast wyjście regulatora stanowi sygnał sterujący obiektem regulacji. Regulator PID jest regulatorem proporcjonalno-całkująco-różniczkującym, co wynika z rozwinięcia skrótu PID P – ang. *proportional*, I – ang. *integral*, D – ang. *derivative*. Jest on obecnie najczęściej stosowanym typem regulatora w przemyśle.

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, piotr.wereda@pollub.edu.pl

<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, patryk.brzowiec@pollub.edu.pl



Rys. 1. Schemat układu regulacji z regulatorem PID

Istnieje możliwość zapisania równań opisujących regulator zarówno w dziedzinie czasu(1), jak i w postaci transmitancji operatorowej (2).

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

$$G(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (2)$$

gdzie:  $K_p$  – wzmacnienie regulatora PID,  $T_i$  – stała części całkującej,  $T_d$  – stała części różniczkującej,  $e(t)$  – błąd regulacji,  $s$  – zmienna zespolona po przekształceniu Laplace'a,  $u(t)$  – sygnał sterujący.

Wzory (1 i 2) dotyczą regulatorów analogowych, które przetwarzają sygnał w sposób ciągły. Układy zbudowane na mikrokontrolerach, w przeciwieństwie do układów analogowych, działają w sposób cykliczny, to jest nie przetwarzają sygnału w sposób ciągły, lecz dyskretnie z pewną stałą czasową  $T$  nazywaną okresem próbkowania.

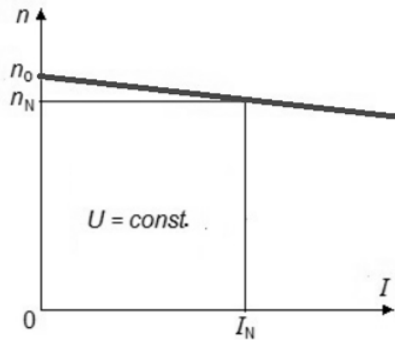
## REGULACJA PRĘDKOŚCI SILNIKA DC

Zaletą maszyn prądu stałego jest możliwość płynnej regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie. Prędkości te są różne w zależności od wielkości i rodzaju maszyn, dlatego mogą osiągać nawet do kilku tysięcy obrotów na minutę. W poniższej aplikacji wykorzystano niewielki silnik DC z magnesami trwałymi. Poniżej przedstawiono kształt charakterystyki mechanicznej przykładowego silnika DC.

Wzór 3 pozwala na określenie prędkości obrotowej silnika. Jak można zauważyć, istnieje możliwość sterowania prędkością za pomocą dodatkowej rezystancji w obwodzie wirnika, zmiany napięcia zasilania i zmiany strumienia  $\Phi$ .

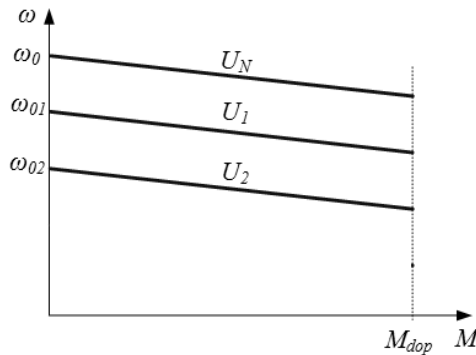
$$n = \frac{U - I_a R_a}{c\Phi} \quad (3)$$

gdzie:  $n$  – prędkość obrotowa silnika;  $U$  – napięcie zasilające;  $I_a$  – prąd twornika;  $R_a$  – rezystancja twornika;  $\Phi$  – strumień elektromagnetyczny w maszynie;  $c$  – stała zależna od budowy maszyny prądu stałego.



Rys. 2. Przykładowa charakterystyka mechaniczna silnika DC

Jedną z najczęściej stosowanych metod regulacji prędkości w napędach tego typu jest regulacja poprzez zmianę napięcia zasilającego układ. Wpływ napięcia zasilania na charakterystykę mechaniczną silnika prądu stałego przedstawia rysunek 3.

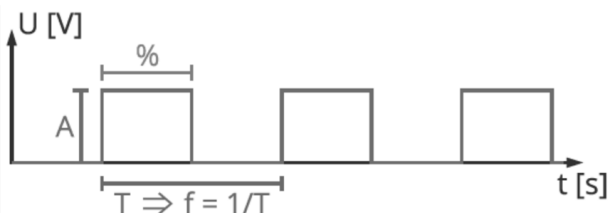


Rys. 3. Wpływ napięcia zasilania na charakterystykę mechaniczną silnika DC

Częstym sposobem realizacji sterowania napięciem silnika DC jest metoda PWM (ang. *Pulse Width Modulation*). Realizuje się ją poprzez zasilanie silnika napięciem przerywanym. Napięcie na wyjściu odbiornika, o charakterze indukcyjnym, ma postać ciągu impulsów prostokątnych. Wartość średnia napięcia jest



proporcjonalna do współczynnika wypełnienia, to jest stosunku czasu trwania stanu wysokiego do okresu przebiegu PWM. Pozwala to na zmianę napięcia średniego na silniku poprzez zmianę współczynnika wypełnienia. Metodę tę przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Idea sterowania PWM [2]

gdzie:  $T$  – okres przebiegu; amplituda sygnału;  $f$  – częstotliwość przebiegu; % – współczynnik wypełnienia.

## BUDOWA UKŁADU

Założeniem projektu jest wykonanie prostego układu pozwalającego na sterowanie prędkością silnika prądu stałego. Jako urządzenie sterujące wykorzystano STM32F4DISCOVERY realizującą algorytm PID. Sterowanie półmostkiem odbywa się za 2 wyjść sygnału PWM. Kolejnym elementem jest półmostek – układ dwóch tranzystorów wraz z driverami. Zapewnia on możliwość sterowania napięciem silnika oraz zapewnia izolację galwaniczną pomiędzy stroną logiczną a silnoprądową [1]. Następnie widzimy silnik prądu stałego oraz enkoder konieczny do pomiaru prędkości obrotowej silnika. Na rysunku 5 przedstawiono schemat ideowy układu.



Rys. 5. Schemat blokowy

Układ sterowanie został wykonany z zastosowaniem płytki rozwojowej STM32F4DISCOVERY, opartej na mikrokontrolerze STM32F407. Jest to popularna rodzina szeroko stosowanych mikrokontrolerów o dużej mocy obliczeniowej oraz częstotliwości taktowania do 180 MHz. Udostępnione przez producenta biblioteki HAL znacząco ułatwiają pracę z układem. Rysunek 6

przedstawia wykorzystany układ z mikrokontrolerem. Programowanie układu odbywa się z wykorzystaniem USB poprzez program STM32 ST-LINK Utility.



Rys. 6. Fotografia STM32F4DISCOVERY

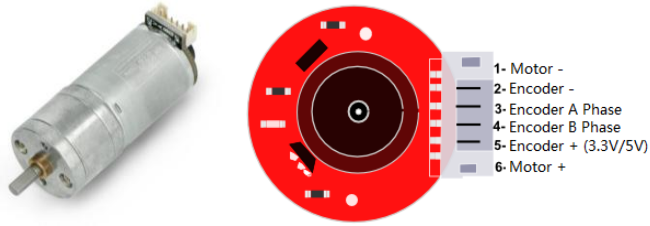
Do kluczowania silnika wykorzystano wcześniej wykonany układ półmostka. Jest on zbudowany na bazie dwóch tranzystorów pracujących w topologii half-bridge [1]. Do każdego z tranzystorów zastosowano osobny driver oraz przetwornicę DC–DC, konieczną do zapewnienia odpowiedniego poziomu napięcia na bramce tranzystora. Pozwala to na zachowanie separacji pomiędzy stroną logiczną układu, a stroną silnopiędową. Układ posiada zabezpieczenie nadprądowe półmostka. Rysunek 7 przedstawia fotografię półmostka.



Rys. 7. Fotografia półmostka[1]

## OBIEKT STEROWANIA

Jako obiekt sterowania wykorzystano silnik DC z magnesami trwałymi 6V/12 firmy DFRobot. Silnik wyposażony jest w przekładnię zespoloną z obudowa silnika oraz enkoder inkrementalny umieszczony na czopie silnika.

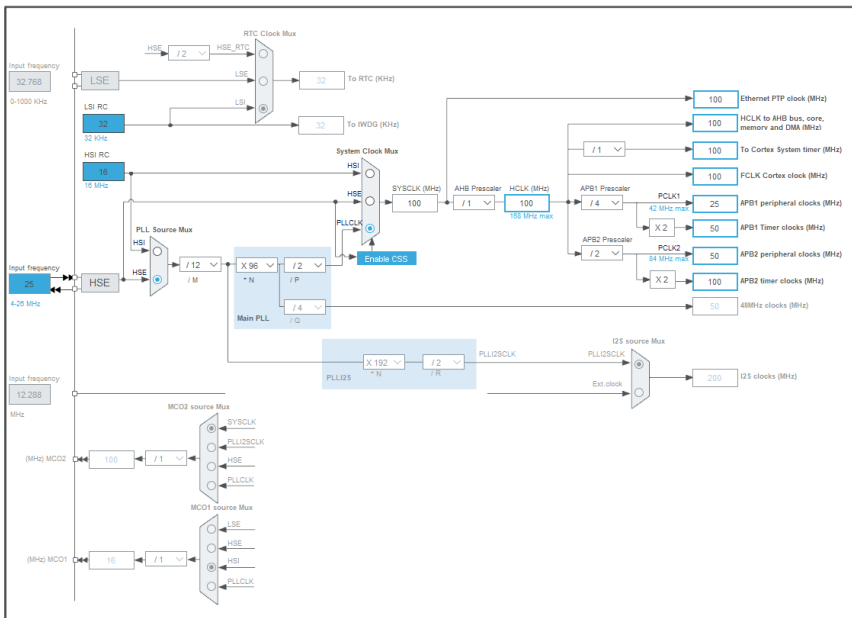


Rys.8. Silnik DC będący obiektem sterowania [3]

Enkoder jest dyskiem z magnesami trwałymi umieszczonym na wale. Za generowanie sygnału kwadraturowego, dla obu kanałów enkodera, odpowiedzialne są czujniki Halla, przesunięte względem siebie o kąt 90°. Rozdzielczość enkodera wynosi 10 impulsów na obrót, co po przeliczeniu przez współczynnik redukcji daje 341 impulsów na obrót wału.

## REALIZACJA ALGORYTMU STEROWANIA W MIKROKONTROLERZE STM32F407

Do stworzenia programu sterującego wykorzystano dedykowane oprogramowanie stworzone przez firmę STMicroelectronics – STM32CubeIDE.



Rys. 9. Konfiguracja zegarów mikrokontrolera

Konfigurację wstępną rozpoczęto od ustawienia taktowania zegara głównego oraz zegarów taktujących timery podłączone do magistrali APB1 magistrala *low-speed* oraz APB2 magistrala *high-speed*. Z racji większej dokładności oraz stabilności jako źródło taktowania wybrano zewnętrzny rezonator kwarcowy o taktowaniu 25 MHz. Sygnał z rezonatora został przeliczony przez blok pętli fazowej PLLCLK, co pozwoliło uzyskać taktowanie zegara głównego równe 100 MHz. Przy takim ustawieniu obie magistrale są taktowane z maksymalną dopuszczalną częstotliwością pracy: APB1 – 50 MHz, APB2 – 100 MHz; co widoczne jest na rysunku 9 (patrz rys. na s. 100).

## USTAWIA TIMERA GENERUJĄCEGO SYGNAŁ PWM

Do sterowanie półmostkiem wykorzystano timer 1. Jest to zaawansowany timer mikrokontrolera, mający możliwość generowania sygnału PWM wraz z wyjściem komplementarnym dla każdego z czterech kanałów.

Na rysunku 10. przedstawiono konfigurację timera 1 w środowisku Stm32CubeIDE. Kanał 1 timera ustawiony jest w tryb generacji sygnału PWM.

CH1 oraz CH1N informują, że aktywne są 2 wyjścia: zwykłe oraz komplementarne. W dalszej części przedstawione są parametry timera. Wartość preskalera wyznaczona jest na podstawie częstotliwości taktującej zegar timera oraz wymaganej wartości okresu (*Counter Period*). Jako że timer 1 jest podłączony do magistrali APB2 taktowany jest z częstotliwością 100 MHz. Wartość okresu  $ARR = 1000$  dobrano tak, by zapewnić możliwość sterowania wypełnieniem wyrażonym w procentach do jednego miejsca po przecinku. Preskaler został wyznaczony ze wzoru(3) tak, aby uzyskać częstotliwość sygnału równą 10 kHz.

$$f_{PWM} = \frac{f_{APB1}}{(1 + ARR)(1 + PSC)} \quad (4)$$

Wartość parametru *Dead Time* dobrano eksperymentalnie. Odpowiada on za ustawienie czasu opóźnienia wysterowania jednego z wyjść przy przejściu drugiego w stan niski. Ma to duże znaczenie przy sterowaniu półmostkiem, dając czas włączanemu tranzystorowi na odprowadzenie ładunków z obszaru dryfu i przejście w stan blokowania przed załączeniem drugiego tranzystora półmostka. Uniemożliwiając tym samym możliwość wystąpienia sytuacji, w której oba tranzystory półmostka znajdą się w stanie przewodzenia powodując zwarcie i uszkodzenie układu.

Trigger Source	Disable
Clock Source	Internal Clock
Channel1	PWM Generation CH1 CH1N
Channel2	Disable
Channel3	Disable
Channel4	Disable

**Configuration**

Reset Configuration

Parameter Settings  
 User Constants  
 NVIC Settings  
 DMA Settings  
 GPIO Settings

Configure the below parameters :

Search (Ctrl+F) [ ] [ ] [ ]

- Counter Settings
  - Prescaler (PSC - 16 bits value) 9
  - Counter Mode Center Aligned mode1
  - Counter Period (AutoReload Register - 16 bits value ) 999
  - Internal Clock Division (CKD) No Division
  - Repetition Counter (RCR - 8 bits value) 0
  - auto-reload preload Disable
- > Trigger Output (TRGO) Parameters
- > Break And Dead Time management - BRK Configuration
- > Break And Dead Time management - Output Configuration
  - Automatic Output State Disable
  - Off State Selection for Run Mode (OSSR) Disable
  - Off State Selection for Idle Mode (OSSl) Disable
  - Lock Configuration Off
  - Dead Time 5
- > PWM Generation Channel 1 and 1N
  - Mode PWM mode 1
  - Pulse (16 bits value) 0
  - Output compare preload Enable
  - Fast Mode Disable
  - CH Polarity High
  - CHN Polarity High

Rys. 10. Konfiguracja timera generującego sygnał PWM sterujący półmostkiem

## USTAWIA LICZNIKA OBSŁUGUJĄCEGO ENKODER

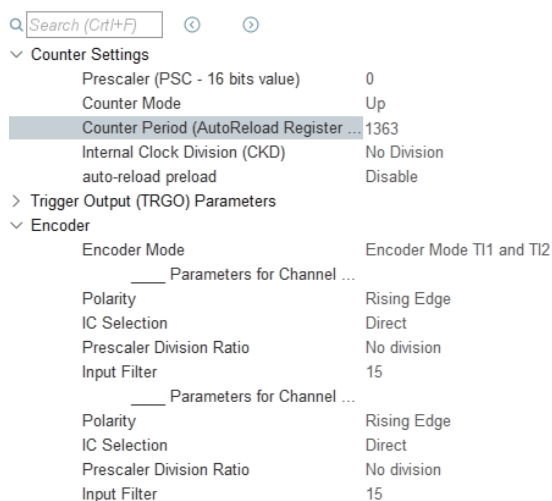
Do realizacji odczytywania sygnałów z faz A i B enkodera silnika użyto timera 2. Wykorzystano przy tym dedykowana funkcję *Encoder Mode*. Funkcja ta powoduje aktywowanie dwóch wejść mikrokontrolera umożliwiających podłączenie faz enkodera widocznych na rysunku 8 (patrz rys. na s. 98).

TIM2 Mode and Configuration

Mode	
Slave Mode	Disable
Trigger Source	Disable
Clock Source	Disable
Channel1	Disable
Channel2	Disable
Channel3	Disable
Channel4	Disable
Combined Channels	Encoder Mode

Rys. 11. Ustawienia trybu timera do obsługi enkodera

W dalszej części ustawiono parametry timera niezbędne do prawidłowej obsługi enkodera. Aby uzyskać więcej informacji z enkodera, co przełoży się na możliwość dokładniejszego określenia pozycji wału, a w efekcie prędkości obrotowej wirnika, w zakładce *Encoder Mode* widocznej na rysunku 12 ustawiono tryb *Encoder Mode T11 and T12*. W tym trybie wartość licznika w zależności od kierunku jest inkrementowana lub dekrementowana przy każdej zmiennej sygnali na obu kanałach enkodera, co pozwala uzyskać 2 razy więcej informacji niż w przypadku 2 pozostałych trybów.



Rys. 12. Konfiguracja timera do obsługi enkodera

Okres licznika (*Counter Period*) ustawiono tak, aby jego wartość stanowiła jeden pełen obrót wału. Jako że na jeden obrót wału przypada 341 impulsów enkodera oraz z każdego kanału pobierana jest informacja o każdej zmianie stanu to ilość zdarzeń powodujących inkrementację licznika jest 4 razy większa. Z tego powodu wartość okresu powinna wynosić minimalnie 1364. Ważnym aspektem jest również ustawienie wartości *Input Filter*. Parametr ten odpowiada za realizację filtra eliminującego zakłócenia na wejściach timera, które mogą wywoływać przekłamania przy inkrementacji bądź dekrementacji licznika.

## REALIZACJA PROGRAMU STERUJĄCEGO W JĘZYKU C

Bibliotekę w języku C, zawierającą algorytm regulatora PID, wykonano w oparciu o dostarczone przez producenta mikrokontrolera biblioteki HAL.

W pliku nagłówkowym `PID.h` umieszczono definicje stałych niezbędnych do działania algorytmu.

```
#define KP 5
#define KI 300
#define KD 0

#define ERROR_SUM_MAX 100000
#define ERROR_SUM_MIN -100000

#define PI_OUT_MAX 100000000
#define DIR __HAL_TIM_IS_TIM_COUNTING_DOWN(&htim2)
#define ENCODER_ARR TIM2->ARR
#define ENCODER_PPR 341

typedef enum{
    DIRECT = 0,
    REVERS = 1
}dir_t;
```

Rys. 13. Stałe zdefiniowane w pliku `PID.h`

Pierwsze trzy zdefiniowane stałe są wartościami wzmocnienia poszczególnych członów regulatora, które należy ustawić przed wgraniem programu na mikrokontroler. Kolejne dwie stałe są użyte do określenia zakresu zmiennej sumującej uchyb.

Stała `PI_OUT_MAX` określa maksymalny zakres dla wyjścia z regulatora. Do stałej `DIR` przypisane jest makro zdefiniowane w jednym z plików nagłówkowych mikrokontrolera (`stm32f4xx_hal_tim.h`). Wartością wejściową makra jest adres struktury timera pracującego w trybie *Encoder\_Mode*. Makro zwraca wartość 0 lub 1 w zależności czy wartość licznika jest inkrementowana czy dekrementowana. Stała `ENCODER_ARR` ma przypisaną wartość okresu timera obsługującego enkoder. Jako że `TIM2` jest w tym przypadku wskaźnikiem struktury timera 2, aby więc odwołać się do elementów struktury należy użyć operatora „->”. Ostatnia zdefiniowana stała to wartość impulsów enkodera przypadających na pełny obrót.

## PROCEDURA REALIZUJĄCA ALGORYTM PID

Na rysunku 14 przedstawiona jest procedura realizująca algorytm PID. Procedura `reg_speed_PID` jest funkcją typu `void` – nie zwraca żadnej wartości. Posiada ona jeden argument – *antiwp*; w przypadku kiedy argument ten ma wartość jeden algorytm PID realizuje funkcję antiwindup ograniczającą maksymalną i minimalną wartość sumy uchybu. Zmienne `PID_out_temp` oraz `er`

*ror\_change* są zmiennymi tymczasowymi wykorzystywanymi jedynie na potrzeby obliczeń wewnątrz procedury. Uchyb realizowany jest na podstawie różnicy między prędkością zadaną a aktualną prędkością wirnika.

*Error\_sum* jest zmienną przechowującą wartość sumy uchybu, potrzebną do realizacji członu całkującego, a sama operacja sumowania realizowana jest w wierszu 99 widocznym na rysunku 14. Ważne, aby zmienne *error*, *error\_prev* oraz *error\_sum* były zmiennymi znakowymi w innym przypadku algorytm nie będzie działał poprawnie.

W wierszu 101 znajduje się instrukcja warunkowa odpowiedzialna za włączenie filtra dyskretnego przeciwnasyceniowego – anti-windup. Wiersze 107 oraz 108 związane są z wyznaczeniem szybkości zmian uchybu potrzebnej do realizacji członu różniczkującego.

```
93 void reg_speed_PID(uint8_t antiwp)
94 {
95     int32_t PID_out_temp;
96     int32_t error_change;
97
98     error = (rpm_set - rpm_now);
99     error_sum += error;
100
101     if(antiwp == 1)
102     {
103         if(error_sum > ERROR_SUM_MAX) error_sum = ERROR_SUM_MAX;
104         if(error_sum < ERROR_SUM_MIN) error_sum = ERROR_SUM_MIN;
105     }
106
107     error_change = error_prev - error;
108     error_prev = error;
109     PID_out_temp = (KP * error) + (KI * error_sum) + (KD * error_change);
110
111     if(PID_out_temp > PI_OUT_MAX ) PID_out_temp = PI_OUT_MAX;
112     if(PID_out_temp < -PI_OUT_MAX ) PID_out_temp = -PI_OUT_MAX;
113
114     PID_out = PID_out_temp;
115     PID_pwm_duty = (uint16_t)(abs(PID_out)/100000);
116 }
```

Rys. 14. Funkcja regulatora prędkości PID

Wyrażenie z wiersza 109 odpowiada za wyznaczenie wartości wyjściowej algorytmu regulatora PID oraz przypisanie jej do zmiennej tymczasowej *PID\_out\_temp*. Taka realizacja związana jest z tym, że zanim wartość zostanie przypisana do zmiennej globalnej należy sprawdzić, czy nie przekracza ona określonych wartości. Zadaniem tego rozwiązania jest ograniczenie wartości wyjściowej tak, by można było ją przeliczyć na wartość wypełnienia PWM, oraz aby zapobiec sytuacji, w której nastąpi przepełnienie wartości zmiennej *PID\_out*.

*PID\_pwm\_out* przechowuje wartość wypełnienia przypisywaną w kolejnych etapach do odpowiedniego rejestru timera 1. Jako że *PID\_pwm\_out* jest



16-bitową zmienną bezznakową natomiast *PID\_out* 32-bitową zmienną znakową, wykorzystano funkcję *abs()* z biblioteki *stdlib.h* oraz rzutowanie.

## FUNKCJA WYZNACZAJĄCA PRĘDKOŚĆ OBROTOWĄ

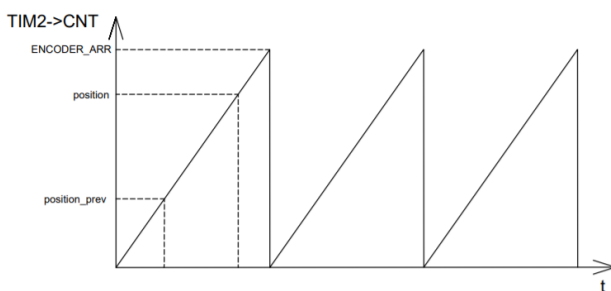
Funkcja *rpm\_update* służy do wyznaczania prędkości obrotowej. Jest przewidziana do cyklicznego wywoływania w przerwaniu co 1 milisekundę. Argumentem funkcji jest wartość milisekund, określająca częstotliwość wyznaczania prędkości obrotowej oraz wartości wypełnienia sygnału PWM sterującego półmostkiem. Po wyznaczeniu wartości funkcja zwraca 1. W przypadku zmiennych *position\_prev* oraz *mils\_temp* użyto kwalifikatora typu *static*, co jest wymagane do prawidłowego działania funkcji. Kwalifikator *static* użyty wewnątrz funkcji odpowiada za to, że wartość zmiennych lokalnych nie są kasowane po wyjściu z funkcji [7].

```
35@ uint8_t rpm_update(uint16_t mils)
36 {
37     static uint32_t position_prev = 0;
38     static uint16_t mils_temp = 0;
39
40     mils_temp++;
41     if(mils_temp > mils)
42     {
43         mils_temp = 0;
44
45         if(DIR == DIRECT)
46         {
47             if(position > position_prev)
48                 rpm_now = (position - position_prev) * 60 * (1000/mils) / (ENCODER_PPR * 4);
49             if(position < position_prev)
50                 rpm_now = ((ENCODER_ARR-position_prev) + position) * 60 * (1000/mils) / (ENCODER_PPR * 4);
51         }
52
53         if(DIR == REVERSES)
54         {
55             if(position < position_prev)
56                 rpm_now = (position_prev - position) * 60 * (1000/mils) / (ENCODER_PPR * 4);
57             if(position > position_prev)
58                 rpm_now = ((ENCODER_ARR-position) + position_prev) * 60 * (1000/mils) / (ENCODER_PPR * 4);
59         }
60
61         position_prev = position;
62         reg_speed_PID(1);
63         return 1;
64     }
65     return 0 ;
66 }
67 }
```

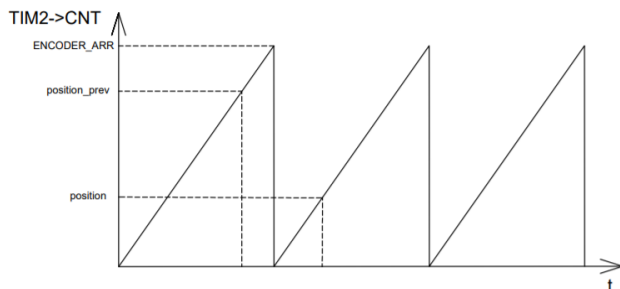
Rys. 15. Funkcja realizująca wyznaczanie prędkości obrotowej

Zgodnie z wierszem 40 każde wejście do funkcji *rpm\_update* powoduje inkrementację *mils\_temp*. Kiedy wartość *mils\_temp* przekroczy wartość *mils*, wyznaczone są wartości *rpm\_now*, po czym wywoływana funkcja regulatora z anti-windup'em. Następnie zerowana jest zmienna *mils\_temp*, a sama funkcja *rpm\_update* zwraca wartość 1.

Wyznaczanie wartości prędkości obrotowej jest zależne od kierunku wirowania wału silnika oraz relacji między aktualną a poprzednią wartością pozycji wału określoną przez rejestr CNT timera 2. Aby poprawnie wyznaczyć prędkość obrotową, należy rozważyć 2 przypadki, które przedstawiono na Rys. 16 oraz 17. W pierwszym przypadku, przy założeniu, że kierunek obrotu wału silnika powoduje inkrementację wartości licznika, kolejna pobrana wartość pozycji silnika jest większa od poprzedniej (Rys. 16). Taką sytuację uwzględnia instrukcja warunkowa przedstawiona w wierszu 47 oraz 48. Drugi przypadek występuje, kiedy pobranie nowej wartości pozycji wału następuje po przepełnieniu i zresetowaniu licznika. Wartość aktualnej pozycji wału jest w tej sytuacji mniejsza od wyznaczonej w poprzednim wywołaniu funkcji – przedstawia to Rys. 17. Aby wyznaczyć prędkość obrotową od wartości okresu odejmowana jest wartość poprzedniej pozycji wału, a następnie do tej różnicy dodawana jest wartość aktualnej pozycji wału (wiersz 49 oraz 50).



Rys. 16. Charakterystyka zmian wartości rejestru CNT timera, kiedy wartość aktualnej pozycji wału jest większa od poprzedniej wyznaczonej wartości



Rys. 17. Charakterystyka zmian wartości rejestru CNT timera, kiedy wartość aktualnej pozycji wału jest mniejsza od poprzedniej wyznaczonej wartości

Poprawne wyznaczenie zmiany pozycji wału w czasie jest jednym z elementów wyznaczania ostatecznej wartości prędkości obrotowej przedstawionej w obrotach na minutę. Funkcja *rpm\_update* wywoływana jest co 1 milisekundę, natomiast wartość prędkości obrotowej wyznaczana co okres określony argumentem *mils*. Mianownik wzoru (4) służy do przeliczenia wartości na obroty, przy czym wartość 4 związana jest z opisywanym już trybem pracy enkodera, natomiast licznik wyrażenia służy przeliczeniu liczby obrotów na minuty.

$$rpm\_now = (position - position\_prev) \cdot \frac{60 \cdot \frac{1000}{mils}}{ENCODER\_ARR \cdot 4} \quad (5)$$

## PROGRAM GŁÓWNY MAIN.C

Użycie wyżej opisanych funkcji jest możliwe po zaimplementowaniu biblioteki zawierającej algorytm sterowania.

```

26Ⓣ /* Private includes -----*/
27 /* USER CODE BEGIN Includes */
28 #include "PID.h"
29 /* USER CODE END Includes */
30
31Ⓣ /* Private typedef -----*/
32 /* USER CODE BEGIN PTD */
33
34 /* USER CODE END PTD */
35
36Ⓣ /* Private define -----*/
37 /* USER CODE BEGIN PD */
38 /* USER CODE END PD */
39
40Ⓣ /* Private macro -----*/
41 /* USER CODE BEGIN PM */
42
43 /* USER CODE END PM */
44
45 /* Private variables -----*/
46
47 /* USER CODE BEGIN PV */
48 extern volatile uint32_t rpm_now;
49 extern volatile uint32_t rpm_set;
50 extern volatile int32_t PI_out;
51 extern volatile uint16_t PI_pwm_duty;
52 extern volatile uint32_t position;

```

Rys. 18. Implementacja biblioteki oraz odwołanie się do zmiennych

W przypadku zmiennych związanych z regulatorem użyto kwalifikatora *extern* informującego kompilator, że dane zmienne są zadeklarowane w innym pliku projektu [7]. Kolejnym korkiem jest uruchomienie liczników odpowiadających za generowanie sygnału PWM oraz obsługę enkodera.

```

97  /* USER CODE BEGIN 2 */
98  HAL_TIM_PWM_Start(&htim8, TIM_CHANNEL_1);
99  HAL_TIMEx_PWMN_Start(&htim8, TIM_CHANNEL_1);
100 HAL_TIM_Encoder_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_1);
101 HAL_TIM_Encoder_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_2);
102
103  /* USER CODE END 2 */

```

Rys. 19. Uruchomienie liczników

Uruchomienie liczników odbywa się w funkcji *main()* przed pętlą główną programu. W przypadku wszystkich funkcji przedstawionych na rysunku 19 atrybutami są kolejno: adres struktury licznika, określane również jako uchwyt (ang. *handle*) oraz rejestr kanału. Pierwsza z funkcji uruchamia wyjście zwykłe timera 1 w trybie PWM, natomiast druga odnosi się do wyjścia komplementarnego. Linijki 100 oraz 101 odpowiadają za obsługę dwóch kanałów timera 2 wymaganych do pracy enkodera.

Do przypisywania wartości rejestru CNT timera 2 zmiennej *position* oraz wywoływania funkcji *rpm\_update* użyto licznika systemowego SysTick, który wywołuje przerwanie co jedną milisekundę. Obsługę przerwania można wykonać w pliku *stm32f4xx\_it.c* (Rys.20) lub pliku głównym *main.c* (Rys. 21).

```

185 void SysTick_Handler(void)
186 {
187     /* USER CODE BEGIN SysTick_IRQn 0 */
188     position = TIM2->CNT1;
189     if(rpm_update(10) == 1) TIM1->CCR1 = PID_pwm_duty;
190     /* USER CODE END SysTick_IRQn 0 */
191     HAL_IncTick();
192     /* USER CODE BEGIN SysTick_IRQn 1 */

```

Rys. 20. Obsługa timera SysTick

```

160 /* USER CODE BEGIN 4 */
161 void HAL_SYSTICK_Callback(void)
162 {
163     position = TIM2->CNT1;
164     if(rpm_update(10) == 1) TIM1->CCR1 = PID_pwm_duty;
165 }
166 /* USER CODE END 4 */

```

Rys. 21. Obsługa przerwania timera SysTick

## WYNIKI I PODSUMOWANIE

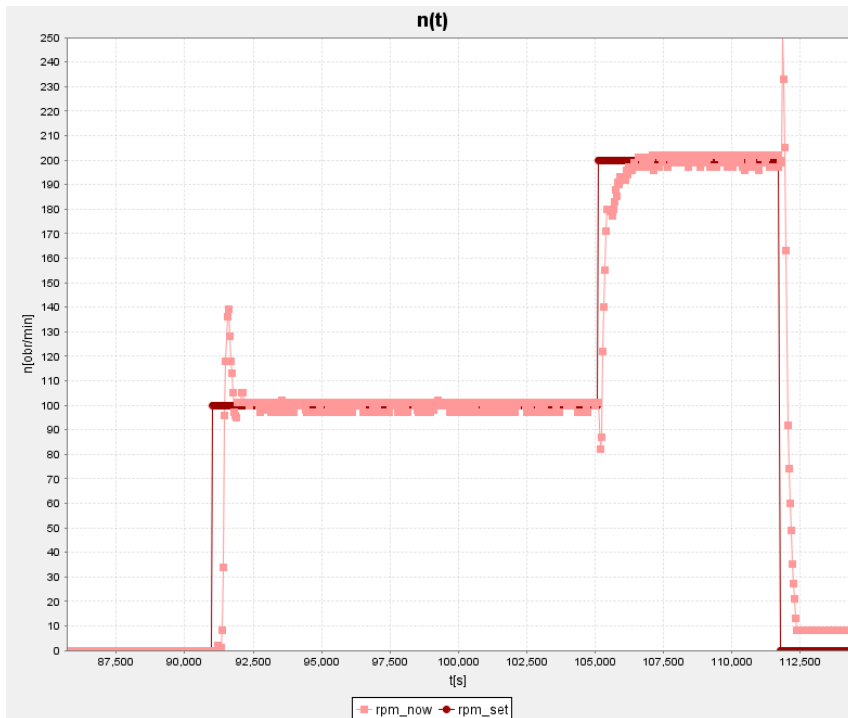
Do zarejestrowania wyników działania zaimplementowanego regulatora PID wykorzystano oprogramowanie STMStudio pozwalające na podgląd zmiennych w czasie rzeczywistym. Na przedstawionych poniżej rysunkach zaprezentowano

działanie algorytmu dla regulatora PI oraz PID. Jak widać algorytm działa poprawnie dostosowując prędkość obrotową wału silnika do prędkości zadanej. Przy zwiększaniu momentu obciążenia na wale silnika następuje wzrost wypełnienia sygnału PWM, a więc również wartości średniej napięcia zasilającego, dlatego w określonym zakresie obciążenia silnik utrzymuje względnie stałą prędkość obrotową. Minimalne oscylacje po ustaleniu się prędkości obrotowej związane są z błędami enkodera wynikającymi z jego małej rozdzielczości. Zastosowanie enkodera wyższej klasy powinno zniwelować ten efekt.

Przedstawiony artykule sposób realizacji regulatora dyskretnego PID dotyczy algorytmu o podstawowej funkcjonalności i w obecnej formie może służyć do celów edukacyjnych.



Rys. 22. Wykres prędkości obrotowej w funkcji czasu dla regulatora PI



Rys. 23. Wykres prędkości obrotowej w funkcji czasu dla regulatora P

## LITERATURA

- [1] Wereda P., Brzozowicz P., *Projekt i wykonanie półmostka IGBT z wykorzystaniem driverów specjalizowanych*, Praca inżynierska, Politechnika Lubelska, 2021
- [2] Blog tematyczny, <https://forbot.pl/blog/kurs-stm32-f4-1-czas-poznac-hal-spis-tresci-kursu-id14114>, zasoby z dnia 10.01.2021
- [3] Dokumentacja techniczna silnika, <https://www.dfrobot.com/product-1617.html>, zasoby z dnia 10.01.2021
- [4] Dokumentacja techniczna mikrokontrolera STM32F4, <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html>, zasoby z dnia 10.01.2021
- [5] Kurczyk A., *Mikrokontrolery STM32 dla początkujących*, BTC, 2019,
- [6] Kolano K., *Materiały z wykładów: Mikroprocesorowe sterowanie układów napędowych*, Politechnika Lubelska
- [7] Drzymała B., *Materiały z laboratorium: Mikroprocesorowe sterowanie układów napędowych*, Politechnika Lubelska, Lublin 2020
- [8] Prat S., Język C. *Szkola Programowania*. Wydanie VI, Helion, 2016.

## **PROJEKTOWANIE INSTALACJI ELEKTRYCZNEJ W DOMU JEDNORODZINNYM**

### **WSTĘP**

Nowoczesne instalacje elektryczne powinny być zaprojektowane i wykonane nie tylko w sposób bezpieczny, ale przewyższający standardy. Zmusza nas do tego ciągły postęp techniczny, dla którego ważną rolę gra jakość. Należy zapewnić poprawną pracę urządzeń gospodarstwa domowego na długotrwały okres czasu za względnie niską cenę. Użytkownicy powinni mieć możliwość korzystania z urządzeń elektrycznych bez ograniczeń w sposób niezawodny i bezproblemowy. Szybki rozwój technologii sprawia, że trzeba przewidywać przyszłość i projektować instalacje elektryczne tak by wszystkie komponenty mogły pasować i wspólnie działać.

Budowa domu jest poważnym przedsięwzięciem, więc aby uniknąć dodatkowych kosztów związanych z modernizacją należy poprawnie rozplanować, w jaki sposób ma przebiegać instalacja elektryczna. Jest to temat ważny, ponieważ instalacja elektryczna powinna być przemyślana oraz dopasowana do pomieszczeń, ponadto nie może krzyżować się z innymi instalacjami. Istotne jest, przygotowanie schematu zgodnie z obowiązującymi przepisami i normami.

### **WYBRANE AKTY PRAWNE OBEJMUJĄCE INSTALACJE ELEKTRYCZNE**

Jedną z podstawowych ustaw określających wymagania odnośnie projektowania, budowy i eksploatacji urządzeń oraz instalacji elektrycznych i piorunochronnych jest Prawo Budowlane [6]. Najistotniejszym aktem wykonawczym danego Prawa jest Rozporządzenie Ministra Infrastruktury precyzujące parametry dostarczenia energii do odbiorników, ochronę przed porażeniem, przepięciami łączeniowymi i atmosferycznymi i innymi szkodami. Kolejną główną ustawą jest Prawo Energetyczne [7] określające ogólny całokształt polityki ener-

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, [anna.stawska@pollub.edu.pl](mailto:anna.stawska@pollub.edu.pl)

getycznej państwa m. in. produkcję przedsiębiorstw energetycznych czy warunki zaopatrzenia w paliwo i energię.

Normy są powszechnie wykorzystywane, stosowane dobrowolnie i zatwierdzone przez Polski Komitet Organizacyjny. Norma N SEP 002 określa podstawowe założenia planowania instalacji elektrycznych w budynkach mieszkalnych. Informuje ona między innymi o zalecanej minimalnej ilości obwodów odbiorczych, gniazd wtyczkowych i wypustów oświetleniowych. Zawiera także wytyczne dotyczące prowadzenia przewodów i rozmieszczenia urządzeń. Norma PN-HD 60364 składa się z wielu części m.in. części 4–41 dotyczącej ochrony przed porażeniem elektrycznym, ochrony przeciwpożarowej jak i układów uziemiających i przewodów ochronnych. W innej części 5–52 zapisano wymagania odnośnie rodzaju oprzewodowania, przekroju przewodów czy też spadku napięcia w instalacjach odbiorczych.

## **PRZEDMIOT OPRACOWANIA**

Przedmiotem niniejszego opracowania jest projekt wykonawczy w zakresie instalacji elektrycznych wewnętrznych i zewnętrznych dla budynku mieszkalnego jednorodzinnego w Tereszynie w gm. Konopnica, dz. o nr ew. 12/4.

Jest to dom jednorodzinny piętrowy (parter, I piętro, poddasze), przeznaczony dla 4 osobowej rodziny. Na parterze znajduje się przestronny salon z jadalnią, kuchnią, pokojem, łazienką, wiatrołapem, spiżarnią oraz pomieszczeniem gospodarczym. Na piętrze usytuowano 3 sypialnie oraz łazienkę, a na poddaszu pomieszczenie użytkowe. Budynek posiada konstrukcję szkieletową murowaną a zastosowane do jego budowy materiały są trudno zapalne. Należy do grupy budynków niskich (N).

Zasilanie budynku stanowi trójfazowa linia kablowa z sieci nn 400/230 V. Złącze kablowe ZK3a+2p oraz tablica licznikowa wykonane zostały według odrębnego opracowania projektowego. Zgodnie z technicznymi warunkami przyłączenia wydanymi przez dystrybutora. Sieć elektroenergetyczna OSC (Operatora Sieci Dystrybucyjnej) pracuje w układzie TN-C natomiast układ sieci u odbiorcy zostaje zmieniony na TN-C-S [1].

## **DOBÓR ILOŚCI OSPRZĘTU**

Wielu inwestorów próbując oszczędzić na materiale narzuca zamontowanie minimalnej ilości gniazd wtyczkowych i wypustów oświetleniowych lub zmniejszenie liczby obwodów czy przekroju przewodów. Wszystko to powoduje

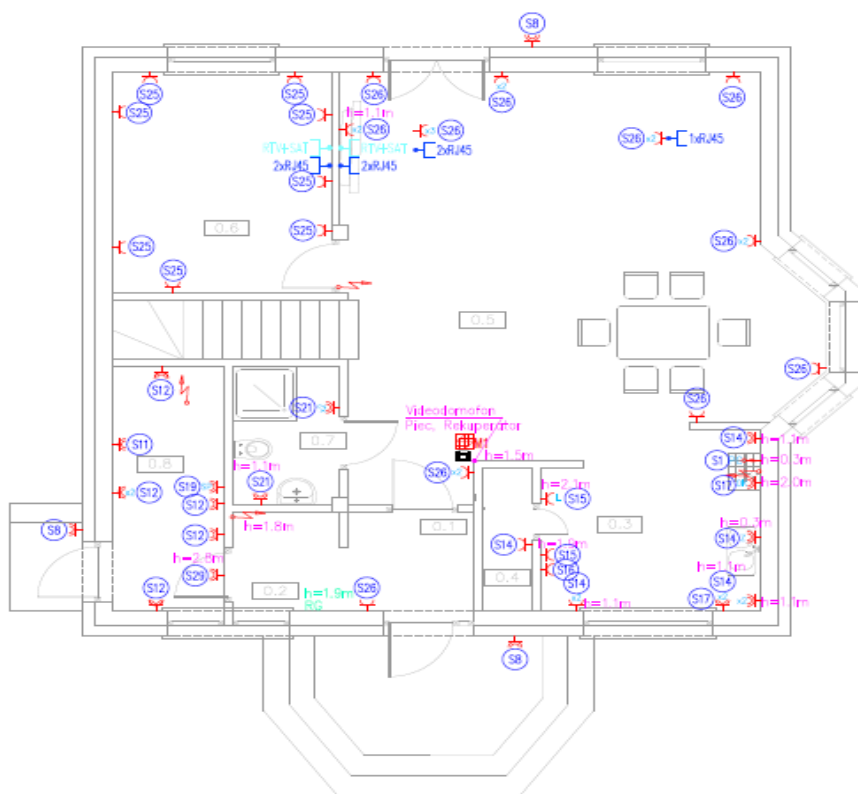


późniejsze problemy np. okazuje się, że trzeba używać przedłużaczy, co wcale nie wygląda estetycznie i nie jest funkcjonalne. Z biegiem czasu uciążliwości wynikające z ubogiej w osprzęt instalacji potrzebują modernizacji by polepszyć wygodę użytkownikom.

Należy przewidzieć:

- nie mniej niż 2 gniazda wtyczkowe podwójne w pokojach, na każde 4–6 m<sup>2</sup> powinno przypadać 1 gniazdo
- jedno gniazdo 16 A w kuchni oraz 4–5 gniazd ze stykiem ochronnym
- jedno gniazdo w miejscu dogodnym dla wszystkich na korytarzu
- jedno gniazdo 16 A do zasilania pralki w łazience oraz 2 gniazda ze stykiem ochronnym.

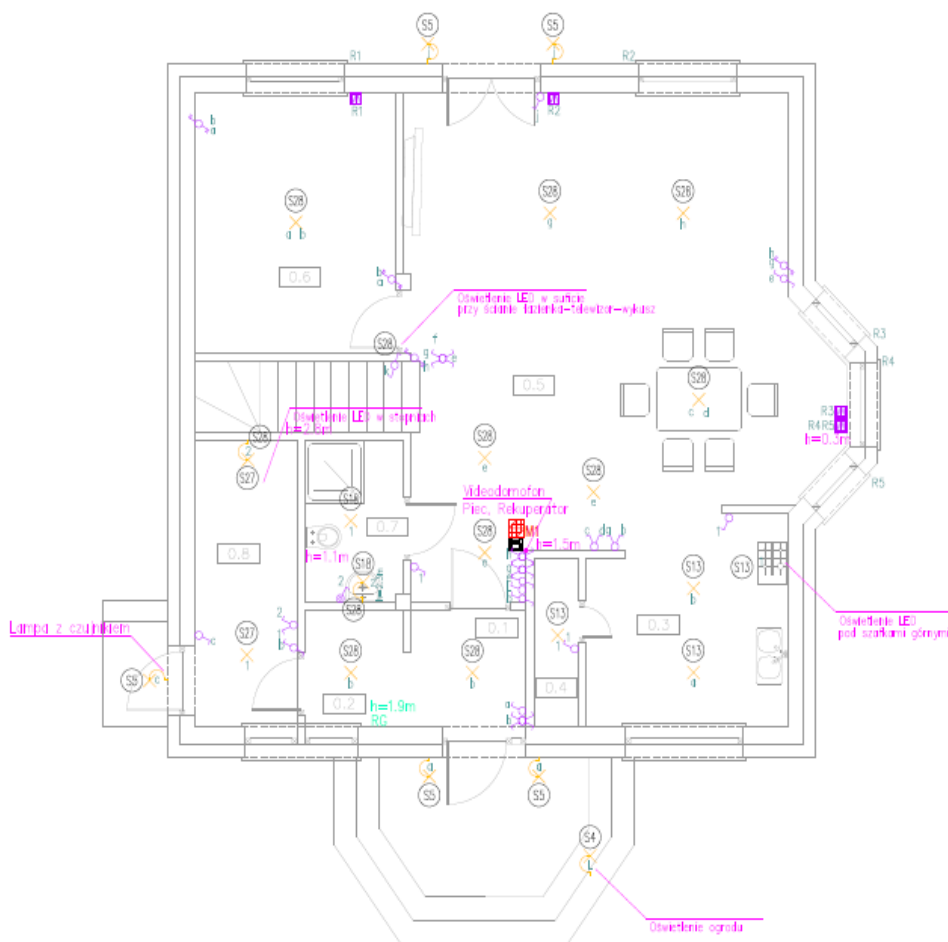
Ponadto zaleca się, by instalować gniazda ze stykiem ochronnym zamiast gniazd z bolcem ochronnym, który blokuje włożenie wtyczek dwubiegunowych odbiorników zerowej klasy ochronności.



Rys. 1. Rzut poziomy parteru wraz z naniesionymi symbolami gniazd wtyczkowych

Zgodnie z wyznaczonymi poziomymi i pionowymi strefami instalacyjnymi:

- łączniki montuje się na wysokości 1,15 m ponad powierzchnią podłogi
- gniazda na wysokości 0,3 m ponad gotową powierzchnią podłogi
- gniazda i łączniki w pomieszczeniach typu kuchnia czy łazienka na wysokości nie niższej niż zalecane 1,05 m ponad gotową powierzchnią podłogi.

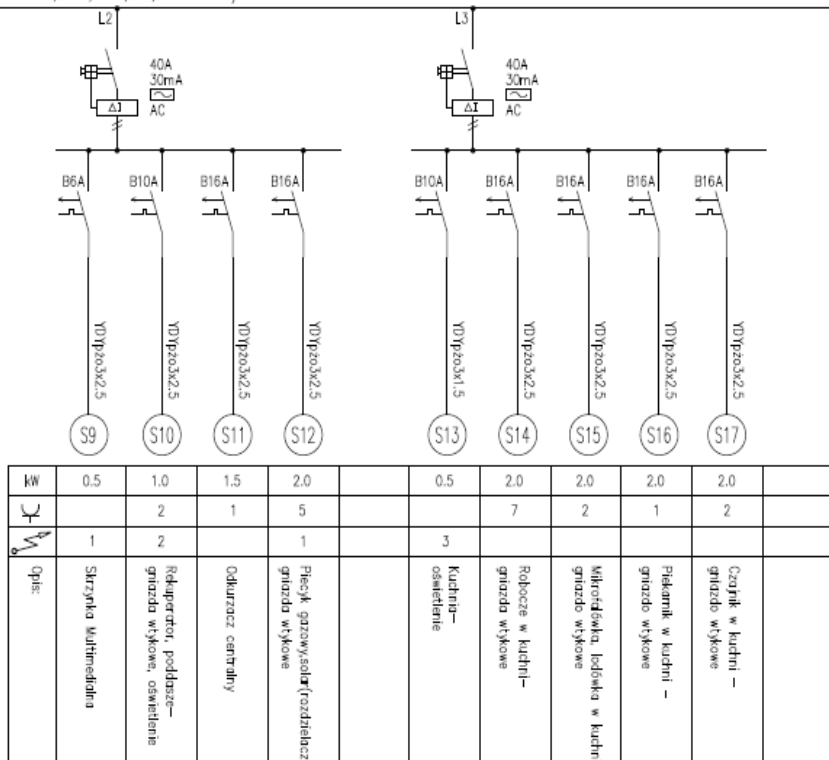


Rys. 2. Rzut poziomy parteru z naniesionymi symbolami łączników i wypustów oświetleniowych

Podział instalacji na kilkanaście obwodów pozwala na selektywne ich wyłączenie w przypadku awarii oraz zapewnia skuteczniejszą ochronę przed przecięciem lub porażeniem. Ułatwia również bezpieczne sprawdzenie instalacji i jej konserwację.

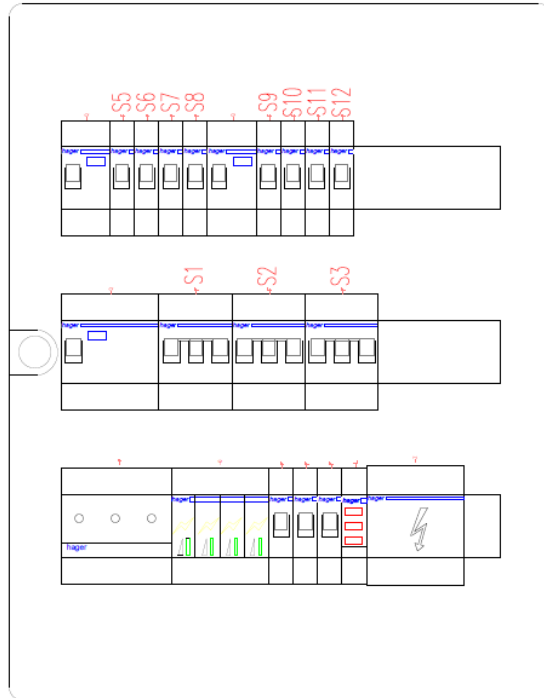
Wymagana liczba obwodów ogólnego przeznaczenia zależy od liczby, rodzaju i mocy zainstalowanych odbiorników. Do jednego obwodu nie należy przyłączać więcej niż 10 gniazd, przy czym gniazda podwójne lub potrójne liczy się jako jedno gniazdo [2]. Odbiorniki o mocy ponad 2 kW, takie jak kuchnie elektryczne, zmywarki do naczyń czy urządzenia klimatyzacyjne, powinny być zasilane z osobnych obwodów.

RG c.d. L1, L2, L3, N, PE 230/400V 50Hz



Rys. 3. Fragment schematu ideowego rozdzielnic głównej

Rozdzielnica została zaprojektowana jako tablica podtynkowa firmy Hager. Jej zasilanie wykonano kablem YKYFty 4 x 10 mm<sup>2</sup>. Parametry: obudowa w II klasie izolacji, stopień ochrony IP40. Aby zmniejszyć koszty wykonania instalacji RG podzielono na dwie małe rozdzielnice, które umieszcza się jedna pod drugą w wiatrołapie. W rozdzielnicy umieszczono rozłącznik główny, ochronnik przepięciowy oraz zabezpieczenia poszczególnych obwodów.



Rys. 4. Fragment schematu modułowego rozdzielnic głównej

## OGÓLNE ZASADY DOBORU PRZEWODÓW I KABLI ELEKTRO-ENERGETYCZNYCH

Aby nie doprowadzić do przedwczesnego zużycia przewodów i kabli energetycznych poprzez szkodliwe oddziaływanie środowiska lub ich nadmierne nagrzewanie podczas normalnej pracy należy wyznaczyć przekrój przewodów ze względu na obciążalność prądową długotrwałą.

Prąd obliczeniowy dla obwodu jednofazowego wyznacza jako:

$$I_B = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi} \quad (1)$$

gdzie  $P$  – moc czynna,  $U$  – napięcie fazowe,  $\cos\varphi$  – współczynnik mocy.

Minimalny przekrój przewodu dobieramy na podstawie wyznaczonego prądu obliczeniowego.

$$I_d > I_B \quad (2)$$

gdzie  $I_d$  – dopuszczalna długotrwała obciążalność przewodu.

Zabezpieczenia przed prądem przeciążeniowym powinny spełniać następujące warunki:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \quad (3)$$

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z \quad (4)$$

gdzie  $I_Z$  – obciążalność długotrwała przewodów,  $I_N$  – prąd znamionowy urządzenia zabezpieczającego,  $I_2$  – prąd zadziałania urządzenia zabezpieczającego (przyjęto dla bezpieczników –  $1,6 \cdot I_N$ , a dla wyłączników instalacyjnych –  $1,45 \cdot I_N$ )

Zapobieganie występowaniu przeciążeń cieplnych i mechanicznych w przewodach jest możliwe przy odpowiednim dobraniu zabezpieczenia i przekroju przewodów. Sprawdzenia założonego kabla pod względem wytrzymałości na nagrzewanie prądem zwarciovym dokonujemy korzystając ze wzoru:

$$S = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{I^2 \cdot t_w}{l}} \quad (5)$$

gdzie  $k$  – współczynnik dopuszczalnej gęstości prądu (przyjęto  $k = 115$ ),  $(I^2 \cdot t_k)$  – całka Joule'a (odczytano z charakterystyki dla zabezpieczenia C25 ( $I^2 \cdot t_k = 17500$ )).

Sprawdzenie skuteczności ochrony przed porażeniem dla zwarcia jednofazowego przez samoczynne wyłączenie zasilania wyznacza się na podstawie wzorów

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{Z_k} I_a \quad (6)$$

$$I_k'' > I_a \quad (7)$$

gdzie  $Z_k$  – impedancja pętli zwarcia,  $I_a$  – prąd powodujący zadziałanie wyłącznika.

Spadki napięcia dla obwodów jednofazowych obliczono na podstawie wzoru

$$\Delta U_{\%} = \frac{200 \cdot P \cdot l}{\gamma \cdot s \cdot U_n^2} \quad (8)$$

Natomiast dla obwodów trójfazowych ze wzoru:

$$\Delta U_{\%} = \frac{100 \cdot P \cdot l}{\gamma \cdot s \cdot U_n^2} \quad (9)$$

gdzie:  $P$  – moc obwodu,  $l$  – długość obwodu,  $\gamma$  – konduktywność przewodu,  $s$  – przekrój przewodu,  $U_n$  – napięcie znamionowe.

Zgodnie z normą [4] spadek napięcia powinien nie przekraczać 4% od złącza do końca obwodu.

## PODSUMOWANIE

Niniejszy artykuł formułuje następujące wnioski:

- wykonanie precyzyjnego projektu instalacji z odpowiednią ilością gniazd wtykowych i punktów oświetlenia ułatwi funkcjonalność obiektu, zmniejszy liczbę przedłużaczy a co za tym idzie poprawi jego wygląd estetyczny
- obwody instalacji elektrycznej powinny być równomiernie obciążone, dokonując ich podziału należy zwrócić uwagę na ich liczbę (co pozwoli na ich selektywne wyłączenie w przypadku awarii) oraz moc instalowanych urządzeń elektrycznych
- dostosowanie rozmieszczenia wypustów oświetlenia do charakteru pomieszczenia ulepsza jego wystrój poprzez optyczne powiększenie a dobra lokalizacja łączników poprawia wygodę użytkowników.

## LITERATURA

- [1] Boczkowski A., *Wymagania techniczne dla instalacji elektrycznych niskiego napięcia*, Wyd. Medium, Konstancin-Jeziorna 2008
- [2] Markiewicz H., *Instalacje elektryczne*, Wyd. WNT, Warszawa 2001
- [3] Niestępski S., Parol M., Pasternakiewicz J., Wiśniewski T., *Instalacje Elektryczne-budowa, projektowanie i eksploatacja*, Wydawnictwo OWPW, Warszawa 2001
- [4] Norma: PN-HD 60364, Instalacje elektryczne niskiego napięcia
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz. U. 2007 nr 93 poz. 623
- [6] Ustawa z dnia 7 lipca 1994r. Prawo Budowlane, Dz. U. 2017 poz. 1332
- [7] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997r. Prawo energetyczne, Dz. U. 2017 poz. 220.

## UKŁADY NAPEĐOWE W DRONACH CYWILNYCH

### WSTĘP

Ostatnia dekada przyniosła znaczny postęp w dziedzinie technologii bezzałogowych statków powietrznych (ang. *unmanned aerial vehicle, UAV*), potocznie zwanych *dronami*. Podobnie jak wiele innych technologii (takich jak Internet czy system nawigacji GPS) drony swoje korzenie mają w wojskowości. Militarne zastosowania obejmują głównie obserwację i rozpoznanie, ale stosowane są również uzbrojone drony przeznaczone bezpośrednio do działań bojowych.

Bezzałogowe statki powietrzne znalazły jednak również szeroki wachlarz zastosowań cywilnych. Używa się ich m.in. w ratownictwie przy poszukiwaniu ludzi zaginionych np. w górach lub jaskiniach, co pozwala na ograniczenie zagrożenia dla życia i zdrowia zespołu ratowniczego. W ostatnich latach rozwinął się również rynek konsumencki – drony można zakupić obecnie w większości dużych sklepów z elektroniką (zarówno gotowe modele jak i zestawy do samodzielnego montażu). Tematem niniejszej pracy jest omówienie układów napędowych stosowanych obecnie w dronach cywilnych, szczególnie dronów wielowirnikowych, przeznaczonych do użytku przez amatorów i hobbystów.

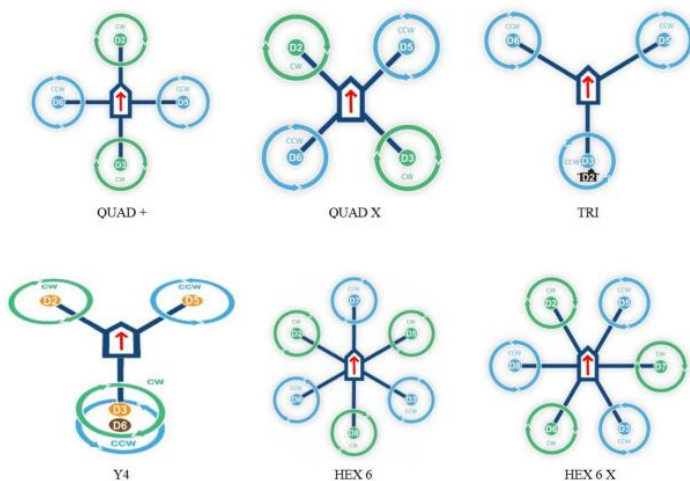
### BUDOWA I UKŁAD NAPEĐOWY DRONA WIELOWIRNIKOWEGO

W najprostszych słowach, dron wielowirnikowy (potocznie zwany multikopterem/multicopterem) składa się z płatowca (kadłuba) zawierającego podzespoły takie jak system kontroli lotu, układ kontroli prędkości czy źródło energii, ramy oraz silników z zamontowanymi śmigłami. Mogą występować w różnych konfiguracjach, zależnie od liczby ramion, na końcach których zamontowane są śmigła. Można więc mówić o bicopterach, tricopterach, quadcopterach, hexacopterach lub octocopterach. Dodatkowo multikoptery sklasyfikować można pod względem układów śmigieł względem kierunku lotu. Rozróżnia się m.in. układ + (jedno śmigło wiodące), X (dwa śmigła wiodące przy parzystej liczbie

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, k.siedliski@gmail.com

śmigieł) lub Y (ramiona ułożone w kształcie litery Y, jedno lub dwa śmigła mogą być wiodące). Ogólnie można przyjąć, że konstrukcje z większą liczbą ramion zapewniają większą stabilność lotu. Dodatkowo na każdym ramieniu można zamontować po dwa śmigła (na górze i na dole) kręcące się w przeciwnie strony, co zwiększa siłę nośną multikoptera oraz jego odporność na wpływ wiatru. Rynek konsumencki zdominowany jest przez quadcoptery w konfiguracji X.



Rys. 1. Podstawowe konfiguracje multikopterów (źródło: [theuavguide.com/wiki/Multicopter](http://theuavguide.com/wiki/Multicopter))

Układ napędowy drona powinien być dostosowany do jego rozmiarów, masy, przeznaczenia, wytrzymałości itp. Istotnymi wielkościami są gęstość mocy i gęstość energii. Gęstość mocy oznacza ilość mocy, jaką może wytworzyć układ napędowy względem swojej objętości, a gęstość energii to ilość energii zgromadzonej w źródle energii względem jego objętości. Dodatkowo używa się pojęcia energii właściwej źródła – energii zgromadzonej w jednostce jego masy.

W dronach komercyjnych stosuje się elektryczne układy napędowe. Na taki układ składają się silniki, układ kontroli prędkości, śmigła i źródło energii.

## SILNIKI

Silniki elektryczne charakteryzują się wysoką sprawnością i łatwością sterowania. Dodatkowo są lekkie, co jest korzystne w przypadku multikopterów o małych rozmiarach, ponieważ układ napędowy drona stanowi do 60% jego całkowitej wagi. Stosowane mogą być zarówno silniki szczotkowe jak



i BLDC, choć te drugie są spotykane znacznie częściej i są korzystniejsze ze względu na wyższą sprawność oraz żywotność (nie posiadają szczotek, które zużywają się w wyniku ścierania i wypalania łukiem elektrycznym), a także mniejszą masę [2].

Silnik BLDC nie posiada komutatora przełączającego kierunek prądu w uzwojeniach (a co za tym idzie, nie posiada również szczotek doprowadzających doń napięcie). Komutacja realizowana jest elektronicznie. Uzwojenia są zasilane sekwencyjnie: w każdym momencie ruchu jedna faza jest spolaryzowana dodatnio, druga ujemnie, a trzecia jest bez zasilania. Układ zasilający musi znać położenie wirnika w danym momencie, aby „wiedzieć”, jak przełączyć zasilanie faz tak, aby utrzymać ruch. W tym celu na stojanie montowane są czujniki Halla (zazwyczaj trzy). Kiedy biegun magnesu wirnika mija czujnik, ten sygnalizuje stan wysoki lub niski zależnie od tego, czy był to biegun północny czy południowy. Na podstawie sygnałów ze wszystkich czujników, układ zasilający silnik jest w stanie określić położenie wirnika i decyduje, jak zasilić poszczególne fazy w danym momencie. Komutacja może być też realizowana bez użycia czujników Halla, poprzez obwód wykrywający przejście siły elektromotorycznej indukowanej w silniku przez zero. Rozwiązanie to nie działa zbyt dobrze przy niskich prędkościach, ale jest tanie i przydatne w pewnych zastosowaniach [8].

Silniki BLDC można podzielić na silniki o zewnętrznym oraz wewnętrznym wirniku. W przypadku konstrukcji o większych śmigłach, zdecydowanie korzystniejsze jest stosowanie silników o zewnętrznym wirniku, gdyż są w stanie wytworzyć większy moment oraz stabilniej utrzymują prędkość obrotową.



Rys. 2. Zestawienie konstrukcji silników BLDC  
a) o wewnętrznym wirniku i b) o zewnętrznym wirniku [1]

## UKŁAD KONTROLI PRĘDKOŚCI

Istotnym elementem układu napędowego drona jest układ elektronicznej kontroli prędkości (ang. *electronic speed controller, ESC*). Pozwala on na sterowanie prędkością silników poprzez regulację napięcia na ich zaciskach. Dzięki temu silnik może np. otrzymać wyższe napięcie podczas startu, kiedy potrzebna jest wyższa prędkość obrotowa.

Układ elektronicznej kontroli działa jako pośrednik między układem kontroli lotu (ang. *flight control system, FCS*) a silnikami. FCS (na podstawie instrukcji od człowieka sterującego dronem) wysyła do kontrolera prędkości sygnał regulujący częstość przełączania kluczy w obwodzie zasilania silnika. W ten sposób regulowane jest napięcie, które podawane jest na zaciski silnika. Układy ESC pracują z wysokimi częstotliwościami (30 kHz ÷ 60 kHz), aby zapewnić szybką reakcję na sygnał wejściowy od użytkownika, a co za tym idzie – płynne sterowanie [9]. Niektóre układy ESC są nawet w stanie realizować hamowanie elektrodynamiczne z odzyskiem energii [1].

ESC może realizować sterowanie napięciem trapezoidalnym oraz sinusoidalnym. Sterowanie trapezowe jest tańsze i prostsze, ale mogą mu towarzyszyć tętnienie momentu oraz skoki prądu podczas komutacji kluczy, co może obniżać sprawność oraz powodować wibracje. Powyższe problemy nie występują przy sterowaniu sinusoidalnym, wykorzystującym algorytmy FOC (*field-oriented control* – sterowanie wektorem pola) [6].

## ŚMIGŁA

Śmigła są elementem układu napędowego podlegającym największym obciążeniom mechanicznym. To na nich spoczywa ciężar drona w powietrzu. W związku z tym ważny jest odpowiedni dobór śmigieł względem przeznaczenia drona. Śmigła o większych łopatach generują większą siłę nośną, ale wymagają również większego momentu do wprowadzenia w ruch. Takie śmigła można znaleźć w dronach muszących unosić większe ładunki (np. sprzęt wideo), natomiast śmigła o mniejszych łopatkach stosuje się w dronach wyścigowych i służących do wykonywania akrobacji [10].

Ważnym parametrem śmigieł jest ich skok, czyli odległość, jaką śmigło może przebyć w trakcie jednego swojego obrotu. Skok śmigła jest silnie powiązany z kątem nachylenia jego łopatek. Śmigła o mocniej nachylonych łopatkach dają większy udźwig, ale wymagają też większego momentu. Dodatkowo śmigła

o wyższym skoku są bardziej podatne na turbulencje i bardziej obciążające dla źródła zasilania, co przekłada się na krótszy czas lotu [7].

Warto wspomnieć o kwestii liczby łopatek. Chociaż śmigła dwułopatkowe generują mniejszy ciąg niż trójłopatkowe, to ich sprawność jest większa [7]. W dobieraniu komponentów drona należy więc uwzględnić, czy ważniejsza będzie moc, czy czas lotu. W dronach przeznaczonych na rynek konsumencki najczęściej można spotkać śmigła dwułopatkowe, ponieważ nie muszą one przenosić dużych ciężarów (najczęściej są to drobne kamery), a dłuższy czas lotu stanowi większą wygodę dla użytkownika.

## **ŹRÓDŁO ENERGII**

Źródła zasilania to komponenty stanowiące największe ograniczenia w dronach komercyjnych, ale w tej dziedzinie również tkwi największy potencjał na rozwój w nadchodzących latach. Problemy związane ze stosowaniem akumulatorów elektrycznych jest ich niska gęstość energii i energia właściwa [2]. Oznacza to, że przy większym zapotrzebowaniu na energię, masa drona zwiększa się znacznie. Najczęściej używanymi obecnie źródłami energii w dronach klasy konsumenckiej są akumulatory litowo-polimerowe oraz nikolowo-metalowowodorkowe ze względu na niskie koszty i względnie wysoką wydajność.

Do parametrów źródła energii poza wspomnianą gęstością energii i energią właściwą można zaliczyć napięcie, pojemność, tempo rozładowania i rezystancję wewnętrzną. Napięcie akumulatora nie jest stałe, ponieważ maleje wraz ze stanem naładowania baterii. Według większości badań jest to relacja liniowa, chociaż przy bardzo niskim naładowaniu napięcie może spaść drastycznie, co przekłada się na mniejszy ciąg wytwarzany przez układ napędowy drona. Dodatkowo, napięcie na zaciskach akumulatora spadnie przy dużym poborze prądu ze względu na zwiększony spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej źródła [1].

Pojemność źródła podaje się w miliamperogodzinach (mAh) i określa ona stan jego naładowania. Np. pojemność 10000 mAh akumulatora oznacza, że można go rozładować w godzinę prądem o natężeniu 10 A. Jak jednak wspomniano wyżej, nie oznacza to, że przez cały ten czas źródło będzie wydawać energię o tych samych parametrach. W miarę rozładowania akumulatora zmniejsza się jego zdolność do oddawania ładunku. Stan naładowania źródła nie jest więc liniową funkcją czasu rozładowywania. Ważna jest zdolność do określenia, czy stan naładowania akumulatora pozwala na wykonanie lotu [1].

Tempo rozładowania źródła można określić jako stosunek prądu rozładowania do pojemności źródła. Wielkość ta (nazywana współczynnikiem C) może informować o maksymalnym prądzie rozładowania, jaki może bezpiecznie wydać akumulator [11]. Przykładowo akumulator o współczynniku C równym 0,5 i pojemności 2000 mAh może być rozładowywany prądem o maksymalnym natężeniu 1 A. Prąd pobierany przez multikopter nie powinien pobierać większego prądu niż akumulator może wydać, gdyż grozi to jego spalaniem. Akumulatory o większym tempie rozładowania mogą być stosowane w dronach wymagających większego poboru prądu, czyli tam, gdzie potrzeba większego udźwigu i wytworzenia większego momentu.

Rezystancja wewnętrzna akumulatora nie jest stała przez cały jego cykl życia. Na początku jest stosunkowo niska, lecz z czasem zużywają się elektrolity baterii i aktywność chemiczna baterii spada, co powoduje wzrost rezystancji. W pewnym momencie rezystancja jest zbyt duża, żeby akumulator mógł służyć jako źródło energii.

## **ALTERNATYWNE ŹRÓDŁA ENERGII W ELEKTRYCZNYCH UKŁADACH NAPĘDOWYCH DRONÓW CYWILNYCH**

Tak jak wspomniano wcześniej, źródła energii stanowią największe ograniczenie w układach napędowych dronów konsumenckich. Obecny stan technologii akumulatorów nie pozwala na długie loty. Rozwijane są obecnie rozwiązania, które choć nie są stosowane w multikopterach „sklepowych”, znajdują użycie w rozmaitych aplikacjach cywilnych oraz są dostępne dla samodzielnych konstruktorów oraz w niektórych większych i droższych modelach konsumenckich.

Wśród takich rozwiązań można wymienić zastosowanie ogniw fotowoltaicznych. Są one bardzo dobrym (i bezemisyjnym) źródłem energii w statkach wykonujących długie loty, np. w geodezji, misjach poszukiwawczo-ratowniczych czy obserwacji przyrody [5]. W słoneczny dzień dron wyposażony w ogniwa słoneczne może teoretycznie latać przez nieograniczenie długi czas. Tutaj jednak należy wspomnieć o oczywistej wadzie tego rozwiązania – wymóg dostatecznego nasłonecznienia. Można je stosować razem z akumulatorami Li-Po jako zapasowym źródłem energii, tworząc niejako układ hybrydowy. Innym rozwiązaniem problemu niewystarczającej ilości światła może być wykorzystanie naziemnego generatora wiązki laserowej do ładowania drona w czasie lotu poprzez odbiornik fotowoltaiczny [2]. Takie rozwiązanie, choć kosztowne, może jeszcze

bardziej wydłużyć lot drona. Nie nadaje się jednak ono do sytuacji, kiedy statek musi osiągać znaczne wysokości lub latać na duże dystanse (większe niż 5 km).

Kolejną kwestią, jaką należy wziąć pod uwagę decydując się na zasilanie ogniwami fotowoltaicznymi jest powierzchnia, jaką zajmuje bateria ogniw na ramię drona. Dodatkowo ogniwa muszą być lekkie i elastyczne, by nie wpływały na aerodynamikę statku. Ogniwa słoneczne są również wrażliwe na temperaturę.

Innym wartym uwagi źródłem energii dla dronów cywilnych są ogniwa paliwowe. Generują one energię elektryczną w procesie utleniania (nie spalania) dostarczanego do nich paliwa. Ich przewagą nad akumulatorami jest fakt, że nie muszą być ładowane (często wiele godzin), a wystarczy doprowadzić do nich paliwo. Dodatkowo ogniwa paliwowe cechuje znacznie większa gęstość energii i energia właściwa w porównaniu do ogniw galwanicznych. Ogniwo wodorowe może ważyć 3–5 razy mniej od akumulatora na bazie litu o tej samej pojemności energii, co pozwala odciążać układ i wydłużyć czas lotu [3].

Wadą ogniw paliwowych jest ich mała gęstość mocy i sprawność. Ich odpowiedź na dynamiczne zmiany obciążenia jest bardzo powolna, co znacznie utrudnia manewrowanie [2]. Aby załagodzić ten problem, można tak jak w przypadku ogniw słonecznych zastosować układ hybrydowy wykorzystując połączenie ogniw paliwowych z fotowoltaicznymi lub galwanicznymi.

## PODSUMOWANIE

Dostępność i niski koszt komponentów sprawiają, że coraz więcej amatorów i hobbystów może samodzielnie zaprojektować i skonstruować własny bezzałogowy statek powietrzny. Różnorodność rozwiązań pozwala na dopasowanie drona do potrzeb użytkownika pod względem udźwigu, manewrowości i długości lotu. Ta ostatnia kwestia jest wciąż rozwijana poprzez badania nad nowymi źródłami energii, chociaż już teraz dostępne są rozwiązania pozwalające na znaczne przedłużenie lotu amatorskiego drona.

## LITERATURA

- [1] Quan Q., Dai X., Wang S., *Multicopter Design and Control Practice*, Publishing House of Electronic Industry, 2020
- [2] Hassanalian M., Abdekledi A., *Classifications, applications, and design challenges of drones: A review*, "Progress in Aerospace Sciences", 91, 2017, 99–131

- [3] Wang B., Zhao D., Li W., Wang Z., Huang Y., You Y., *Current technologies and challenges of applying fuel cell hybrid propulsion systems in unmanned aerial vehicles*, "Progress in Aerospace Sciences" 116, 2020
- [4] Griffis C., Wilson T., Schneider J., Pierpoint P., *Unmanned Aircraft System Propulsion Systems Technology Survey*, Embry-Riddle "Aeronautical University Scholarly Commons", 2009, nr 9
- [5] Andersson O., Wilkman D., *Propulsion system for a small unmanned aerial vehicle*, KTH Royal Institute of Technology, 2020
- [6] Mogensen K., *Motor-control considerations for electronic speed control in drones*, "Texas Instruments Analog Applications Journal", 2016, 6
- [7] Bristeau P., Martin P., Salaün E., Petit N., *The Role of Propeller Aerodynamics in the Model of a Quadrotor UAV*, Proceeding of the European Control Conference, 2009
- [8] Yedemane P., *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Microchip Technology Inc, 2003
- [9] <https://www.unmannedsystemstechnology.com/category/supplier-directory/propulsion-power/uav-engines-propulsion-systems/> – układ napędowy drona, Unmanned Systems Technology
- [10] <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2017/12/selecting-drone-propeller-blades-considerations/> – dobór śmigieł dronów, Unmanned Systems Technology
- [11] [http://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf) – informacje o właściwościach akumulatorów, MIT.

## **PROJEKTOWANIE UKŁADÓW STEROWANIA UKŁADAMI NAPĘDOWYMI**

### **WSTĘP**

Układy napędowe odgrywają bardzo dużą rolę w życiu codziennym, między innymi są stosowane w sprzętach gospodarstwa domowego, a także stanowią integralną część linii produkcyjnych. Coraz większą popularnością cieszą się również pojazdy elektromobilne. Duże zapotrzebowanie na układy napędowe wpływa na rozwój sterowania nimi. Dzięki regulowaniu uzyskujemy optymalne parametry danego układu napędowego w zależności od potrzeb użytkownika. Odpowiednie sterowanie układami napędowymi wiąże się z potrzebą projektowania układów sterowania. Ich budowa jest ściśle związana z wymaganymi parametrami układu napędowego. Optymalny projekt układu sterowania wiąże się z koniecznością identyfikacji lub aproksymacji obiektu, wyznaczeniem modelu matematycznego oraz odpowiednim doborze elementów w celu uzyskania optymalnych parametrów.

### **METODY IDENTYFIKACJI OBIEKTÓW STEROWANIA**

Optymalnym rozwiązaniem dla układów napędowych jest indywidualne dobranie układu sterowania. Dostosowany do potrzeb użytkownika układ sterowania umożliwia otrzymanie optymalnych parametrów danego układu napędowego. Projekt układu sterującego można podzielić na kilka etapów:

- identyfikacja układu sterowanego
- wyznaczenie modelu matematycznego napędu
- analiza układu napędowego
- projekt układu sterującego.

Aby właściwie zidentyfikować obiekt należy wyznaczyć jego charakterystykę statyczną i dynamiczną, które decydują o właściwościach układu. Charakterystyka statyczna układu sterowania wyznaczana jest w trakcie pracy ustalonej. Jeśli obiekt nie jest liniowy to przeprowadzany zostaje proces

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, pawel.saputa@pollub.edu.pl

linearyzacji. Charakterystyka dynamiczna układu sterowania wyznaczana jest w trakcie pracy nieustalonej układu. Wiąże się to z koniecznością rozwiązywania równania różniczkowego nieliniowego. Aby tego uniknąć najpierw przeprowadzany jest proces linearyzacji a następnie otrzymana charakterystyka zostaje aproksymowana. Dzięki takim działaniom otrzymujemy równanie liniowe.

Postać ogólna równania opisującego układ liniowy:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \frac{d^{n-2} y}{dt^{n-2}} + \dots + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 y \quad (1)$$

gdzie:  $y$  – sygnał wyjściowy,  $x$  – sygnał wejściowy,  $a_i$  i  $b_j$  – stałe współczynników równania różniczkowego  $n \geq m; 0 < i < n; 0 < j < m$ .

Równanie charakterystyki statycznej równania (1)

$$y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (2)$$

Po dokonaniu przekształceń Laplace'a równania (1) wyznaczono transmitancję operatorową

$$G(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3)$$

Dla zerowych warunków początkowych oraz  $s = 0$  otrzymujemy:

$$G_s = \frac{y_0(s)}{x_0(s)} = \frac{b_0}{a_0} \rightarrow y = \frac{b_0}{a_0} x_0 \quad (4)$$

Identyfikacja układu sterowania odbywa się przy pomocy sygnałów testowych. Istnieje ścisła korelacja pomiędzy sygnałami testowymi a odpowiedziami układu na te sygnały. Analiza układu na podstawie sygnałów testowych jest dość prosta z uwagi na znany i nieskomplikowany opis matematyczny sygnałów testowych. Dla danego wymuszenia znane są odpowiedzi obiektu które są zależne od charakteru badanego członu. Do podstawowych charakterystyk uzyskanych za pomocą sygnałów testowych należą:

- charakterystyki skokowe
- charakterystyki częstotliwościowe
- charakterystyki logarytmiczne.



## CHARAKTERYSTYKI SKOKOWE

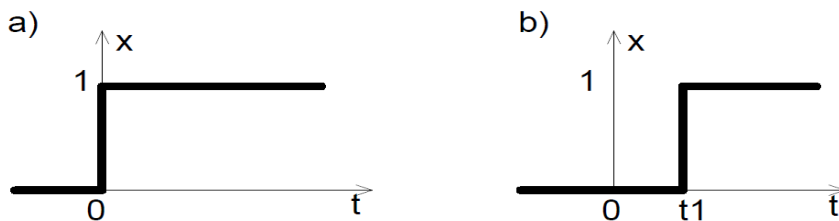
Metoda odpowiedzi skokowej należy do grupy metod deterministycznych. Charakterystyki skokowe powstają wskutek wymuszenia skokowego lub impulsowego przy pracy ustalonej obiektu. Zastosowanie sygnału skokowego daje informacje o wzmacnieniu, stałych czasowych oraz czasach opóźnień obiektów. Poniżej przedstawiono sygnał skokowy (funkcja Heaviside'a), sygnał impulsowy (funkcja Diraca) oraz odpowiedź obiektu pierwszego rzędu inercyjnego na skok jednostkowy. W praktyce nie jest używana funkcja delta Diraca z uwagi na jej założenia matematyczne.

Funkcja Heaviside'a definiowana jest przez poniższe równanie:

$$h(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ 1 & \text{dla } t \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Z uwagi na warunek pracy ustalonej układu równanie ma postać:

$$h(t - t_1) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < t_1 \\ 1 & \text{dla } t \geq t_1 \end{cases} \quad (6)$$



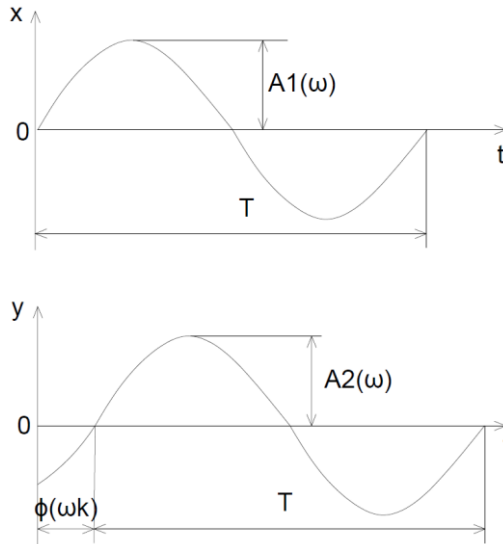
Rys. 1. Wymuszenie skokowe a) skok jednostkowy b) przesunięcie skoku jednostkowego

## CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE

Charakterystyki częstotliwościowe badanego obiektu otrzymuje się dla wymuszenia sinusoidalnego o stałej częstotliwości. Sygnał wyjściowy dla obiektów liniowych w ogólnym przypadku będzie miał taką samą częstotliwość, ale inną fazę i amplitudę niż sygnał wejściowy. Wzory przedstawiające zależności sygnałów wejściowego  $x$  oraz wyjściowego  $y$ .

$$x = A1(\omega)\sin(\omega t) \quad (7)$$

$$y = A2(\omega)\sin[\omega t + \Phi(\omega)] \quad (8)$$



Rys. 2. Przedstawienie odpowiedzi układu liniowego na sygnał sinusoidalny

Charakterystyki częstotliwościowe pozwalają na określenie zachowania się obiektu przy różnych częstotliwościach, przez stosunek amplitudy sygnału wejściowego do amplitudy sygnału wyjściowego oraz przesunięcia fazowego tych sygnałów. Dzięki zastosowaniu transmitancji widmowej możliwe jest wykreślenie charakterystyki amplitudowo-fazowej (charakterystyki Nyquista).

$$G(s) = G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \rightarrow G(j\omega) = \frac{y}{x} \quad (9)$$

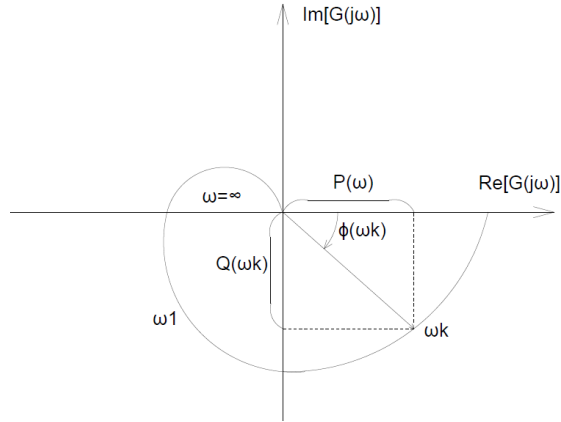
Po zastosowaniu twierdzenia Eulera:

$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\sin(\omega t) \quad (10)$$

Otrzymujemy transmitancję widmową badanego obiektu:

$$G(j\omega) = \frac{A2(\omega)e^{j\omega t} e^{j\varphi(\omega)}}{A1(\omega)e^{j\omega t}} \quad (11)$$

Dzięki takiej postaci transmitancji możliwe jest wyznaczenie charakterystyki amplitudowo-fazowej. Wyznaczony wykres jest geometrycznym miejscem końców wektorów. Długość wektorów jest określona przez stosunek amplitudy wymuszenia do amplitudy odpowiedzi. Przesunięcie fazowe między sygnałem wejściowym i wyjściowym jest określony za pomocą kąta  $\phi(\omega)$ .



Rys. 3. Charakterystyka amplitudowo-fazowa (Nyquista)

Po rozłożeniu funkcji  $G(j\omega)$  na część rzeczywistą i urojoną otrzymujemy

$$G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (12)$$

gdzie:

część rzeczywista transmitancji widmowej

$$P(\omega) = \text{Re}[G(j\omega)] \quad (13)$$

część urojona transmitancji widmowej

$$Q(\omega) = \text{Im}[G(j\omega)] \quad (14)$$

Z charakterystyki amplitudowo fazowej można odczytać następujące zależności

$$M(\omega) = A(\omega) = |G(j\omega)| = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2} \quad (15)$$

$$\varphi(\omega) = \arg G(j\omega) = \text{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \quad (16)$$

## CHARAKTERYSTYKI LOGARYTMICZNE

Charakterystyki częstotliwościowe można przedstawić także za pomocą charakterystyk amplitudy i fazy na dwóch oddzielnych wykresach w skali logarytmicznej. Takie charakterystyki nazywamy charakterystykami Bodego.

$$L(\omega) = 20 \log M(\omega) \varphi(\omega) \quad (17)$$

W układach sterowania często spotykane są połączenia szeregowo. Transmittancja zastępcza połączenia szeregowego jest równa iloczynowi transmittancji elementów składowych. Wyznaczenie transmittancji zastępczej takiego połączenia jest trudne gdy charakterystyki komponentów są wyznaczone doświadczalnie. Przedstawiają to poniższe wzory:

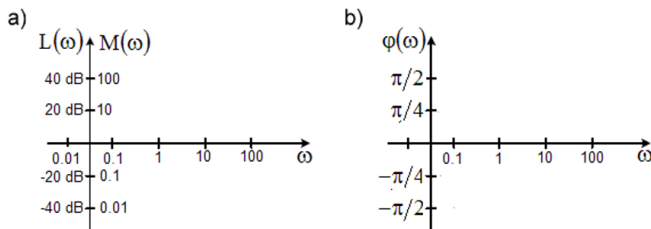
$$|K(j\omega)| = |K1(j\omega)| \cdot |K2(j\omega)| \quad |\varphi(\omega)| = |\varphi1(\omega)| \cdot |\varphi2(\omega)| \quad (18)$$

Zastosowanie charakterystyk logarytmicznych skutkuje możliwością zastąpienia mnożenia transmittancji elementów składowych dodawaniem. Potwierdzają to wzory:

$$L1(\omega) = 20\log|K1(j\omega)| \quad L2(\omega) = 20\log|K2(j\omega)| \quad (19)$$

$$L(\omega) = L1(\omega) + L2(\omega) \quad (20)$$

Stosowanie charakterystyk logarytmicznych pozwala na zamianę komponentów składowych dużej grupy elementów liniowych w sposób asymptotyczny na wykresie. W ten sposób powstaje krzywa łamana na charakterystyce Bodego. Wartość amplitudy oraz pulsacji jest wyznaczone w skali logarytmicznej.



Rys. 4. Charakterystyki logarytmiczne a) amplitudowa b) fazowa

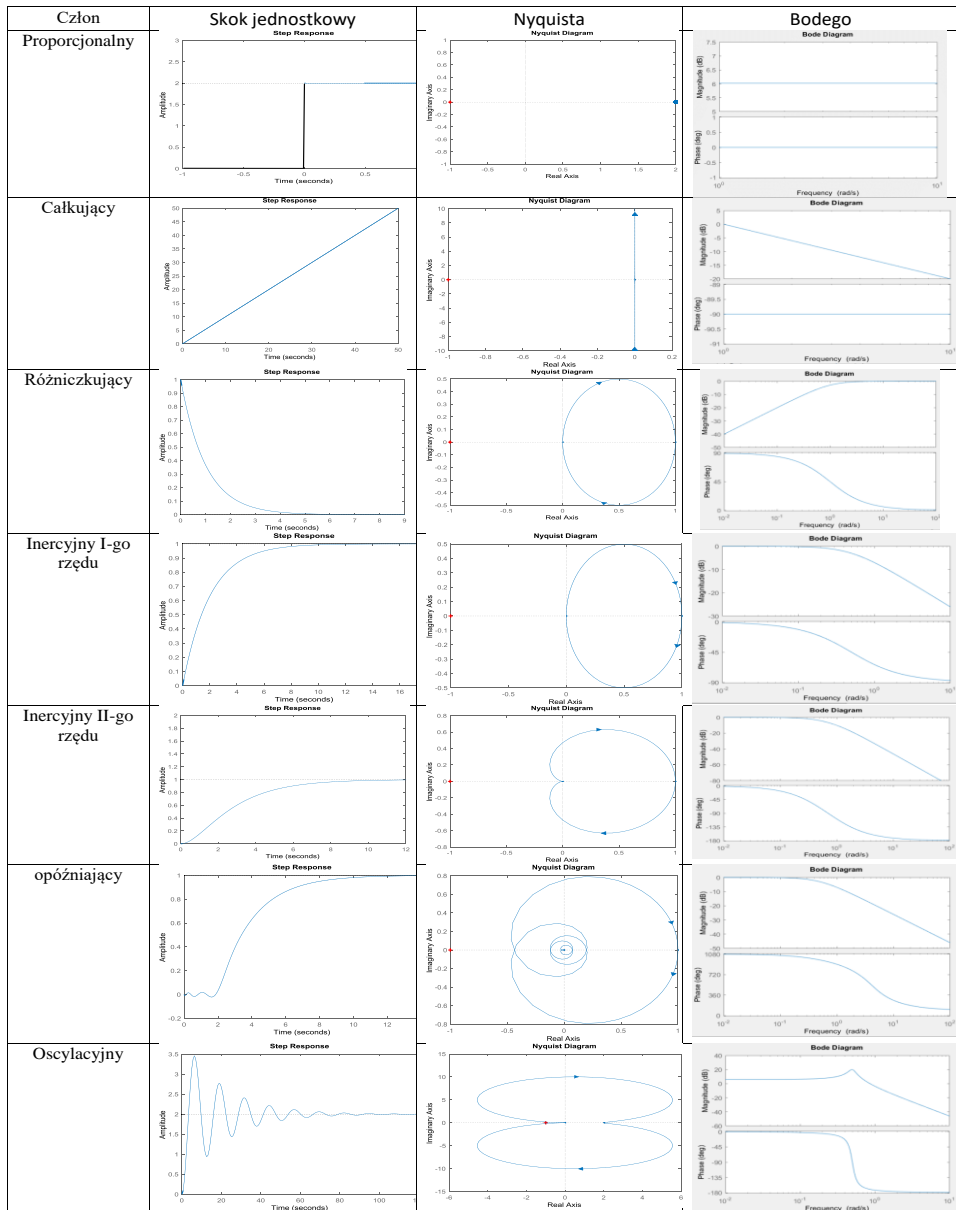
Charakterystyki Bodego mają duże znaczenie przy analizie układów sterowania z uwagi na możliwość łatwego aplikowania ich do połączenia szeregowo dużych grup elementów liniowych. Możliwość dodawania charakterystyk elementów składowych pozwala na łatwiejsze wyznaczenie charakterystyk zastępczych całego układu sterowania.

## PODSTAWOWE CZŁONY DYNAMICZNE

Podstawowymi członami dynamicznymi nazywamy elementy, których właściwości są dobrze opisane w literaturze. Zbadane człony używane są do budowy liniowych układów dynamicznych. Podstawowe człony dynamiczne

przetwarzają sygnały, wykonując na nich elementarne działania. Działania te opisane są równaniami różniczkowymi. Nazwa danego obiektu jednoznacznie określa wykonywane przez niego działanie.

Tab. 2. Podstawowe charakterystyki członów dynamicznych

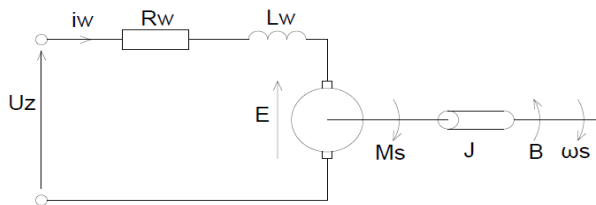


Przez łączenie członów podstawowych możliwe jest uzyskanie dowolnej operacji matematycznej na sygnale. Podstawowe człony z uwagi na znany opis matematyczny często są stosowane do identyfikacji obiektów w sposób eksperymentalny. W tabeli 1 zebrano wzory na opis członu w postaci  $y(t)$ , transmitancji operatorowej  $G(s)$ , odpowiedź na skok jednostkowy  $h(s)$ , transmitancję widmową  $G(j\omega)$  oraz odpowiadające im podstawowe charakterystyki wybranych członów dynamicznych.

## BADANIA SYMULACYJNE

Przeprowadzono badania symulacyjne silnika prądu stałego. Wykonano model matematyczny obiektu do wyznaczenia transmitancji operatorowej. Wykreślono odpowiedź na skok jednostkowy silnika, a także wykonano charakterystyki Nyquista oraz Bodego. Następnie przeprowadzono symulację odpowiedzi obiektu przy zmianie momentu oporowego dla układu ze sprzężeniem zwrotnym oraz bez niego.

Model matematyczny silnika prądu stałego



Rys. 5. Schemat zastępczy wirnika silnika DC

gdzie:

$U_z$  – napięcie zasilające

$i_w$  – prąd w uzwojeniach

$R_w$  – rezystancja zastępcza uzwojeń

$L_w$  – indukcyjność zastępcza uzwojeń

$E$  – siła elektromotoryczna indukcji

$\omega_s$  – prędkość kąтова.

Korzystając z II-go prawa Kirchoffa zapisano równanie:

$$U_z = U_{R_w} + U_{L_w} + E \quad (21)$$

Z prawa Ohma wynika że:

$$U_{R_w} = R_w i_w \quad (22)$$

Napięcie na indukcyjności wynika z prawa komutacji:

$$U_{Lw} = L_w \frac{di_w}{dt} \quad (23)$$

Siłę elektromotoryczną można przedstawić w następujący sposób:

$$E = k_s \omega_s \quad (24)$$

gdzie:  $k_s$  – stała elektryczna.

Własności mechaniczne które są definiowane to:

$M_s$  – moment obrotowy,

$\omega_s$  – prędkość kątowna,

$B$  – współczynnik tarcia,

$J$  – moment bezwładności,

$i_w$  – prąd w uzwojeniach,

$M_{obc}$  – moment obciążenia.

Moment obrotowy wirnika można zapisać w następujący sposób:

$$M_s = M_a + M_v + M_{obc} \quad (25)$$

Przy założeniu, że strumień magnetyczny jest stały, moment wirnika można zapisać:

$$M_s = k_m i_w \quad (26)$$

gdzie:  $k_m$  – stała mechaniczna.

Moment przyspieszenia kątownego ruchu jest równy:

$$M_a = J \frac{d\omega_s}{dt} \quad (27)$$

Moment oporowy ruchu jest równy:

$$M_{sv} = B \omega_s \quad (28)$$

Do wyznaczenia transmitancji operatorowej niezbędne jest rozwiązanie różniczkowego układu równań, które obrazuje parametry elektryczne i mechaniczne modelu.

$$\begin{cases} U_z = R_w i_w + L_w \frac{di_w}{dt} + k_e \omega_s \\ k_m i_w = J \frac{d\omega_s}{dt} + B \omega_s + M_{obc} \end{cases} \quad (29)$$

Po przekształceniach układ równań przyjmuje następującą postać:

$$\begin{cases} \frac{di_w}{dt} = -\frac{R_w}{L_w}i_w - \frac{k_e}{L_w}\omega_s + \frac{1}{L_w}U_z \\ \frac{d\omega_s}{dt} = -\frac{k_m}{J}i_w - \frac{B}{J}\omega_s + \frac{1}{J}M_{obc} \end{cases} \quad (30)$$

Po zastosowaniu przekształceń Laplace'a otrzymujemy postać operatorową układu równań modelu:

$$\begin{cases} sI_w(s) - i_w(0) = -\frac{R_w}{L_w}I_w(s) - \frac{k_e}{L_w}\Omega_s(s) + \frac{1}{L_w}U_z(s) \\ s\Omega_s(s) - \omega_s(0) = -\frac{k_m}{J}I_w(s) - \frac{B}{J}\Omega_s(s) + \frac{1}{J}M_{obc}(s) \end{cases} \quad (31)$$

Po kolejnych przekształceniach

$$\begin{cases} I_w(s) = \frac{-k_e\Omega_s(s) + U_z(s)}{sL_w + R_w} \\ \Omega_s(s) = -\frac{k_m I_w(s) - M_{obc}(s)}{sJ + B} \end{cases} \quad (32)$$

Transmitancja operatorowa modelu:

$$G(s) = \frac{\Omega_s}{U_z(s)} = \frac{k_m}{JL_w s^2 + (R_w J + BL_w)s + R_w B + k_m k_e} \quad (33)$$

### ***Symulacja modelu silnika DC w programie matlab/simulink***

Na potrzeby symulacji zostały zdefiniowane następujące parametry silnika:  $R_w = 2 \Omega$ ;  $L_w = 0,1 \text{ H}$ ;  $k_e = 0,1 \text{ Vs/rad}$ ;  $J = 0,05 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$ ;  $B = 0,5 \text{ Nms/rad}$ ;  $k_m = 0,1 \text{ Nm/A}$ . Identyfikacja obiektu została przeprowadzona w programie Matlab. Za pomocą poniższego skryptu zostały wyznaczone charakterystyki skoku jednostkowego, Nyquista oraz Bodego modelowanego obiektu.



```

>> Rw = 2; Lw = 0.1; ke = 0.1; J = 0.05; B = 0.5; km=0.1;
G=tf([km],[J*Lw Rw*B*Lw km*ke])

G =

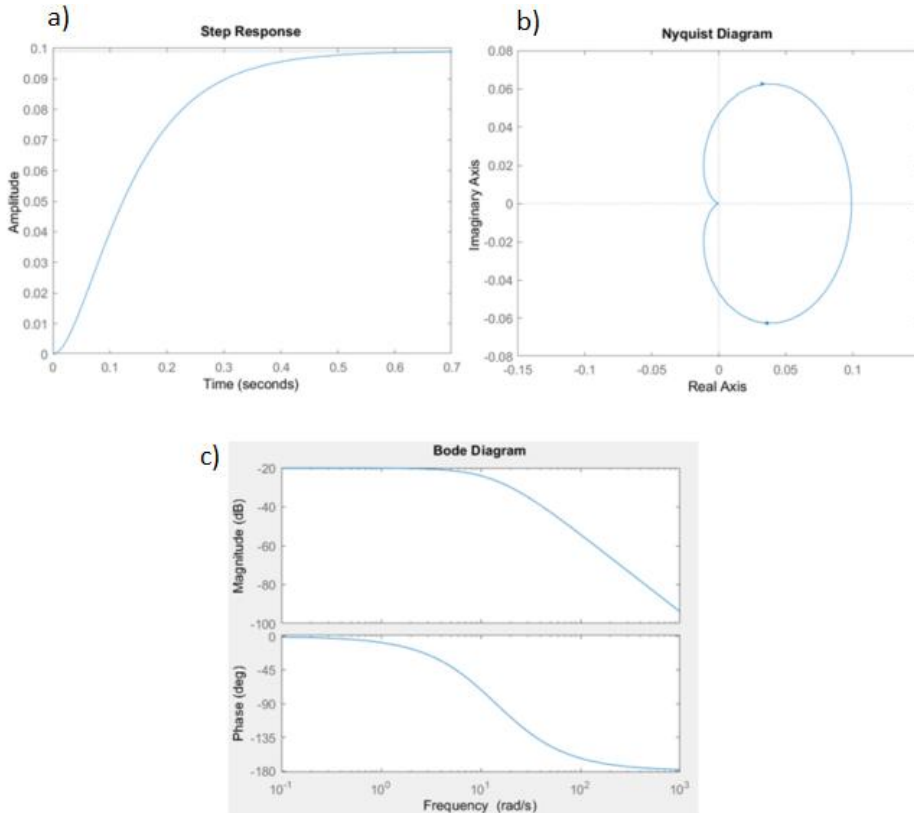
          0.1
-----
0.005 s^2 + 0.15 s + 0.01

Continuous-time transfer function.

>> step(G)
>> nyquist(G)
>> bode(G)

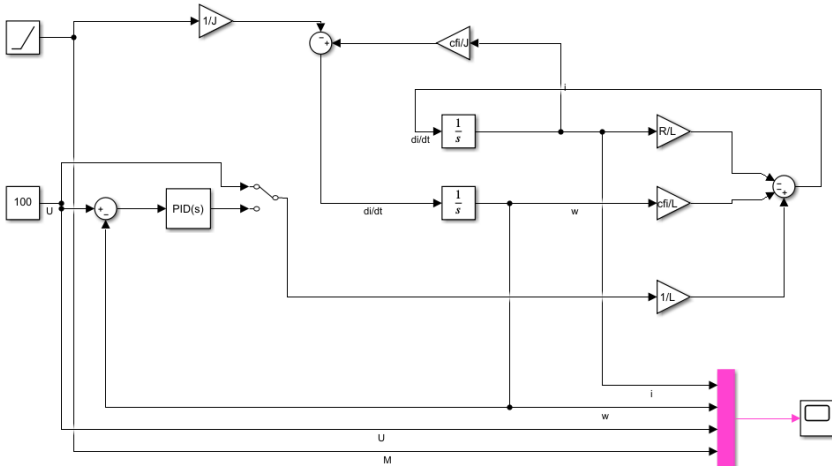
```

Rys. 6. Skrypt programowy do wyznaczenia charakterystyk silnika DC



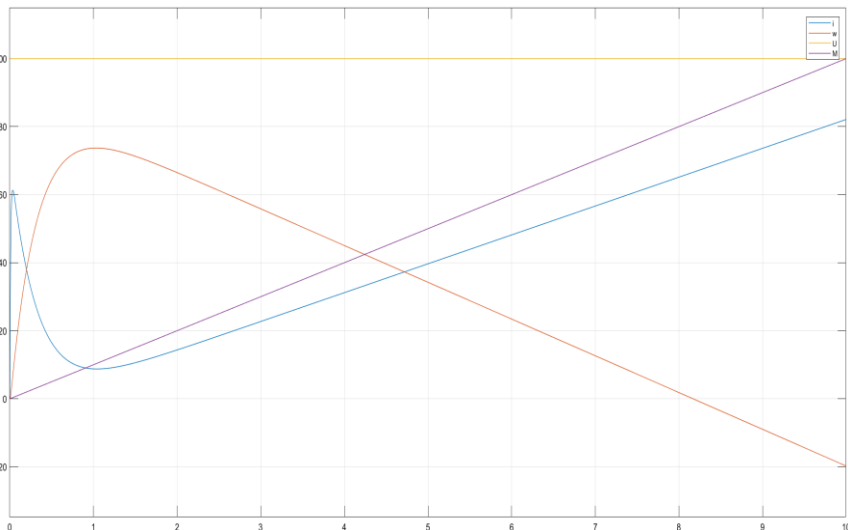
Rys. 7. Charakterystyki silnika DC a) odpowiedź na skok jednostkowy b) Nyquista c) Bodego

Kolejnym krokiem symulacji było zbadanie odpowiedzi silnika DC na zmianę momentu. Symulację przeprowadzono na rysunku 8.

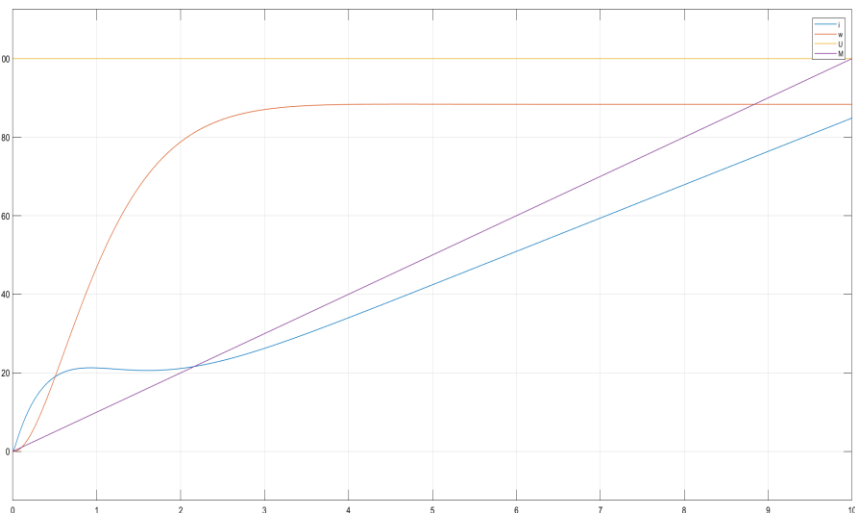


Rys. 8. Schemat do przeprowadzenia symulacji silnika DC z pętlą sprzężenia zwrotnego oraz regulatorem PID wykonanego w programie Simulink

Badaniom symulacyjnym został poddany silnik prądu stałego. Wykreślono charakterystyki prądu  $I$ , napięcia  $U$ , momentu  $M$  oraz prędkości  $\omega$  w funkcji czasu dla obciążenia narastającego liniowo od 0 do 100 Nm.



Rys. 9. Wykres prądu  $I$ , napięcia  $U$ , momentu  $T$  oraz prędkości  $\omega$  w funkcji czasu bez regulatora PID



Rys. 10. Wykres prądu  $I$ , napięcia  $U$ , momentu  $T$  oraz prędkości  $\omega$  w funkcji czasu z regulatora PID w pętli sprzężenia zwrotnego

Układ został dobrany w taki sposób aby pokazać układowi sterowania na prędkość silnika. Wyznaczenie modelu matematycznego pozwoliło wykreślić charakterystyki odpowiedzi na skok jednostkowy, charakterystyki Nyquista oraz Bodego. Na ich podstawie możliwe było zidentyfikowanie obiektu. Przeprowadzone badania symulacyjne obrazują konieczność doboru układu sterowania silnikiem DC. Silnik prądu stałego bez układu sterowania wraz ze wzrostem obciążenia obniżał prędkość. Po osiągnięciu momentu krytycznego wartość prędkości zmieniła znak. Zastosowaniu układu sterowanie z regulatorem PID skutkowało utrzymaniem stałej prędkości na zadanym poziomie. Ponadto zastosowany układ sterowania zmniejszyła pobór prądu w momencie rozruchu silnika.

## PODSUMOWANIE

Układy sterowania z definicji celowo wpływają na parametry danego procesu. Zastosowanie odpowiednio zaprojektowanego sterowania prowadzi do uzyskania zadanych przez użytkownika parametrów, a także ogranicza koszty związane z poborem energii elektrycznej.

Zaprojektowanie układu sterowania wiąże się z koniecznością identyfikacji obiektu sterowanego. Identyfikację można przeprowadzić przez utworzenie modelu matematycznego i za pomocą badań symulacyjnych bądź eksperymentalnych, które są bazą do wykreślenia potrzebnych charakterystyk.

Obiekty sterowane można zamodelować za pomocą podstawowych członów dynamicznych. Używanie programów symulacyjnych pomaga w odpowiednim dobrze układów sterowania. Dzięki ich pomocy można uniknąć wielu błędów w trakcie projektowania.

W dobie rosnącej automatyzacji procesów przemysłowych, a także rosnącej popularności napędów elektrycznych przeciętnych odbiorców. Liczba używanych napędów elektrycznych będzie rosła, a to z kolei powoduje potrzebę optymalizacji kosztów i parametrów eksploatowanych obiektów sterowanych. Do zapewnienia największej efektywności układów napędowych niezbędne jest stosowanie układów sterowania, które to adekwatnie do potrzeb użytkownika dostosowują parametry układu napędowego. Dodatkowo ograniczają zużycie energii elektrycznej, a co za tym idzie kosztów.

## LITERATURA

- [1] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R., *Podstawy teorii sterowania* Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006
- [2] Skup Z., *Podstawy automatyki i sterowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2018
- [3] Gessing R., *Podstawy Automatyki*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001
- [4] Królikowski A., Horla D., *Identyfikacja obiektów sterowania*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005
- [5] Grzesiak L., Kaszewski A., Ufnalski B., *Sterowanie napędów elektrycznych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016
- [6] Głowacz, Z., Zdrojewski, A. *Modelowanie matematyczne silnika komutatorowego prądu stałego i układu zasilania dla diagnostyki*. „Pomiary Automatyka Kontrola”, 2007, R. 53, nr 3, 105–109
- [7] <http://www.cs.put.poznan.pl/mnowak/ISS/Lab-ISS-skrypt.pdf> zasoby z 02.01.2021
- [8] [http://home.agh.edu.pl/~pautom/pliki/laboratoria/lab2\\_.pdf](http://home.agh.edu.pl/~pautom/pliki/laboratoria/lab2_.pdf) zasoby z 30.12.2020.

## **METODY ODCZYTU POZYCJI KĄTOWEJ WAŁU SILNIKA BLDC W MIKROPROCESOROWYCH UKŁADACH STEROWANIA**

### **WSTĘP**

Szybki rozwój elektroniki i stale obniżające się ceny mikrokontrolerów doprowadziły do znacznego rozpowszechnienia się opartych na nich aplikacji, między innymi w przemyśle, gdzie coraz częściej projektowane są układy silnikowe bazujące na rozwiązaniach mikrokontrolerowych. W wielu z nich kluczowym aspektem jest odczyt pozycji kątovej wału silnika. Najczęściej w tej roli wykorzystywane są absolutne enkodery optyczne. Niestety ich największą wadą jest znaczny koszt, w niektórych przypadkach stanowiący znaczą część kosztu całego układu. Z tego względu opracowywane są alternatywne rozwiązania odczytu pozycji kątovej wału silnika. Artykuł przedstawi aktualnie stosowane metody oraz skupi się na zaprezentowaniu jednego z ciekawszych rozwiązań w postaci absolutnych enkoderów magnetycznych i porównaniu go do innych wymienionych metod. Zostaną także przedstawione wyniki badań jednego z dostępnych na rynku enkoderów magnetycznych w postaci układu AS5147.

### **METODY ODCZYTU POZYCJI KĄTOWEJ WIRNIKA**

W silnikach BLDC najpowszechniejszą metodą odczytu pozycji kątovej wirnika są czujniki Halla umieszczane wewnątrz jego obudowy. Działają one jak przełączniki dwustanowe zależne od pozycji wału silnika i pozwalają na odczyt pozycji wirnika co 60 stopni kąta elektrycznego, co w zależności od ilości par biegunów, przekłada się na  $60/p$  stopni położenia mechanicznego. Rezultatem tego jest pomiar o niewielkiej dokładności, który jednak może być akceptowalny w przypadku niektórych rozwiązań.

Do zwiększenia tej rozdzielczości można wykorzystać algorytm aproksymacyjny [1], który wylicza przybliżoną pozycje pomiędzy odczytami z czujników

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, maciej.rudawski@pollub.edu.pl

Halla na podstawie ostatniego odczytu prędkości obrotowej. Z tego względu metoda ta może dawać zadowalające rezultaty w przypadkach, gdy nie następują gwałtowne zmiany prędkości obrotowej silnika.

Podstawową wadą tych rozwiązań jest to, że rzeczywiste położenie czujników w obudowie silnika odbiega od idealnego. Powoduje to komutacje w niewłaściwych punktach położenia wirnika i wzrost strat w silniku. Negatywnie wpływa to także na pomiar prędkości. Artykuł [2] proponuje programową niwelację tych niedoskonałości przez wyznaczanie kąta błędu i uwzględnienie go przy komutacji oraz przedstawia metodę wykorzystania niedoskonałości wykonania czujników do określenia kąta mechanicznego położenia wału.

Wszystkie te operacje pozwalają na lepsze wykorzystanie czujników Halla, ale wymagają zaangażowania znacznej części mocy obliczeniowej procesora, która w niektórych bardziej zaawansowanych aplikacjach może być niewystarczająca.

Innym kierunkiem badań w tej dziedzinie jest wykorzystanie liniowych czujników Halla. Dają one lepszą rozdzielczość pomiarową, ale sygnał z czujników wymaga odpowiedniego przetworzenia zanim trafi do procesora. Publikacja [3] wskazuje na problem dużej zawartości trzecich harmonicznych. Proponowanym rozwiązaniem jest zastosowanie adaptacyjnego filtra środkowozaporowego z pętlą synchronizacji fazy.

Do pomiaru wykorzystuje się dwa liniowe czujniki Halla umieszczone wewnątrz obudowy silnika przesunięte względem siebie o 90 stopni kąta elektrycznego, pozwala to na otrzymanie wartości kąta z zależności (1).

$$\Theta = \arctg \frac{\chi_{\beta}}{\chi_{\alpha}} \quad (1)$$

gdzie  $\chi_{\alpha}$  jest wartością odczytaną z pierwszego sensora,  $\chi_{\beta}$  jest wartością odczytaną z sensora przesuniętego o 90 stopni kąta elektrycznego względem pierwszego sensora.

Takie rozwiązanie wymusza projektowanie czujnika pod konkretne wymiary i budowę silnika i umieszczanie go wewnątrz jego konstrukcji tak aby pozycja czujników Halla pokrywała się z pozycją magnesów silnika BLDC. Dodatkowo zastosowanie cyfrowego filtra adaptacyjnego oznacza konieczność wykorzystania mocy obliczeniowej mikrokontrolera lub wykorzystaniu dodatkowego układu obliczeniowego.

W celu obniżenia kosztów w aplikacjach, w których nie jest wymagana duża dokładność odczytu stosuje się algorytmy bezczujnikowe opierające się na pomiarze siły przeciwelektromotorycznej, wytwarzanej w uzwojeniach stojana na drodze indukcji elektromagnetycznej pola wirnika podczas jego obrotu lub na

metodach nakładania sygnału o wysokiej częstotliwości na sygnał wzbudzenia i badaniu odpowiedzi układu, którym określana jest pozycja wirnika.

Pierwsza metoda nie ma zastosowania przy niskich prędkościach obrotowych, ponieważ wartość uzyskiwanej siły przeciwelektromotorycznej jest zbyt niska, aby na jej podstawie dokonać odczytu pozycji wirnika. Natomiast przy drugiej metodzie wymagana jest duża różnica częstotliwości sygnału nośnego i sygnału wzbudzenia, co można osiągnąć przy niskich prędkościach obrotowych. Siła przeciwelektromotoryczna jest wtedy bliska zeru, a silnik zachowuje się w przybliżeniu jak obciążenie czysto indukcyjne [4]. Wynika z tego, że wykorzystanie metod bezczujnikowych ogranicza się do aplikacji działających w wąskich przedziałach prędkości obrotowych silnika. Uzyskiwany pomiar nie jest tak dokładny jak w metodach czujnikowych i w dużym stopniu zależy od prędkości obrotowej. Dodatkowo wymagają one wykonywania znacznej ilości operacji matematycznych które obciążają procesor.

## ABSOLUTNE ENKODERY MAGNETYCZNE

Wygodnym rozwiązaniem pomiaru kąta położenia wirnika są absolutne enkodery magnetyczne. Odczyt odbywa się za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego wytwarzanego przez magnes trwały magnesowany diametralnie położony na wale silnika. Enkoder umieszcza się w osi magnesu w odległości od 0,5 mm do 10 mm w zależności od parametrów dobranych elementów. Eliminuje to konieczność ingerencji w wewnętrzną konstrukcję silnika. Jedynym wymaganiem konstrukcyjnym jest wykonanie odpowiedniej obudowy do zamocowania magnesu i enkodera.

Podstawową przewagą absolutnych enkoderów magnetycznych nad absolutnymi enkoderami optycznymi jest ich cena przy stosunkowo wysokiej rozdzielczości. Przy cenie rzędu kilkudziesięciu złotych zapewniają rozdzielczość do 14 bitów. Co oznacza  $2^{14} = 16348$  pozycji wirnika. Wynika z tego, że mogą one dokonywać pomiaru z krokiem:

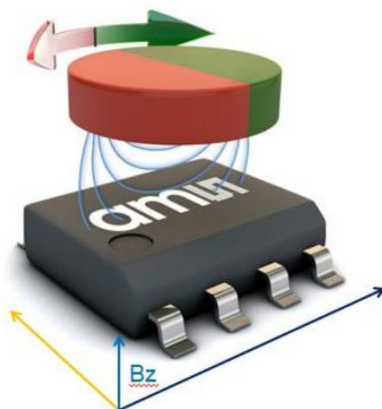
$$A_r = \frac{360^\circ}{16348} = 0,02^\circ \quad (2)$$

Przewyższa to znacznie możliwości rozdzielcze rozwiązań opartych na dyskretnych czujnikach Halla. Nawet przy zastosowaniu metod opisanych w poprzednim rozdziale [1, 2] enkodery magnetyczne nadal uzyskują przewagę, ponieważ pomiar odbywa się w nich na podstawie faktycznego odczytu wartości z czujnika a nie matematycznych przybliżeniach. Dodatkowo w przeciwieństwie

do innych opisanych metod w minimalnym stopniu angażują do pracy procesor. W większości wykonanych enkodery budowane są już jako kompletne układy scalone z własnymi jednostkami logicznymi i układami peryferyjnymi pozwalającymi na przekazywanie informacji za pośrednictwem standardowych protokołów komunikacyjnych.

## MODUŁ AS5147

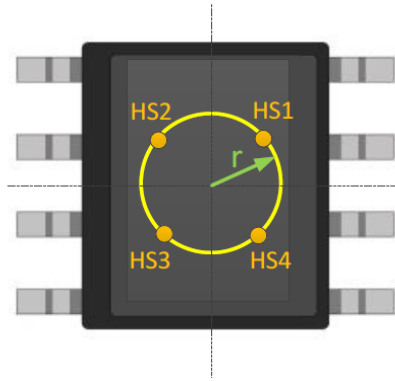
Jako przykład możliwości absolutnych enkoderek magnetycznych wykorzystany zostanie układ scalony AS5147. Jest to 14-bitowy absolutny enkoder magnetyczny z wbudowaną dynamiczną korekcją błędów odczytu.



Rys. 1. Układ pomiarowy z wykorzystaniem absolutnego enkodera magnetycznego [5]

Enkoder mierzy składową pola magnetycznego prostopadłą do swojej powierzchni. Na rysunku 1 została ona oznaczona jako  $B_z$ . Pomiar odbywa się w czterech punktach przy pomocy liniowych czujników Halla rozmieszczonych w równych odległościach w promieniu  $r$  od osi wspólnej z osią magnesu. Otrzymuje się w ten sposób 4 sygnały sinusoidalne przesunięte w fazie o 90 stopni względem siebie. Po przez przeliczenie ich według wzorów (3, 4), uzyskujemy sygnały odpowiadające wartości pola w osiach  $x$  i  $y$ .





Rys. 2. Rozmieszczenie czujników Halla w układzie enkodera [5]

$$S_x = S_{H1} + S_{H2} - S_{H3} - S_{H4} \quad (3)$$

$$S_y = S_{H1} - S_{H2} - S_{H3} + S_{H4} \quad (4)$$

gdzie  $S_{H1} - S_{H4}$  są sygnałami z czujników Halla.

Na podstawie wartości  $S_1$  i  $S_2$  możliwe jest wyznaczenie wartości kąta obrotu.

$$\Theta = \arctg \frac{S_x}{S_y} \quad (5)$$

Komunikacja pomiędzy mikrokontrolerem a enkoderem może zostać zrealizowana przy pomocy magistrali SPI z prędkością do 10 Mbits/s. Ramka danych konieczna do odczytania wartości z enkodera składa się z 16 bitów. W pierwszej kolejności mikrokontroler wysyła ramkę danych z żądaniem przekazania informacji o wartości zapisanej pod adresem rejestru enkodera, w którym znajduje się dokonany pomiar. W odpowiedzi otrzymuje ramkę danych, w której zawarta została informacja o kącie położenia wirnika. Wynika z tego, że cała operacja wymaga przekazania 2 ramek, czyli łącznie 32 bitów, oznacza to, że czas potrzebny na przekazanie informacji jest równy w przybliżeniu:

$$t = \frac{32}{10 \cdot 10^6} = 3,2 \mu s \quad (6)$$

Biorąc pod uwagę to, że układ enkodera uwzględnia błąd wynikający z czasu, jaki potrzebuje na dokonanie pomiaru, można założyć, że łączny czas

pomiaru z punktu widzenia mikrokontrolera jest równy 3,2  $\mu$ s. W przypadku odczytu pozycji jest to wartość pomijalnie mała.

Enkoder pozwala także na wykorzystanie innych metod komunikacji, między innymi interfejsu symulującego 3 dyskretne czujniki Halla. Umożliwia to na wykorzystanie urządzenia w połączeniu z powszechnie stosowanymi sterownikami silników BLDC np. opartych na popularnym standardzie *open source* VESC. Przewagą takiego rozwiązania nad fizycznymi czujnikami Halla jest to, że nie występują błędy wynikające z ich nieprecyzyjnego rozstawienia na obwodzie silnika. Wymagane jest tylko odpowiednie dobranie ilości par biegunów i pozycja zerowa co jest możliwe z poziomu pamięci enkodera.

Trzecim interfejsem enkodera jest tryb pracy jako dwusygnałowy enkoder inkrementalny z sygnałem przejścia przez pozycje zerową o rozdzielczości do 2048 kroków. Wiele mikrokontrolerów posiada sprzętową obsługę tego interfejsu co oznacza zerowe obciążenie procesora i brak opóźnień przy odczycie pozycji silnika.

## DOBÓR MAGNESU

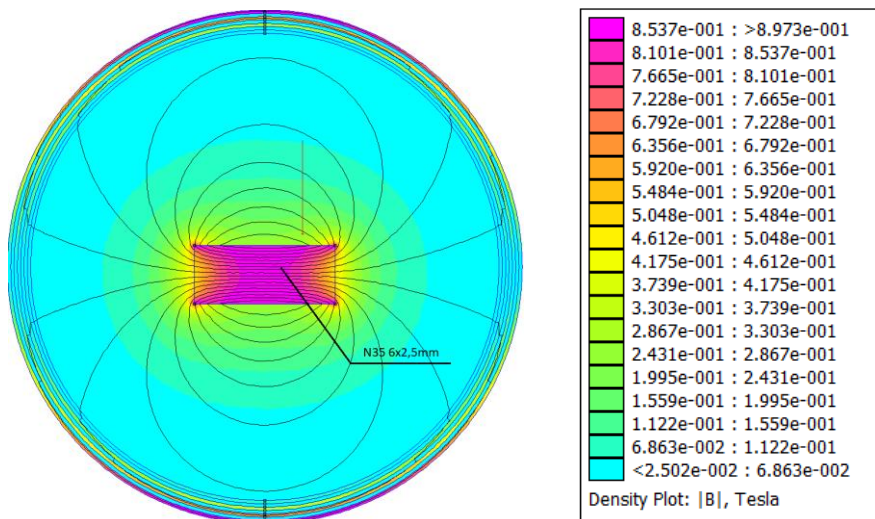
Ważnym aspektem projektowania układu jest właściwy dobór magnesu tak aby zapewniał optymalny zakres indukcji magnetycznej dla prawidłowej pracy czujnika. W badanym przypadku, dla wykorzystanego enkodera AS5147, jego nota katalogowa [6] podaje dopuszczalny zakres pomiędzy 35–70 mT.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Max	Unit
Bz	Orthogonal magnetic field strength, normal operating mode	Required orthogonal component of the magnetic field strength measured at the die's surface along a circle of 1.1mm	35	70	mT

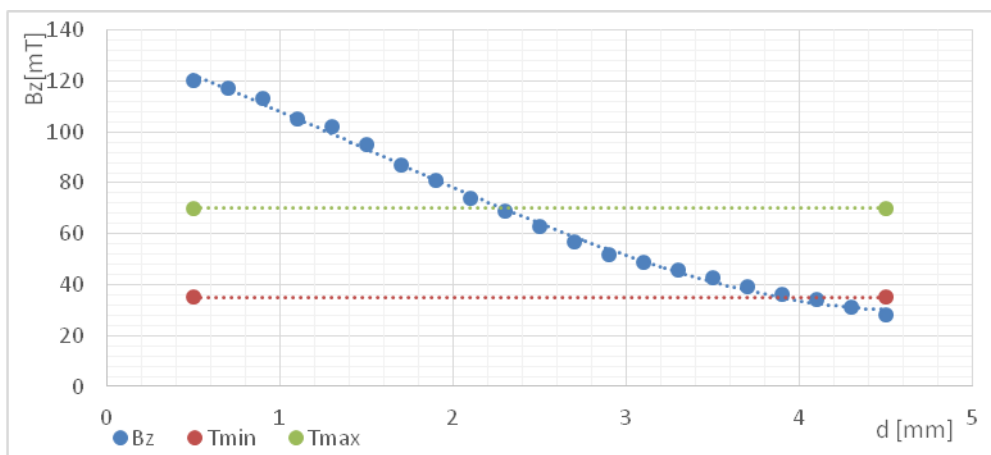
Rys. 2. Dopuszczalny zakres indukcji magnetycznej enkodera AS5147 wg noty katalogowej [6]

Badaniom poddany zostanie magnes neodymowy N35 o średnicy 6 mm i grubości 2,5 mm. Powodem takiego wyboru jest trudna dostępność na rynku magnesów magnesowanych diametralnie. Do wykonania pomiarów wykorzystany zostanie program symulacyjny FEMM.

Rysunek 3 przedstawia model symulacyjny badanego magnesu, linią czerwoną oznaczono zakres pomiarowy składowej prostopadłej indukcji magnetycznej. Jest ona przesunięta o 1,1 mm od osi magnesu, wynika to z rozmieszczenia czujników Halla w enkoderze na tym promieniu [6].



Rys. 3. Model symulacyjny badanego magnesu z widocznym rozkladem modulu indukcji magnetycznej

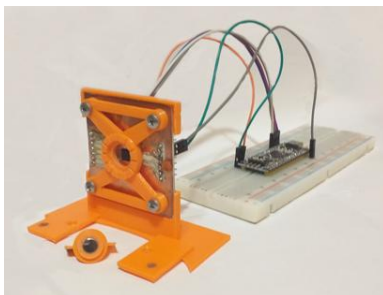


Rys. 4. Wykres składowej prostopadłej indukcji magnetycznej w funkcji odległości  $B_z = f(d)$

Rysunek 4 przedstawia składową prostopadłą indukcji magnetycznej w funkcji odległości. Na wykresie zaznaczono wartości maksymalne i minimalne wymagane do prawidłowego działania enkodera zgodnie z rysunkiem 2. Wynika z tego, że dostępny przedział odległości dla badanej konfiguracji musi się zawierać w przedziale <2,3–3,9 mm>.

## PRZEPROWADZONE BADANIA

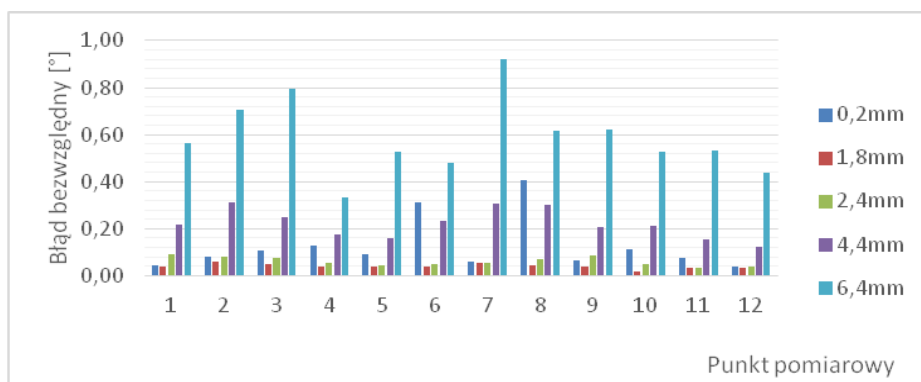
Do przeprowadzenia badań wykonany został model przedstawiony na rysunku 5. Pomiary wykonywane zostały w dwunastu pozycjach magnesu rozmieszczonych co 30 stopni obrotu w zakresie od 0 do pełnego obrotu. Odczyty dokonywane były przy pomocy mikrokontrolera STM32 F1 za pośrednictwem magistrali SPI, a następnie przez interfejs UART przekazywane do komputera.



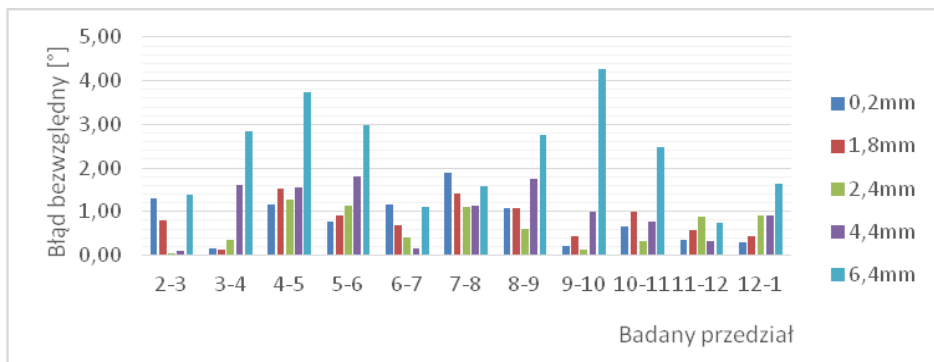
Rys. 5. Model laboratoryjny do przeprowadzenia pomiarów

Badaniom poddany został wpływ przerwy powietrznej pomiędzy magnesem, a enkoderem na błąd pomiaru.

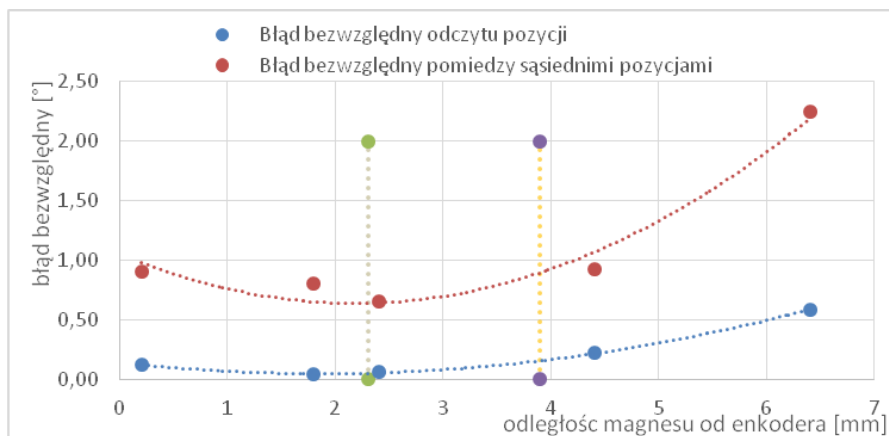
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów błędu bezwzględnego odczytu kąta położenia wirnika dla wszystkich badanych położeń. Widać na nim, że dla przerwy powietrznej pomiędzy magnesem a enkoderem równej 1,8 mm i 2,2 mm nie przekracza on 0,1 stopnia. Dla przedziałów poniżej i powyżej tej wartości błąd zaczyna wzrastać.



Rys. 6. Błąd bezwzględny odczytu wartości kąta dla poszczególnych pozycji w zależności od wielkości przerwy powietrznej



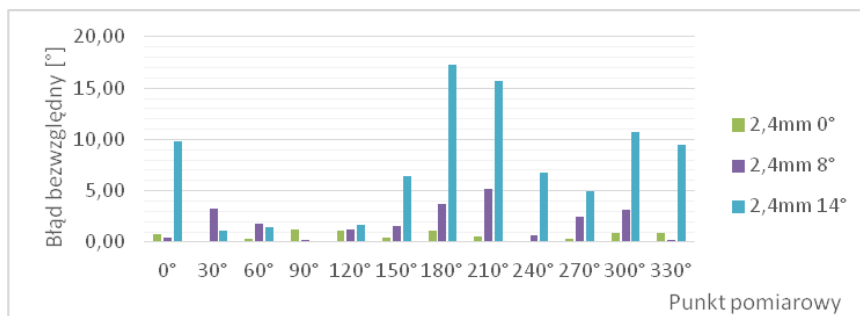
Rys. 7. Błąd bezwzględny odczytu wartości pomiędzy sąsiednimi pozycjami w zależności od wielkości przerwy powietrznej



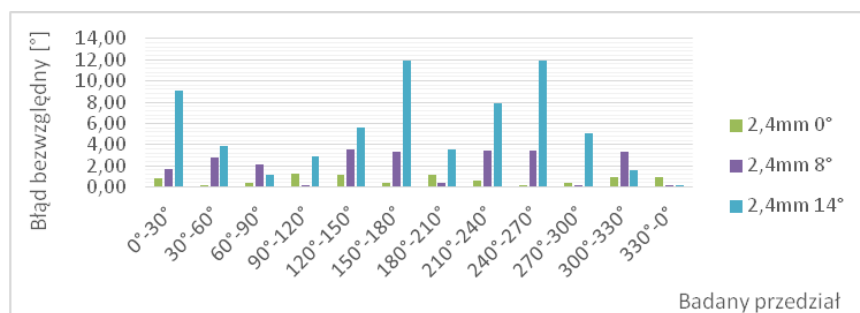
Rys. 8. Średnie błędy bezwzględne odczytu wartości kąta w funkcji przerwy powietrznej

Podobną zależność można zauważyć na rysunku 7, gdzie przedstawiono błędy bezwzględne odczytu pomiędzy sąsiednimi pozycjami. Ich poszczególne wartości mogą wynikać z niedoskonałości wykonania urządzenia badawczego, ale co warto zaobserwować, podobnie jak w przypadku z rysunku 6 najmniejsze wartości osiągnięte są w punktach 1,8 mm i 2,2 mm. Dla lepszego zobrazowania tych zależności na rysunku 8 przedstawione zostały wykresy uśrednionych wartości błędów w funkcji przerwy powietrznej. Dodatkowo na rysunku zaznaczono przedział przerwy powietrznej otrzymany na wykresie z rysunku 4. Jak widać, jest on przesunięty w prawo względem otrzymanych punktów o najmniejszym błędzie, wynika to z niedoskonałości wykonania magnesów. Ich faktyczna indukcja magnetyczna jest mniejsza od tej otrzymanej na drodze symulacji. W nocie katalogowej [5] można znaleźć wykres indukcji magnetycznej

w osi z w funkcji odległości dla magnesu o takich parametrach jak ten poddany badaniom. Na jego podstawie można wyznaczyć optymalny zakres działania czujnika w przedziale  $\langle 1-2,5 \text{ mm} \rangle$  co pokrywa się z wyznaczonymi wartościami. Przy pomiarach wykonano badanie wpływu nachylenia osi magnesu względem osi enkodera.



Rys. 9. Błąd bezwzględny odczytu wartości kąta dla poszczególnych pozycji w zależności od kąta nachylenia osi magnesu i enkodera



Rys. 10. Błąd bezwzględny odczytu wartości pomiędzy sąsiednimi pozycjami w zależności od kąta nachylenia osi magnesu i enkodera

Rysunek 9 przedstawia wartości błędów bezwzględnych odczytu pozycji dla poszczególnych punktów pomiarowych w zależności od kąta nachylenia pomiędzy osią magnesu a osią enkodera. Widać na nim, że wraz ze wzrostem kąta nachylenia znacznie wzrasta błąd bezwzględny odczytu, a jego przyrost jest nierównomierny, największe wartości osiąga w punktach 180 i 210 stopni. Na rysunku 10 przedstawiono błędy bezwzględne odczytu pomiędzy poszczególnymi pozycjami. Widać na nim, że jak w przypadku z rysunku 9, błąd odczytu znacznie wzrasta wraz ze wzrostem kąta pomiędzy osiami magnesu i enkodera i także w tym przypadku przyrost tego błędu nie jest równomierny na całym obwodzie silnika. Wynika z tego, że do zapewnienia prawidłowej pracy enko-

dera magnetycznego potrzebne jest precyzyjne wykonanie mocowania tak aby zniwelować do minimum odchylenie wzajemne osi magnesu i enkodera, ponieważ już przy niewielkim kącie pomiędzy nimi, błąd wzrasta z poziomu ułamków stopnia do nawet kilkunastu stopni.

## PODSUMOWANIE

Absolutne enkodery magnetyczne są ciekawym rozwiązaniem odczytu pozycji kątowej wału silnika, prostym w implementacji, niewymagającym ingerencji w wewnętrzną budowę silnika. Ich obsługa wymaga minimalnych nakładów mocy obliczeniowej mikrokontrolera. Największym wyzwaniem w ich wykorzystaniu jest zaprojektowanie odpowiednio precyzyjnego mocowania tak aby zapewnić dokładny pomiar. Te cechy w połączeniu z wysoką rozdzielczością i dużą precyzją przy stosunkowo niskiej cenie stawiają enkodery magnetyczne w pozycji jako bardzo rozsądny wybór przy projektowaniu powszechnie stosowanych aplikacji napędowych opartych na rozwiązaniach mikrokontrolerowych.

## LITERATURA

- [1] Sánchez V., Vergara O., Nandayapa M., *High resolution position estimation from hall effect sensor*, Autonomous University of Cuda Juarez, Cuda Juarez, 2015
- [2] Kolano K., *Determining the Position of the Brushless DC Motor Rotor*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2020
- [3] Sung-Yoon J., *PMSM control based on edge-field hall sensor signals through ANF-PLL processing*, IEEE, 2011
- [4] Gong L., *Carrier signal injection based sensorless control of permanent magnet brushless AC machines*, The University of Sheffield, 2012
- [5] *AN5000 rotary magnetic position sensors magnet selection guide*, <https://ams.com>, zasoby z dnia 01.12.2020
- [6] *AS5147 datasheet*, <https://ams.com>, zasoby z dnia 01.12.2020.

## **PERSPEKTYWY ROZWOJU PROSUMENCKICH INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH NA PRZYKŁADZIE WOJEWÓDZTWA LUBELSKIEGO**

### **WSTĘP**

Rozwój odnawialnych źródeł energii elektrycznej staje się coraz istotniejszym zadaniem we współczesnej energetyce. OZE przede wszystkim wiąże się z ochroną środowiska naturalnego wskazaną przez Unię Europejską. Celem stosowania ogniw fotowoltaicznych jest uzyskanie zeroemisyjnego wytwarzania energii elektrycznej. W perspektywie czasu energetyka odnawialna może zastępować konwencjonalne bloki węglowe powodujące degradację środowiska naturalnego. Aby umożliwić rozwój nowym technologiom należy zmodernizować i dostosować Krajowy System Energetyczny do pracy z rozproszonymi źródłami energii. Umożliwi to spełnienie norm emisji CO<sub>2</sub>, które są wymogiem UE. Dynamiczny rozwój nowoczesnych ekologicznych technologii służących do pozyskiwania energii elektrycznej zaowocował złamaniem monopolu dużych przedsiębiorstw produkujących energię elektryczną z wysokonakładowych nieodnawialnych i odnawialnych źródeł energii. Energetyka weszła w dobę produkcji energii przez gospodarstwa domowe i małe podmioty gospodarcze na własne potrzeby. Nadwyżki wyprodukowanej energii przekazywane są do sieci dystrybucyjnej i rozliczane w taryfie energetycznej. Zjawisko to nosi nazwę prosumpcji. Typowym niskonakładowym źródłem energii dostępnym dla każdego „posiadacza dachu” jest instalacja fotowoltaiczna. Relatywnie niska cena instalacji fotowoltaicznej oraz sprzyjające uregulowania prawne wpływają na dynamiczny wzrost liczby instalacji i mocy zainstalowanej. Z tego względu prosumenckie instalacje fotowoltaiczne są rozważane jako alternatywa dla źródeł konwencjonalnych. Poprawiają bezpieczeństwo energetyczne kraju, redukują emisyjność CO<sub>2</sub> oraz pozwalają na uniezależnienie się od dostawcy energii elektrycznej [1]. Jednak, wraz z przyrostem liczby źródeł PV może dochodzić do

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, justyna.kowalska@pollub.edu.pl

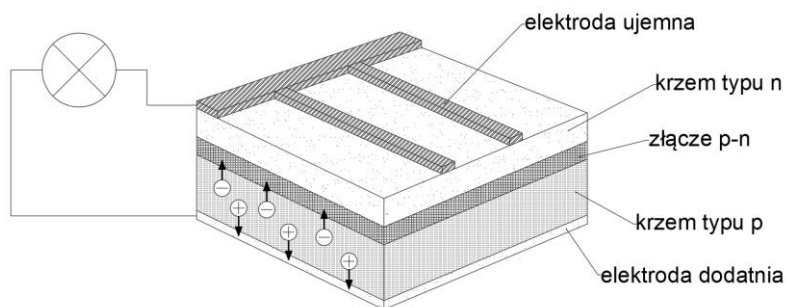


lokalnego pogorszenia jakości energii elektrycznej. Głównym problemem jest wzrost napięcia w miejscu przyłączenia źródła PV [6].

W artykule przedstawiono zagrożenie tendencji rozwoju prosumpcji ze źródeł fotowoltaicznych. Przeanalizowano otoczenie prawne i dane historyczne dotyczące liczby instalacji fotowoltaicznych na terenie województwa lubelskiego oraz przyrostu wartości mocy zainstalowanej, pochodzące z PGE Dystrybucja Oddział Lublin. Analizie poddano dane z lat 2015–2020. Na tej podstawie zostały postawione wnioski wskazujące kierunek rozwoju energetyki prosumenckiej z instalacji fotowoltaicznych. Wnioski dotyczą analizy danych z obszaru województwa, ale można uogólnić je na cały kraj.

### DZIAŁANIE I BUDOWA PROSUMENCKICH INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH

Ogniwa fotowoltaiczne są elementami półprzewodnikowymi, w których zachodzi konwersja energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Zjawisko to nazywane jest efektem fotowoltaicznym. Ogniwa różnią się technologią wykonania oraz materiałem użytym do produkcji. Z tego względu przyjmuje się podział na trzy generacje. Ogniwa zbudowane są z dwóch warstw półprzewodnika. Obie te warstwy oddzielone są warstwą zaporową, która występuje na złączu tych materiałów. Złącze uzyskuje się poprzez właściwe domieszkowanie półprzewodników i wykorzystuje się je do izolowania elektronów oraz dziur za pomocą pola elektrycznego. Na górze ogniwa umiejscowiona jest przezroczysta warstwa typu n, skojarzona z elektrodą ujemną, natomiast na dole znajduje się grubsza warstwa typu p, skojarzona z elektrodą dodatnią.



Rys. 3. Budowa ogniwa fotowoltaicznego

W ogniwach promieniowanie słoneczne pochłaniane jest przez półprzewodnik, co skutkuje przejściem elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa. Różnica potencjałów powstająca na styku obu warstw wytwarza pole elektryczne. Elektrony i dziury, które powstają wskutek wybicia elektronu, są nośnikami prądu. Rozdzielane są przez pole elektryczne i kierowane są do obwodu zewnętrznego. W przypadku obciążenia instalacji fotowoltaicznej nastąpi przepływ prądu. Od sprawności ogniw fotowoltaicznych zależy ilość otrzymanej energii elektrycznej z systemu. Obniżenie sprawności wynika z faktu, że energia niektórych fotonów przewyższa energię przerwy energetycznej półprzewodnika. W takim wypadku nie stworzą par elektron – dziura, więc nadwyżka energetyczna jest tracona jako ciepło.

Najczęściej do budowy ogniw używa się krzemu krystalicznego. Ogniwa wykonane w tej technologii stanowią ponad 90% produkcji i zaliczyć je można do I generacji. Krzem posiada na ostatniej powłóce cztery elektrony walencyjne, dlatego można go swobodnie łączyć z innymi pierwiastkami. Takie domieszkowanie stosuje się, żeby uzyskać odpowiednią przewodność półprzewodnika typu n i p. Do uzyskania półprzewodnika typu n (domieszka donorowa) stosuje się domieszkowanie atomami o wyższej liczbie elektronów walencyjnych niż atomy krzemu. Tymi pierwiastkami mogą być np.: antymon, arsen, fosfor. Aby uzyskać półprzewodnik typu p (domieszka akceptorowa) łączy się krzem z atomami o przeważającej liczbie dziur. Stosowanymi pierwiastkami mogą być np.: bor, glin, gal. Duża łatwość pozyskania materiałów na ich produkcję oraz wysoka sprawność przekraczająca 16% jest przyczyną ich powszechnego użycia. Ogniwa krzemowe można dodatkowo podzielić na monokrystaliczne (osiągają sprawność nawet do 18%) i polikrystaliczne. Wadą tej generacji jest energochłonny proces produkcji oraz konieczność zastosowania dużej ilości materiału do wykonania grubej warstwy pochłaniającej promieniowanie słoneczne. Do drugiej generacji ogniw fotowoltaicznych zalicza się ogniwa cienkowarstwowe. Zaletą tego typu ogniw jest ich niska waga [2] oraz ograniczenie wykorzystywania drogich materiałów. Redukuje to cenę produkcji i poprawia stosunek ceny do mocy ogniwa. Aktualnie w użyciu stosowane są ogniwa z tellurku kadmu, selenku miedziowo-indowego oraz amorficznego krzemu. Od trzeciej generacji wymaga się, aby ogniwa przekroczyły poziom 31% sprawności (bariera Shockleya-Queissera) w pojedynczym złączu [3]. Do tej generacji zaliczyć można ogniwa organiczne (wykonane z polimerów) i ogniwa tandemowe (wielozłączowe o różnych przerwach energetycznych). Materiały użyte w procesie produkcji są tanie, a cała konstrukcja odznacza się prostotą wykonania. Mają jednak

bardzo niską sprawność, która oscyluje w okolicy kilku procent. Z tego względu instalowanie tego typu ogniw powinno odbywać się na dużych terenach. Systemy fotowoltaiczne utworzone z ogniw tandemowych mają zwiększoną sprawność. Zwiększa się wraz z liczbą pochłanianych długości fal z promieniowania słonecznego i może wynosić nawet do 40% [2].

Cele stawiane nowoczesnej energetyce wymuszają przyrost zainstalowanych źródeł PV. Strategia rozwoju zakłada, że do 2040 roku moc zainstalowana wyniesie łącznie 20,2 GW (Tab.1). W roku 2018 nastąpił przełom. W trakcie 12 miesięcy w udało się uzyskać 339,5 MW energii w mikroinstalacjach [4]. Ogólną tendencję prognozowanego rozwoju źródeł PV potwierdza dynamika ich przyrostu na Lubelszczyźnie.

*Tab. 1. Polityka energetyczna Polski do 2040 r.*

<b>Moc zainstalowana w poszczególnych latach według PEP2040</b>			
do 2030 r.	do 2035 r.	do 2040 r.	obecnie
GW	GW	GW	GW
10,2	15,2	20,2	2,68

## **REGULACJE PRAWNE MAJĄCE WPLYW NA ROZWÓJ FOTOWOLTAICZNYCH INSTALACJI PROSUMENCKICH W POLSCE**

Mając na uwadze politykę proekologiczną Unii Europejskiej, aspekty ekonomiczne i konieczność dywersyfikacji źródeł energii elektrycznej 20 lutego 2015 roku została opublikowana ustawa o odnawialnych źródłach energii. Zawiera ona definicje i uwarunkowania prawnego funkcjonowania wszystkich typów OZE. Jednym z kluczowych elementów ustawy było wprowadzenie definicji prosumenta, którego zdefiniowano jako: „odbiorcę końcowego dokonującego zakupu energii elektrycznej na podstawie umowy kompleksowej, wytwarzającego energię elektryczną wyłącznie z odnawialnych źródeł energii w mikroinstalacji w celu jej zużycia na potrzeby własne, niezwiązane z wykonywaną działalnością gospodarczą regulowaną ustawą z dnia 6 marca 2018 r. – Prawo przedsiębiorców (Dz. U. poz. 646, 1479, 1629, 1633 i 2212), zwaną dalej „ustawą – Prawo przedsiębiorców”” [7] Tak wprowadzona definicja prosumenta umożliwiła gospodarstwom domowym produkcję energii elektrycznej na własne potrzeby. Ustawa nałożyła również na Operatora Systemu Dystrybucyjnego obowiązek rozliczania energii elektrycznej

i sprecyzowała zasady tych rozliczeń. Ustawa ta była jednak dyskryminująca dla przedsiębiorców, co wymusiło nowelizację aktu prawnego, która została ogłoszona w dzienniku ustaw z dnia 19 lipca 2019 roku, gdzie prosumenta zdefiniowano jako: „odbiorcę końcowego wytwarzającego energię elektryczną wyłącznie z odnawialnych źródeł energii na własne potrzeby w mikroinstalacji, pod warunkiem że w przypadku odbiorcy końcowego niebędącego odbiorcą energii elektrycznej w gospodarstwie domowym, nie stanowiło przedmiotu przeważającej działalności gospodarczej określonej zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 40 ust. 2 ustawy z dnia 29 czerwca 1995r. o statystyce publicznej (Dz. U. z 2019 r. poz. 649 i 730)” [8]. Znowelizowana ustawa pozwoliła na dołączenie do grona prosumentów przedsiębiorstw, którzy posiadają znacznie większe zasoby finansowe na realizację inwestycji niż gospodarstwa domowe. Efektywność danych instalacji oceniana jest także niezależnie od mechanizmów prawnych wspierających presumpcję. Istotną rolę pełni relacja energii zużytej i jej nadwyżki oddanej do systemu, do energii całkowitej [5].

Ustawa w Art. 40. 1. nakłada na Operatora Systemu Dystrybucyjnego obowiązek zawarcia z odbiorcą umowy prosumenckiej i nazywa go sprzedawcą zobowiązanym. „Obowiązek zakupu energii elektrycznej, o którym mowa w art. 41 ust. 1, art. 42 ust. 1, art. 70c ust. 2 oraz art. 92 ust. 1, wykonuje wyznaczony przez Prezesa URE sprzedawca energii elektrycznej, zwany dalej „sprzedawcą zobowiązanym”, na podstawie umowy, o której mowa w art. 5 ustawy – Prawo energetyczne.

Sprzedawca zobowiązany ma obowiązek dokonać rozliczenia, o którym mowa w art. 4 ust. 1, chyba że rozliczenia dokonuje wybrany przez prosumenta sprzedawca inny niż sprzedawca zobowiązany, na podstawie umowy kompleksowej”. Określa też precyzyjnie zasady rozliczania energii elektrycznej w okresach 12 miesięcznych”. Co w przypadku „sezonowych” źródeł energii, jakimi są instalacje fotowoltaiczne oraz wobec braku technicznych możliwości budowania magazynów energii ma kluczowe znaczenie. Jednocześnie ustawodawca dzieli źródła prosumenckie na źródła do 10 kW, które są rozliczne w stosunku 1:8 oraz powyżej 10 kW, które są rozliczne w stosunku 1:7. Taki sposób rozliczenia zapewnia Operatorowi Systemu Dystrybucyjnego zysk wynikający z różnicy ceny energii oddanej przez prosumenta w okresie dużego nasłonecznienia i pobranej energii w okresie gdy nasłonecznienie jest niewielkie lub nie ma go wcale.

Takie zapisy ustawowe w przypadku „sezonowych” źródeł energii są niezbędnym środkiem obligującym OSD do zawierania umów prosumenckich. Wynika to ze specyfiki wpływu „sezonowego” źródła energii na parametry energii elektrycznej. W szczególności właściwej wielkości napięcia u odbiorców nie będących prosumentami.

Ustawa w swoim obecnym brzmieniu stanowi istotną zachętę do budowy prosumenckich instalacji fotowoltaicznych. Ważnym czynnikiem mającym wpływ na decyzję o podjęciu inwestycji mają aspekty finansowe oferowane przez Państwo w postaci ulgi termomodernizacyjnej, dopłaty do instalacji z funduszy Unii Europejskiej realizowane przez gminy, coraz niższe ceny za panele fotowoltaiczne i przetworniki, wyższa wydajność z 1 m<sup>2</sup>, jak też rosnące ceny energii elektrycznej pozyskiwanej ze źródeł tradycyjnych, które w Polsce wynikają z wysokich opłat emisyjnych.

## **ROZWÓJ MIKROINSTALACJI NA TERENIE WOJEWÓDZTWA LUBELSKIEGO W LATACH 2015–2020**

Ustawa o odnawialnych źródłach energii oraz wprowadzenie taryf prosumenckich zapoczątkowało rozwój instalacji fotowoltaicznych. Do analizy skali zjawiska należy przyrzeć się zarówno danym ilościowym jak i wartościom mocy zainstalowanej. Prezentacja danych na osi czasu powinna pokazać tendencje na bazie reprezentatywnych okresów czasu, czyli w latach 2015–2019, kiedy rozwój prosumpcji mógł dotyczyć wyłącznie gospodarstw domowych oraz w 2019 i 2020, kiedy do grona prosumentów dołączyły podmioty gospodarcze. Analizując dane widać, że w całym badanym okresie występuje systematyczny wzrost liczby instalacji fotowoltaicznych. Dane zestawiono w Tabeli 2.

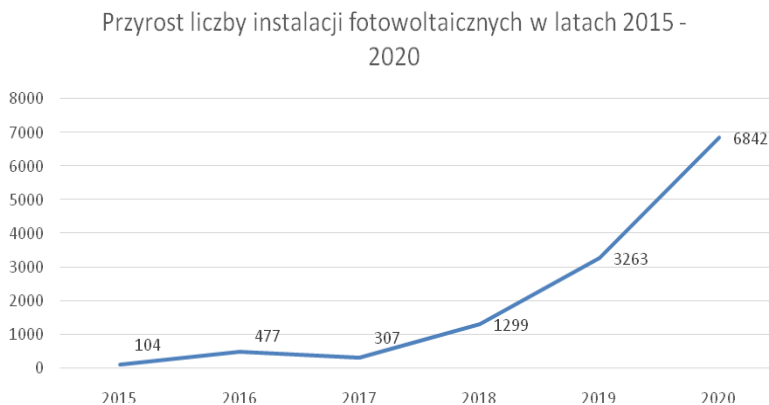
*Tab. 2. Zestawienie ilościowe instalacji fotowoltaicznych na obszarze województwa lubelskiego w latach 2015–2020 (źródło: PGE Dystrybucja Oddział Lublin)*

<b>Moc zainstalowana</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>Suma końcowa</b>
	szt.	szt.	szt.	szt.	szt.	szt.	szt.
1	1	5	3	2	4		15
2	7	77	20	129	103	3	339
3	21	174	74	500	622	974	2365
4	17	47	54	239	660	1843	2860
5	14	57	49	130	473	1143	1866
6	5	38	39	57	359	1001	1499

Moc zainstalowana	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Suma końcowa
	szt.	szt.	szt.	szt.	szt.	szt.	szt.
7	1	13	7	40	238	504	803
8	5	5	12	30	138	304	494
10	4	34	19	50	289	601	997
11–15 kW	7	5	7	33	75	67	194
16–20 kW	3	4	7	30	72	64	180
21–30 kW	1	6	2	21	65	63	158
31–40 kW	2	4	7	32	88	56	189
41–50 kW					13	14	27
51–100 kW	1				1	1	3
101–500 kW	1	2			1		4
501–1000 kW	11				5	2	18
1001–1400 kW	3						3
Suma końcowa	104	477	307	1299	3263	6842	12292

W dużym uproszczeniu można przyjąć, że małe instalacje prosumenckie (do 10 kW) są instalowane w gospodarstwach domowych i w małych firmach. Instalacje powyżej 10 kW, posiadające mniejszą rentowność współczynnika rozliczeniowego, to raczej większe podmioty gospodarcze. Instalacje o mocy powyżej 50 kW zainstalowane przed rokiem 2019 należy zakwalifikować jako „małych” wytwórców, a nie prosumentów. Największa liczba instalacji i największa dynamika przyrostu ich liczby występuje w przedziale od 3 do 5 kW. Podyktowane jest to dofinansowaniem do takich instalacji z funduszy unijnych. Obserwujemy również bardzo dynamiczny wzrost liczby instalacji o mocy zainstalowanej 10 kW, czyli mieszczących się w górnym progu rentowności rozliczenia. Na rysunku 4 pokazano krzywą przyrostu liczby instalacji w latach 2015–2020. W latach 2015–2017 przyrost ten jest dość wypłaszczony, co świadczy o niewielkim wzroście zainteresowania gospodarstw domowych inwestowaniem własnych środków w instalacje fotowoltaiczne. W roku 2018 obserwujemy wzrost dynamiki zainteresowania spowodowany uruchomieniem mechanizmów finansowania ze środków unijnych i z ulgi termomodernizacyjnej. W roku 2019 na wzrost dynamiki nałożyła się nowelizacja ustawy, czyli dołożenie do grona prosumentów przedsiębiorstw. Spowodowało to w 2020 roku ponad dwukrotny przyrost liczby instalacji. Biorąc pod uwagę obecną sytuację rynkową tendencja ta z całą pewnością

będzie się utrzymywała. Obserwowana skala wzrostu w latach 2019–2020 potwierdza skuteczność mechanizmów legislacyjnych i stosowanych dopłat.



Rys. 4. Przyrost liczby instalacji fotowoltaicznych w latach 2015–2020 (źródło: Tabela 2.)

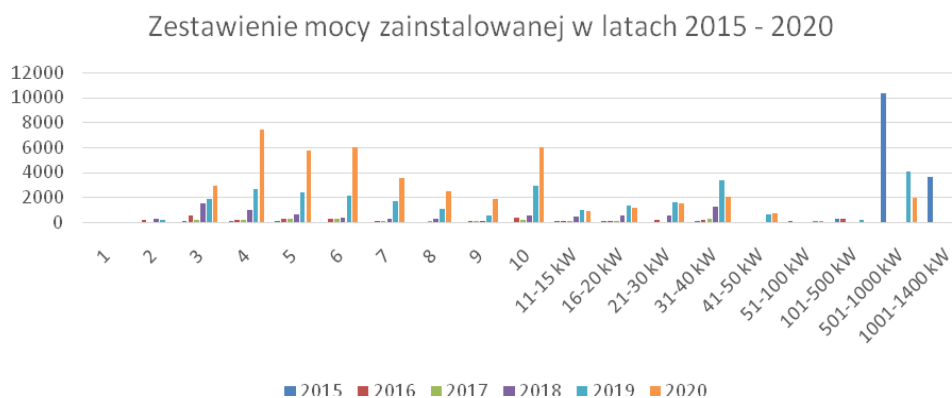
Dla lepszego zobrazowania zjawiska przeanalizowano również przyrost mocy zainstalowanej w badanym okresie. Dane pokazano w Tabeli 3.

Tab. 3. Zestawienie mocy zainstalowanej instalacji fotowoltaicznych na obszarze województwa lubelskiego w latach 2015 – 2020 (źródło: PGE Dystrybucja Oddział Lublin)

Moc zainstalowana	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Suma końcowa
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
1	1	5	3	2	4		15
2	14	154	40	258	206	6	678
3	63	522	222	1500	1866	2922	7095
4	68	188	216	956	2640	7372	11440
5	70	285	245	650	2365	5715	9330
6	30	228	234	342	2154	6006	8994
7	7	91	49	280	1666	3528	5621
8	40	40	96	240	1104	2432	3952
9		54	63	54	513	1818	2502
10	40	340	190	500	2890	6010	9970
11–15 kW	88	69	88	429	967	887	2528
16–20 kW	57	75	129	541	1307	1163	3272
21–30 kW	24	158	42	519	1630	1527	3900
31–40 kW	75	150	255	1243	3344	2022	7089

Moc zainstalowana	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Suma końcowa
	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
41–50 kW					623	691	1314
51–100 kW	96				100	98	294
101–500 kW	300	286			160		746
501–1000 kW	10313				4078	1989	16380
1001–1400 kW	3650						3650
Suma końcowa	14936	2645	1872	7514	27617	44186	98770

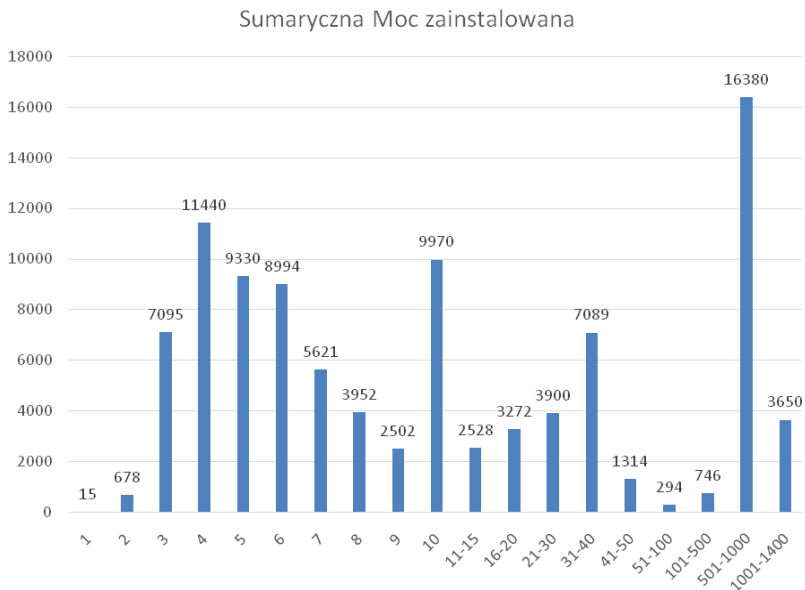
Wizualizację danych przedstawiono na Rys. 5. Najwyższe wartości mocy zainstalowanej pochodzą z instalacji 4–6 kW, a więc dofinansowywanych przez UE. Duży udział mają także instalacje 10 kW. Patrząc na wartości mocy zainstalowanych w wyższych przedziałach największym zainteresowaniem cieszy się przedział 31–40 kW lokalizowany w przedsiębiorstwach.



Rys. 5. Zestawienie mocy zainstalowanej w latach 2015–2020 (źródło: Tabela 3)

Wykorzystują one wyprodukowaną energię w celu obniżenia kosztów funkcjonowania. Analizując wykres wyraźnie widać jak duże znaczenie dla systemu energetycznego będą miały mikroinstalacje prosumenckie do 10 kW. Przy utrzymaniu obecnego tempa rozwoju obserwujemy w ciągu roku ponad dwukrotny wzrosty mocy zainstalowanej. Analiza danych sumarycznych za lata 2015–2020 zobrazowana została na rysunku 6. Wykres potwierdza jak znaczącą rolę w systemie wytwórczym mogą odegrać prosumenckie instalacje fotowoltaiczne.





Rys. 6. Sumaryczna moc zainstalowana kW (źródło: Tabela 3)

## PODSUMOWANIE

Analizując rozwiązania prawne i stosowane zachęty widać, że osiągnięto cel rządu. Po fazie umiarkowanego rozwoju w latach 2015–2018 w roku 2019 nastąpił znaczący wzrost liczby realizowanych inwestycji prosumenckich i należy przyjąć, że tendencja ta będzie się utrzymywała. Dziś instalacje fotowoltaiczne budowane są na otwartej przestrzeni i dotyczy to głównie wytwórców. Budowa na dachach domów mieszkalnych i przedsiębiorstw dotyczy głównie prosumentów. Z biegiem lat krzywa dynamiki wzrostu ilości mocy zainstalowanej zacznie się wypłaszczać ze względu na stopień nasycenia instalacjami. Wśród konsumentów energii elektrycznej jest jeszcze ogromna grupa potencjalnych prosumentów zorganizowanych we spółdzielnie mieszkaniowe, które zgodnie z dzisiejszymi regulacjami prawnymi nie mogą korzystać z dobrodziejstwa prosumpcji. Należy spodziewać się jednak kolejnej nowelizacji ustawy, która doprowadzi do kolejnego lawinowego wzrostu ilości mocy zainstalowanej. Oczywiście rozwój wyłącznie „sezonowych” źródeł energii z punktu widzenia stabilności krajowego systemu energetycznego jest bardzo szkodliwy. „Sezonowość” prosumenckich źródeł energii może mieć negatywny wpływ na parametry

energii elektrycznej. Należy wymienić tutaj odchylenia napięcia, wahania napięcia, asymetrię napięcia, harmoniczne napięcia.

Dlatego oprócz instalacji fotowoltaicznych muszą powstawać stabilne ekologiczne źródła wytwórcze, które również zostały ujęte w ustawie. Należy zaliczyć do nich: mikroelektrownie wodne, mikroelektrownie wiatrowe, mikrosystemy kogeneracyjne na biogaz i biopłyn oraz ekologiczne kotły do spalania biomasy.

## LITERATURA

- [1] Miczyńska-Kowalska M., *Rozwój prosumpcji energii elektrycznej na przykładzie gmin powiatu lubelskiego* [w:] *Wybrane aspekty zrównoważonego rozwoju obszarów wiejskich*, Kasztelan A., Hawlena J., Instytut Naukowo-Wydawniczy Spatium, Radom 2020
- [2] Chwieduk B., *Ogniwa fotowoltaiczne – budowa, działanie, rodzaje*, „Polska Energetyka Słoneczna”, Nr I-IV/2015, 15–20
- [3] Klugmann-Radzimska E., *Technologiczny postęp w fotowoltaice*, „Czysta energia”, 2014, nr 5
- [4] Gelberg M., *Program PV, Pod Parasolem*, PGE Polska Grupa Energetyczna SA, lipiec-sierpień 2019, 22–23
- [5] Kacejko P., Pijarski P., Gałązka K., *Ocena efektywności generacji energii elektrycznej w instalacjach fotowoltaicznych odbiorców przemysłowych*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 10/2019, 64–67
- [6] Wancerz M., Miller P., *Problemy napięciowe w instalacjach niskiego napięcia z dużą koncentracją mikroźródeł*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 7/2018, 34–37
- [7] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. 2015 poz. 478
- [8] Ustawa z dnia 19 lipca 2019 r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw, Dz. U. 2019 poz. 1524.

## **ROZWÓJ ELEKTROMOBILNOŚCI W KRAJU I NA ŚWIECIE**

### **WSTĘP**

Pojazdy, które wykorzystują w swojej specyfice działania napędy alternatywne lub do zasilania potrzebują paliwa alternatywnego są w obecnych czasach bez wątpienia wielkim krokiem w przód na drodze do mobilności. Niewątpliwie inwestycje w elektromobilność pozwolą wykształcić ekologicznie czysty transport, a co za tym idzie przyniosą szereg korzyści takich jak poprawa jakości powietrza czy ograniczenie negatywnych skutków zdrowotnych.

Elektromobilność niesie za sobą też poważne problemy, jednym z nich jest zwiększenie elastyczności przekształcania energii elektrycznej w skutek zwiększonej liczby urządzeń wykorzystujących taką energię. W efekcie zaistniałego problemu pojawiły się nowe grupy urządzeń w postaci przekształtników energoelektronicznych, dzięki którym możliwe są się swobodne sterowania procesami przemiany energii elektrycznej na inne użyteczne formy.

Przedstawione nam założenia Ministerstwa Energii dotyczące rozwoju elektromobilności, wśród których jest szacowanie, że do roku 2025 w Polsce będzie już 1 milion pojazdów elektrycznych. Spełnienie takiego założenia będzie wymagało odpowiednich warunków, zaproponowania zachęt w wielu obszarach, w tym również dotyczących infrastruktury ładującej.

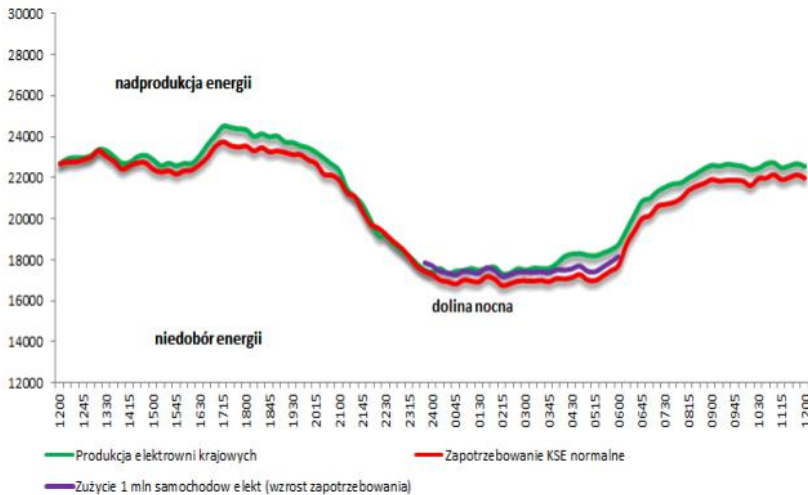
### **ROZWÓJ ELEKTROMOBILNOŚCI W POLSCE**

Plan Rozwoju Elektromobilności według Ministerstwa Energii stara się określić korzyści jakie będą związane ze zwiększeniem wykorzystania pojazdów elektrycznych w Polsce oraz stara się przedstawić potencjał gospodarczy i przemysłowy. Plan ten przewiduje, że wraz z rozwojem elektromobilności poprawie ulegnie też jakość powietrza, zostanie zwiększone bezpieczeństwo energetyczne w naszym państwie oraz przewiduje rozwój nowych technologii i przemysłu.

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, fkopczynski2@gmail.com

Rozwój elektromobilności znacząco przyczyni się także do rozwoju magazynowania energii przez baterie samochodowe oraz magazyny energii przy punktach ładowania pojazdów. Dzięki temu pojazdy elektryczne będą traktowane jako zasobniki energii, które będą oddawać swoją energię momencie kiedy zapotrzebowanie na energię jest najwyższe, a ładować się będą w nocy, czyli podczas tzw. doliny nocnej [2, 3].



Rys.1. Zapotrzebowanie KSE i produkcja elektrowni krajowych [MW][3]

## ETAPY ROZWOJU ELEKTROMOBILNOŚCI

Ze względu na to, że w Polsce rynek pojazdów elektrycznych nie jest jeszcze bardzo rozbudowany, o czym świadczy bardzo mała ilość infrastruktury ładowania pojazdów oraz mała sprzedaż pojazdów elektrycznych. Dokument wystosowany przez Ministerstwo Energetyki przedstawia nam trzy etapy, które mają nam zapewnić przejście do kolejnych faz rozwoju elektromobilności.

### *Etap 1*

Faza pierwsza, która będzie miała miejsce w 2016–2018, będzie miała charakter przygotowawczy. Celem tej fazy będzie przyciągnięcie uwagi społeczeństwa i wytworzenie w ich świadomości zainteresowania elektromobilnością. Dzięki tym działaniom jak zachęcanie do zakupu pojazdów do użytku własnego, ale także firmowego i publicznego, możliwym będzie zmaksymalizowanie działań związanych z budową infrastruktury oraz rozwoju przemysłu elektromobilnego. Przewiduje się, że w tym okresie powstaną też prototypy

pojazdów, które będą przystosowane do rynku polskiego i europejskiego. Na tym etapie zostaną też utworzone warunki rozwoju elektromobilności po stronie regulacyjnej, których zakres zostanie doprecyzowany w Krajowych Ramach Polityki Rozwoju Paliw Alternatywnych. W tych początkowych latach rozwoju elektromobilności zostaną zaproponowane narzędzia służące integracji pojazdów elektrycznych z siecią, samochody zostaną wyposażone w narzędzia służące poprawie jakości powietrza oraz zostanie powołany Operator Informacji Pomiarowej, którego zadaniem będzie zintegrowanie informacji o zachwianiach wszystkich użytkowników sieci elektroenergetycznej.

### ***Etap 2***

Druga faza będzie realizowana w latach 2019–2020 i będzie dotyczyła aspektów technicznych takich jak: umiejscowienie stacji ładowania pojazdów, budowa infrastruktury zasilania pojazdów elektrycznych i napędzanych gazem ziemnym, produkcja krótkich serii pojazdów elektrycznych. Etap ten będzie też obejmował prowadzenie czynności, których celem będzie zwiększenie zainteresowania transportem elektrycznym.

### ***Etap 3***

Ten etap będzie miał miejsce w latach 2021–2025. Jego celem będzie doprowadzenie do postrzegania elektromobilności jako niezbędnej w celu sprostaniu wyzwaniu dynamicznie rozwijającej się rzeczywistości. Sieć energetyczna będzie już w pełni gotowa i przystosowana na dostarczenie energii dla 1 mln pojazdów elektrycznych oraz dostosowana do wykorzystania pojazdów elektrycznych w celu ustabilizowania systemu elektroenergetycznego. Administracja będzie już w posiadaniu tzw. *eko-floty* i będzie udostępniać infrastrukturę ładowania mieszkańcom. Będzie miało to na celu dalsze promowanie elektromobilności. Polski przemysł będzie już produkować wysokiej jakości podzespoły dla pojazdów elektrycznych, pojazdy elektryczne oraz niezbędne dla rozwoju elektromobilności oprzyrządowanie i infrastrukturę [2, 3].

## **ŁADOWANIE POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH**

Obecnie na rynku można rozróżnić takie sposoby ładowania pojazdów elektrycznych jak:

- wymiana całego zestawu akumulatorów – polega na mechanicznej wymianie akumulatorów, które są wykorzystywane w pojeździe

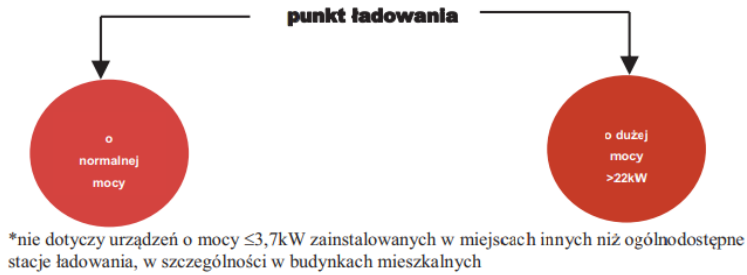
- ładowanie solarne – taki sposób ładowania jest możliwy dzięki umieszczeniu paneli fotowoltaicznych na dachu pojazdu, jednakże nie jest to efektywna forma ładowania, ponieważ energia wytworzona przez cały dzień wystarcza na pokonanie ok. 5 km
- ładowanie pantografowe – zastosowanie znajduje w pociągach, tramwajach i trolejbusach; ładowanie tą metodą polega na połączeniu się instalacji na dachu pojazdu z napowietrzną linią trakcyjną za pomocą wysuwanego pantografu
- ładowanie bezprzewodowe (indukcyjne) – instalacje opierające się na ładowaniu bezprzewodowym wykorzystują indukcyjne przekazywanie energii, czyli zasadę indukcyjności lub rezonansu magnetycznego i obecnie są w fazie testów. Takie rozwiązanie nie jest w stanie zastąpić tradycyjnego ładowania, ale pozwala zwiększyć zasięg pojazdu, np.: umożliwia doładowanie autobusów podczas ich postoju na przystanku
- ładowanie przewodowe – wykorzystując tą metodę konieczne jest samodzielne podłączenie samochodu do urządzenia ładującego za pomocą przewodu [4].

Metoda ładowania przewodowego charakteryzuje się wieloma wadami:

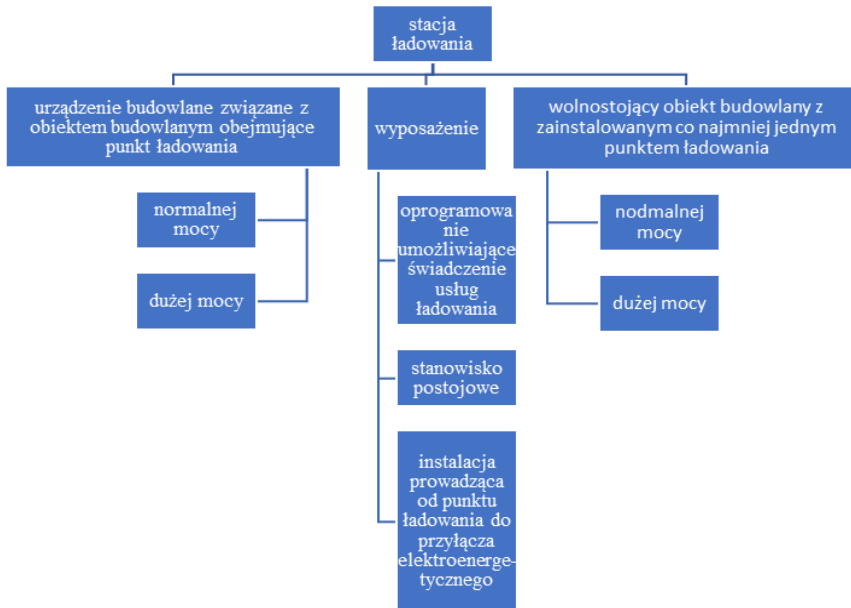
- za każdym razem kiedy pojazd jest ładowany następuje konieczność samodzielnego podłączenia i odłączenia przewodu zasilającego
- występuje niebezpieczeństwo związane z porażeniem
- niskie temperatury (np. podczas zimy) mogą powodować kłopoty podczas podłączania
- ze względu na widoczne gniazdo zostaje zmniejszona estetyka pojazdu,
- możliwe jest uszkodzenie stacji ładowania przez wandalę [4].

Mimo tych wad, ładowanie przewodowe jest najkorzystniejszym sposobem ładowania pojazdów osobowych.

W Ustawie z dnia 11 stycznia 2018 roku o elektromobilności i paliwach alternatywnych urządzenie umożliwiające ładowanie pojedynczego pojazdu elektrycznego, pojazdu hybrydowego i autobusu zeroemisyjnego zostało określone jako punkt ładowania [5].



Rys. 2. Klasyfikacja punktów ładowania wg [5]



Rys. 3. Definicja stacji ładowania (opracowanie własne na podstawie[5])

Ta tej samej ustawie zostało także zdefiniowane czym jest stacja ładowania (Rys. 3). Stacja ładowania oraz punkty ładowania stanowiące element infrastruktury ładowania publicznego transportu drogowego powinny spełniać wymagania techniczne i eksploatacyjne określone w szczególności w Polskich Normach, zapewniające ich bezpieczne użytkowanie obejmujące bezpieczeństwo pożarowe, bezpieczne funkcjonowanie sieci elektroenergetycznych oraz dostęp do stacji ładowania dla osób niepełnosprawnych [4].

Punkt ładowania i stacja ładowania bardzo często są traktowane w literaturze jako synonimy. Te pojęcia pojawiają się pod takimi nazwami jak punkt dołado-

wania, ładowarka *EV*, *EVC (EV Charger)* lub *EVSE (electric vehicle supply equipment)* [4].

Elektryczne punkty doładowania są charakteryzowane przez takie cechy jak:

- poziom – opisujący moc wyjściową *EVSE*
- typ – określa gniazdo i wtyczkę przeznaczone do ładowania
- tryb – opisuje protokół komunikacyjny między pojazdem a ładowarką.

Tab. 1. Poziomy i typy ładowarek *EV* stosowanych w Europie[6]

Rodzaj ładowania	Poziom	Prąd	Moc	Typ
	Poziom 1	AC	$\leq 3,7$ kW	Urządzenia zainstalowane w prywatnych gospodarstwach domowych, których głównym celem nie jest ładowanie pojazdów elektrycznych
Ładowanie wolne	Poziom 2	AC	$>3,7$ kW i $\leq 22$ kW	IEC 62196 Type 2
	Poziom 2	AC	$\leq 22$ kW	Złącze Tesli
Ładowanie szybkie	Poziom 3	AC, trójfazowy	$> 22$ kW i $\leq 43,5$ kW	IEC 62196 Type 2
	Poziom 3	DC	$< 200$ kW	CCS Combo 2 Connector (IEC 62196 Type 2 & DC)
	Poziom 3	DC	$< 150$ kW	Złącza Tesla i CHAdeMO

Czas ładowania elektrycznych samochodów osobowych jest różny, a jego długość zależy od tego jaka jest doprowadzana moc przez stację ładowania (w kW), rodzaju prądu jaki wykorzystuje ładowarka (stały lub przemienny) oraz od rodzaju złącza. Szybkie ładowanie czyli Poziom 3 może nam zapewnić naładowanie baterii do pełna nawet w 1 godzinę, dla porównania, ładowanie przy użyciu ładowarek Poziomu 1 może trwać do 14 godzin [4].

## SMART GRID

Inteligentne systemy elektroenergetyczne (ang. *Smart Grid*) są tworzone w celu opracowania rozwiązań, które pozwoliłyby nam na nadążenie za stale powiększającymi się wymaganiami stawianymi przez odbiorców w stosunku do dostawców energii elektrycznej. W potocznym rozumieniu ten termin oznacza nic innego jak wykorzystanie środków IT w celu dostarczenia odbiorcom energii elektrycznej. Żeby taki system mógł osiągnąć maksimum funkcjonalności wy-

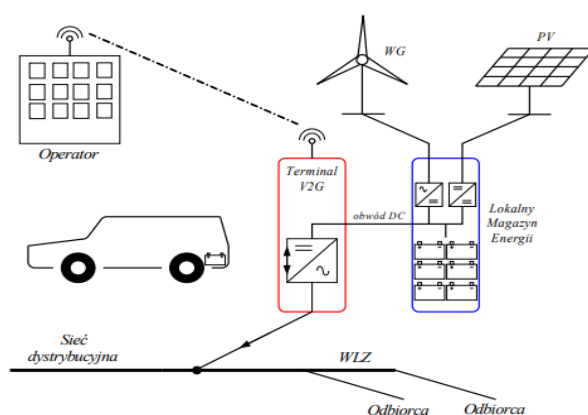


magana jest również współpraca ośrodków badawczych z biznesem i przedsiębiorstwami innowacyjnymi. Rozwojowi tej technologii sprzyja wiele czynników, do których można zaliczyć:

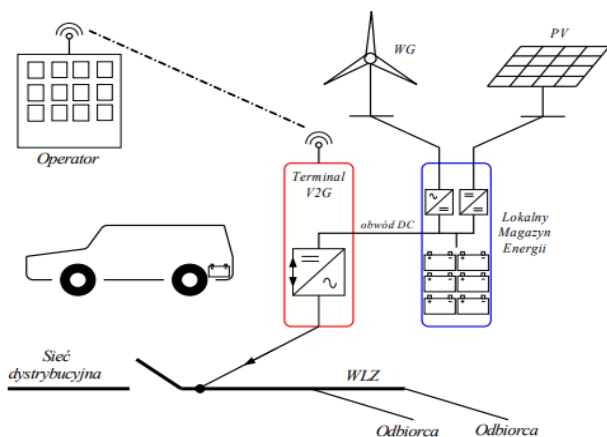
- zminimalizowanie kosztów usług elektroenergetycznych dzięki optymalnej i ciągłej integracji przyjaznych lokalnych zasobów energii
- poszerzenie funkcjonalności usług świadczonych przez dostawcę na rzecz odbiorcy tj. inteligentne opomiarowanie i fakturowanie, zarządzanie energią oraz monitorowanie warunków jej dostawy
- zapewnienie bezpieczeństwa energetycznego dzięki eliminacji przerw w dostarczeniu odbiorcom usług energetycznych
- integrację rozproszonych źródeł odnawialnych o ograniczonej dyspozycyjności mocy i energii
- zapewnienie zróżnicowania i zindywidualizowania poziomów jakości dostarczanej energii [7].

## V2G – VEHICLE TO GRID

Technologia V2G opiera się na zasadzie dwukierunkowego przepływu energii w terminalu. Taki przepływ energii jest możliwy do zrealizowania, jeżeli wykorzystamy energoelektroniczny przekształtnik dwukierunkowy. Jednakże taki system nie składa się tylko z samych przekształtników, do działania konieczna jest również platforma teleinformatyczna wykorzystywana do akwizycji danych o aktualnym stanie każdego z pojazdów oraz terminali ładowania.



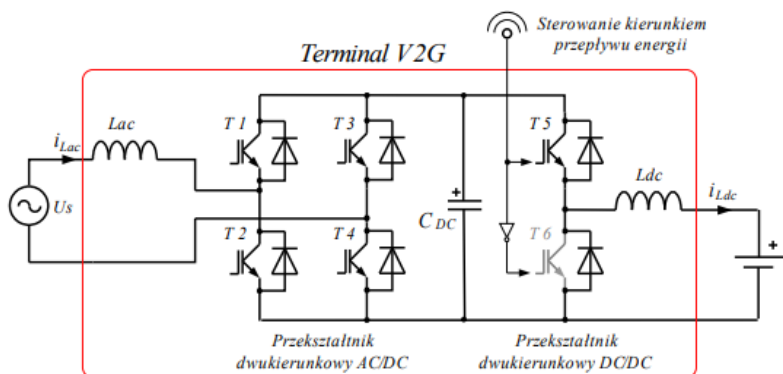
Rys. 4a. Wykorzystanie technologii V2G w sieciach niskiej napięć – kompensacja mocy biernej i mocy odkształcenia [1]



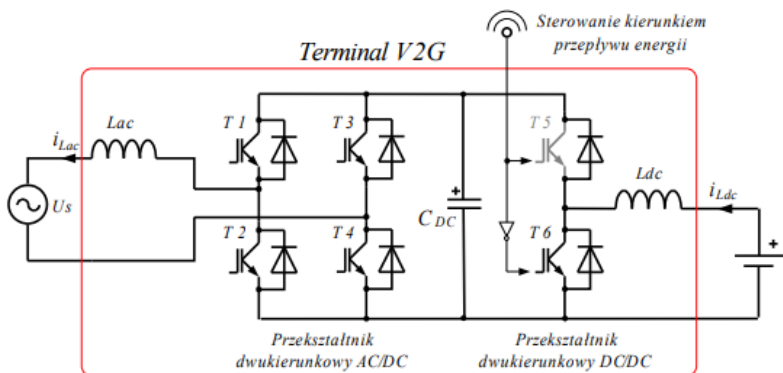
Rys. 4b. Wykorzystanie technologii V2G w sieciach niskich napięć – zasilanie awaryjne [1]

Ta technologia pełni więc funkcje rozliczeniowe oraz może pełnić w połączeniu z Operatorem Systemu funkcje decyzyjne. Energia jaka została zgromadzona w bateriach może zostać wykorzystana przez Operatora na poziomie sieci niskich napięć ze względu na małe moce [1].

Technologia V2G może stanowić bardzo dobre uzupełnienie w sieciach promieniowych niskich napięć. Mimo, że sumaryczna energia jaka jest zgromadzona w bateriach EV osiąga duże wartości to ze względu na jej „rozcłonkowanie” nie może zostać wykorzystana do stabilizacji częstotliwości w systemie energetycznym, ponieważ nie jest możliwe żeby w jednej określonej lokalizacji i w jednym czasie została przyłączona duża liczba pojazdów do sieci dystrybucyjnej w celu bilansowania mocy [1].



Rys. 5a. Układy energoelektroniczne w terminalu V2G – tryb ładowania zasobników energii [1]

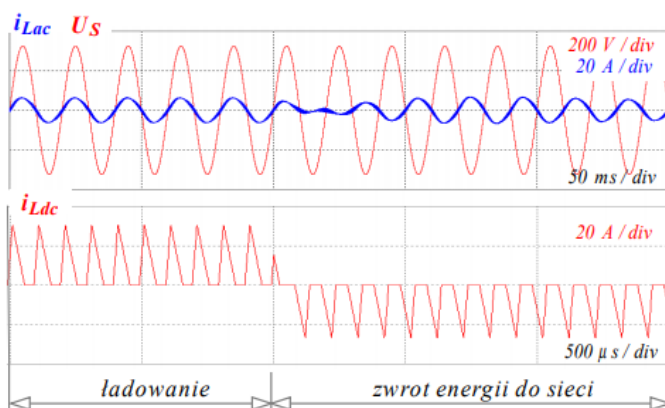


Rys. 5b. Układy energoelektroniczne w terminalu V2G – tryb zwrotu energii do sieci [1]

Jakie przydatne funkcje z punktu widzenia systemu mogą pełnić terminale ładowania pojazdów? Rysunek 4 przedstawia ideę wykorzystania technologii V2G w sieciach niskiego napięcia, terminal V2G został przedstawiony na tym rysunku w dwóch trybach pracy: *online* (Rys. 4a) i *offline* (Rys. 4b).

Dzięki implementacji do struktury terminala dwukierunkowych przekształtników energoelektronicznych mogą one realizować takie funkcje jak: stabilizacja napięcia, kompensacja mocy biernej, kompensacja mocy odkształcenia, zasilania awaryjnego (lokalnie), sprzężanie źródeł rozproszonych z siecią.

Rysunek 5 przedstawia uproszczone schematy części energoelektronicznej terminala V2G, który realizuje funkcję ładowania lokalnego zasobnika energii *ES* lub akumulatorów *EV* (Rys. 5a) oraz zwrotu energii pochodzącej z *ES* lub akumulatorów *EV* do sieci dystrybucyjnej (Rys. 5b).



Rys.6. Przebiegi czasowe napięcia sieci dystrybucyjnej  $U_S$  oraz prądów:  $i_{Lac}$  po stronie AC oraz  $i_{Ldc}$  po stronie DC terminala V2G

W układzie na rysunku 5, zwrot energii jest realizowany przez zmianę kierunku energii w przekształtniku dwukierunkowym DC/DC. Ze względu na dopasowanie napięciowe zasobnika energii oraz obwodu DC dwukierunkowego przekształtnika AC/DC jest to przekształtnik typu Buck-Boost. W takim przekształtniku zmiana kierunku jest wymuszona przez blokowanie pracy jednego z tranzystorów np.: T5 (OFF) – praca typu boost, przekazywanie energii do kondensatora CDC i dalej przez przekształtnik AC/DC do sieci dystrybucyjnej; T6 (OFF) – praca typu Buck, ładowanie akumulatora EV lub zasobnika ES z kondensatora CDC, który jest doładowywany przez przekształtnik AC/DC. Zmiana trybu pracy i kierunku przepływu energii jest widoczna w zmianie biegunowości prądu induktora Ldc oraz zmianie fazy prądu induktora Lac i została przedstawiona na rysunku 6 [1].

## PODSUMOWANIE

Rozwój elektromobilności będzie wymagał długoletnich inwestycji, które spowodują konieczność wdrożenia nowych rozwiązań prawnych i ekonomicznych, które zagwarantują równy dostęp do rynku. Przepisy, które będą tworzone powinny być przyjazne dla konsumentów, w celu zachęcenia ich do zakupu oraz korzystania z pojazdów elektrycznych.

Infrastruktura ładowania pojazdów elektrycznych jest istotnym czynnikiem wpływającym na rozwój elektromobilności. W związku z tym konieczne jest zadbanie o to, aby liczba stacji do ładowania była na tyle duża żeby możliwość skorzystania z takiej stacji nie ograniczała kierowców.

Dynamika, jaką można osiągnąć dzięki technologii V2G, pozwoli uniezależnić jakość dostawy energii elektrycznej od zjawisk atmosferycznych lub zdarzeń w sieci. Przez to koniecznym staje się rozwój technologii dwukierunkowych przekształtników energoelektronicznych do zastosowań energetycznych umożliwiających wpływanie na parametry energii elektrycznej.

## LITERATURA

- [1] Benysek G., Jarnut M., *Wykorzystanie układów energoelektronicznych w technologii SmartGrid oraz V2G*, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Elektrycznej, Zielona Góra 2010
- [2] Flaszka J., Matuszczyk P., *Elektromobilność w Polsce a systemy OZE*, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, NR 1/2018, 2018

- [3] *Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce, Ministerstwo Energii*, Warszawa 2016
- [4] Sendek-Matysiak E., Szumska E., *Infrastruktura ładowania jako jeden z elementów rozwoju elektromobilności w Polsce*, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, 2018
- [5] Ustawa z dnia 11 stycznia 2018 r. o elektromobilności i paliwach alternatywnych. [http://orka.sejm.gov.pl/opinie8.nsf/nazwa/2147\\_u/\\$file/2147\\_u.pdf](http://orka.sejm.gov.pl/opinie8.nsf/nazwa/2147_u/$file/2147_u.pdf)
- [6] Global EV Outlook 2017. *Two milion and counting*. [www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVO Outlook2017.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVO Outlook2017.pdf)
- [7] Cieśla A., Hanzelka Z., *Inteligentne systemy elektroenergetyczne* (ang. Smart Grid) <http://www.smartgrid.agh.edu.pl/index.php/84-smgrid-rozne/104-inteligentne-systemy-elektroenergetyczne-ang-smart-grid>.

## **WYKORZYSTANIE TECHNOLOGII 5G W AUTOMATYCE PRZEMYSŁOWEJ**

### **WSTĘP**

Omawiając współczesne technologie stosowane w najnowocześniejszych fabrykach należy zacząć od przytoczenia pojęcia „Przemysł 4.0”. Odnosi się on do trwającej obecnie czwartej rewolucji przemysłowej. Jej głównym zadaniem jest jak największa automatyzacja procesu produkcyjnego, a także połączenie maszyn uczestniczących w tym procesie w jedną wspólną sieć, w obszarze której mogłyby bezproblemowo wymieniać pomiędzy sobą informacje (Internet of Things – IoT). Coraz większe ograniczanie ingerencji człowieka w produkcję wymaga jednak, aby wymiana danych pomiędzy poszczególnymi maszynami (machine to machine – M2M) odbywała się z bardzo niewielkimi opóźnieniami. Dodatkowo jest wymagana umiejętność samokontroli zespołu maszynowego nad wykonywaną pracą [1].

Jako rozwiązanie problemu kontaktu pomiędzy maszynami nadzieja jest połączana w technologii 5G. Termin „5G” odnosi się do najnowszej generacji standardu sieci komórkowej. Zadaniem niniejszego artykułu jest omówienie sposobów w jakich jest wykorzystywana technologia 5G we współczesnym przemyśle.

### **MOŻLIWOŚCI TECHNOLOGII 5G**

Od czasu wprowadzenia na rynek konsumencki sieci komórkowej pierwszej generacji (1G) w latach osiemdziesiątych po dziś dzień, techniki telekomunikacji zmieniły się niemal nie do poznania. Co dekadę coraz to nowsze rozwiązania debiutowały na rynku sprzedaży, zwiastując tym samym kolejne generacje telefonii komórkowej. Obecnie wchodzimy w jej piątą generację. Postępy poczynione w rozwoju sieci komórkowej są też odzwierciedleniem postępów dokonywanych w pozostałych branżach przemysłowych. Z tego też powodu oczekuje

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, olga.gorczyca@pollub.edu.pl

się od sieci 5G, że będzie ono narzędziem do digitalizacji skomplikowanych procesów przemysłowych.

Ważną zaletą sieci 5G jest jej architektura definiowana programowo. Oznacza to przede wszystkim, że cechy tej sieci będą zależeć głównie od jej oprogramowania implementującego podstawowe funkcje, a nie sprzętu. Dedykowane rozwiązania sprzętowo-programowe pozostaną porzucone na rzecz odpowiednio zaprogramowanych powszechnie dostępnych urządzeń. Możliwość odpowiedniego zaprogramowania do własnych potrzeb zapewnia sieci 5G bardzo szeroką gamę zastosowań [3]. Jedną z funkcjonalności 5G wspierającą tą cechę jest tzw. „*network slicing*” pozwalająca na podział pojedynczego połączenia sieciowego na kilka połączeń wirtualnych o różnych funkcjach i zastosowaniach [3, 4].

By móc sprostać oczekiwaniom wobec sieci 5G, a także i odpowiednio wspierać jej najważniejsze cechy, prędkość przesyłu danych musi osiągać odpowiednio wysokie wartości. Opóźnienie w przesyśle tych danych również musi być jak najmniejsze, aby móc stosować sieć w rozwiązaniach technicznych. Również i w tym aspekcie najnowsza technologia nie zawodzi. Prędkości transmisji danych dla sieci 5G wynoszą średnio ok. 10 Gb/s, a opóźnienie w ich przesyśle 1 ms. Porównując te wartości z obecnie z dominującymi sieciami 4G LTE można zauważyć, że sieć nowej generacji jest przynajmniej 10 razy szybsza. Przedstawione wartości parametrów sieci 5G są wystarczające do użycia ich w rozwiązaniach technicznych [1].

Dzięki wszystkim przedstawionym cechom, wykorzystanie sieci 5G w rozwiązaniach technologicznych zapewnia odpowiednie narzędzia oraz parametry pracy wymagane w problemach technicznych o większym stopniu rozbudowania i złożoności.

## **KONCEPCJA FABRYK PRZYSZŁOŚCI PRZY WYKORZYSTANIU SIECI 5G**

Głównym hasłem reklamowym nowej ery przemysłu jest automatyzacja procesów technologicznych. Poprzez zmniejszenie bezpośredniego zaangażowania człowieka w produkcję dóbr, oczekuje się zwiększenia sprawności i jakości wykonywanej pracy. Najważniejszymi technologiami, a zarazem najprężniej rozwijającymi się wykorzystywanymi w przemyśle są: druk 3D, nanotechnologie, technologie czujnikowe, sztuczna inteligencja oraz roboty i drony. Niestety, użyteczność wspomnianych technologii jest silnie związane z ich możliwo-

ściami komunikacyjnymi z innymi urządzeniami. Możliwość tej komunikacji będzie zapewniona przy zastosowaniu sieci 5G.

W fabrykach przyszłości wymagania co do sieci znacznie wykraczają poza jej obecne możliwości. Połączenie bardzo niskich czasów opóźnień przesyłu, wysokiej prędkości i niezawodności jest czymś co tylko najnowsza sieć 5G może zapewnić. Dzięki temu najnowsza sieć komórkowa znajdzie niezliczoną ilość nowych zastosowań.

Tab. 1. Wymagania fabryk przyszłości i cechy sieci 5G, które spełniają te wymagania [2]

Parametr	Wymaganie fabryki	Rozwiązanie problemu ze strony 5G
Niezawodność	Lepszy zasięg i wydajność dla urządzeń IoT i ich użytkowników	Bardzo duża niezawodność, 99,999% pakietów
Opóźnienie	1 ms lub mniej	1–10 ms
Gęstość połączenia	Wsparcie dla ogromnych gęstości urządzeń IoT, min. 100 urządzeń/m <sup>2</sup>	Wspiera 1 tysiąc – 1 milion urządzeń/m <sup>2</sup>
Mobilność	Płynna mobilność dla zapewnienia niezawodnego działania i wszechobecnej łączności	Wydajność mobilności może zostać zwiększona poprzez multi łączność
Żywotność baterii	Duża żywotność baterii by mogła ona wspierać miliardy urządzeń IoT o niskiej mocy i koszcie utrzymania	Żywotność do 10 lat
Dostępność	Nieprzerwany dostęp do usługi przez cały rok	Dostęp do usługi zapewniony 99,999% czasu
Zasięg	Łącze szerokopasmowe zapewnione w obszarach o wysokim zagęszczeniu urządzeń	Dostęp do łącza szerokopasmowego w miejscach zamkniętych
Ochrona	Udoskonalenie metod zapewniania bezpieczeństwa dla całej sieci przez szyfrowanie end-to-end, zapewnienie prywatności tożsamości i lokalizacji	Silna ochrona zapewniona przez szyfrowanie end-to-end, wzajemne uwierzytelnianie urządzenie–sieć
Łącze danych	Szybsze łącze danych w komunikacji pomiędzy maszynami	10–100 razy szybsze połączenie
Prędkość transmisji danych	Większa prędkość transmisji danych w czasie rzeczywistym niż ta występująca obecnie	Największa prędkość transmisji wynosi 20 Gb/s w downlink i 10 Gb/s w uplink
QoS	Klasyfikacja i priorytetyzacja obciążeń	Elastyczna struktura QoS wspierająca przekierowania obciążeń



W celu zmniejszenia kosztów produkcji wymagane jest między innymi zwiększenie wydajności siły roboczej. Jest to coś, co sieć 5G może zagwarantować. W tym celu też zostały podjęte odpowiednie kroki, aby zapewnić możliwość implementacji 5G. W kwietniu 2018 roku, zostało założone „5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA)”. Jego celami są stworzenie pomostu pomiędzy technologią operacyjną, a technologią informacyjną i komunikacyjną oraz zapewnienie zgodności pomiędzy wymaganiami przemysłu i implementacją oraz standaryzacją 5G. Pozwoli to na zupełną integrację sieci 5G z fabrykami przyszłości [5]. Obecnie prowadzone jest szereg projektów mających na celu implementację technologii 5G w nowoczesnych fabrykach.

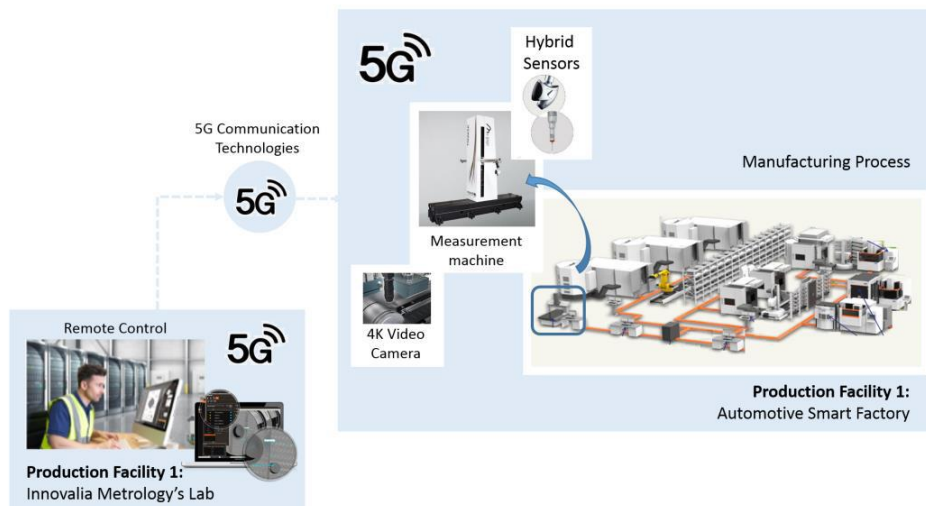
Jednym ze wspomnianych projektów wykorzystujących technologię 5G jest „Digital Twin”, rozwijany przez grupę 5G Infrastructure for Public Private Partnership (5G PPP). Zakłada on utworzenie wirtualnej reprezentacji funkcjonującej fabryki i jej linii produkcyjnej w celu przeprowadzania symulacji jej działania. W przypadku wystąpienia odchylenia od normy w produkcji, np. opóźnienie w montażu, zostaną przeprowadzone symulacje rozważające najlepszy tok działań jaki powinien zostać podjęty, w celu rozwiązania problemu. Aby mogło to zostać zrealizowane wymagane jest wyposażenie maszyn w dużą ilość czujników, które ciągle wysyłały potrzebne dane do symulacji. Ilość informacji przesyłana w jednostce czasu byłaby wtedy bardzo duża, a i wymagane jest także by dane były przesyłane z minimalnymi opóźnieniami, dlatego też stosowana jest sieć 5G celem efektywnego wykonania tego zadania [5].



*Rys. 1. Implementacja Digital Twin (po lewej Digital Twin, po prawej rzeczywista fabryka)[5]*

Innym z projektów tej samej grupy jest wykorzystanie 5G do stworzenia nowych funkcji dla bezdefektowego systemu produkcji. Jednym z nich jest zdalna konfiguracja maszyny współrzędnościowej (CMM). W celu poprawnego działania CMM musi być ona wcześniej zaprogramowana przez operatora. W tym przypadku 5G jest wykorzystywane do umożliwienia zdalnego programowania

CMM przy użyciu urządzenia przenośnego, które jednocześnie będzie wyświetlać obraz z kamery przechwytyjącej rzeczywiste zachowanie maszyny. Wykorzystana zostanie do tego funkcja network slicing, niskich opóźnień przesyłu oraz niezawodności przesyłu danych sieci 5G [5].



Rys. 2. Koncepcja zdalnej kontroli produkcji [5]

## PRZYKŁADY PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII 5G W PRZEMYSŁE

Jako że sieć 5G jest jeszcze młodą technologią, trudno się doszukiwać jej rozpowszechnionego zastosowania. W tej chwili trwają jeszcze prace nad tym, aby w ogóle zapewnić dostęp do niej na terenie poszczególnych krajów, a co dopiero mówić o praktycznej implementacji. Nie oznacza to jednak, że nie ma żadnych przykładów ani żadnych starań, mających na celu przybliżenie przedsiębiorcom i właścicielom fabryk możliwości korzystania z sieci 5G.

Pierwszym krokiem w tym celu jest zapewnienie ogólnie powszechnej dostępności tejże sieci. W krajach Europy pierwszym krajem, który zezwolił na używanie sieci 5G i rozpoczął konstrukcję wymaganej infrastruktury była Finlandia. Oprócz niej, takiego samego przedsięwzięcia w późniejszych terminach podjęły się Austria, Niemcy, Włochy, Łotwa, Rumunia, Hiszpania, Szwajcaria i Wielka Brytania. Niestety rozpowszechnienie 5G wśród operatorów sieci komórkowych samo w sobie jest wyzwaniem. Ze względu na fragmentację rynku (*market fragmentation*), niektórzy z operatorów sieci nie chcą inwestować dużej

ilości środków. Z tego też powodu ilość pieniędzy inwestowanych w nową sieć może być niewystarczająca. Wielkość inwestycji w wymienionych uprzednio krajach waha się w zakresie 1,88 milionów euro–7,6 miliardów dolarów [2].

Niektóre z przedsiębiorstwa podejmują już pierwsze próby implementacji sieci 5G na ich liniach produkcyjnych. Jedną z nich jest Rittal, wykorzystująca sieć w zakładzie Haiger. Dzięki zezwoleniu na korzystaniu z częstotliwości 5G, firma ma zamiar zainstalować prywatną sieć na terenie zakładu. Zostanie ona wykorzystana do projektów dotyczących nadzoru i analizy produkcji. Na tą chwilę przykładem wykorzystania sieci są automatyczne systemy transportowe. Odpowiadają za pakowanie, oznakowanie i transport do dalszej dystrybucji [6].

Inne zastosowanie sieci 5G powstało przy współpracy China Mobile i Ericsson. Sieć jest używana w fabryce technologii radiowych w Nanjing. Używane na linii produkcyjnej wkrętaki precyzyjne wymagają rutynowego kalibrowania i smarowania. Do tej pory zadanie to było wykonywane manualnie, ale dzięki zastosowaniu odpowiednich czujników w połączeniu z siecią 5G możliwe jest zbieranie danych o stanie wkrętałów. Na ich podstawie będzie można ustalić kiedy jest wymagana kolejna kalibracja. Posiadanie takich danych to podstawa do automatyzacji procesu kalibracji i smarowania [7].

Bardzo zaangażowana w użycie sieci 5G w przemyśle jest też chińska firma telekomunikacyjna ZTE. Podjęła ona współpracę z szeregiem przedsiębiorstw celem testowania technologii wykorzystującej 5G. ZTE przy współpracy z Baidu wzięło udział w narodowym projekcie technologicznym, kończącym się pierwszym w branży testem samochodu samojezdnego. Innym partnerem było Audi China. Wspólnie były podejmowane prace nad Internet of vehicles (IoV), którego zadaniem jest połączenie pojazdów wyposażonych w odpowiednie sensory i oprogramowanie przy pomocy sieci 5G. Xinsong China, firma działająca w branży robotów, również podjęła się współpracy z ZTE. Ich wspólnym zadaniem było wprowadzenie technologii 5G do procesu produkcyjnego celem jego usprawnienia [8].

Atlas Copco również prowadzi prace nad integracją sieci 5G do swoich hal produkcyjnych. Celem opracowywania nowych rozwiązań technologicznych w oparciu o technologię 5G Atlas Copco Industrial Technique zainstalowało w swoim laboratorium w Sickla w Szwecji prywatną sieć. Testowane jest również praktyczne wykorzystanie sieci 5G w jednej z fabryk w Belgii. Celem jest osiągnięcie jak największego stopnia automatyzacji produkcji [9].

## PODSUMOWANIE

Nowa era przemysłu znana jako Przemysł 4.0 jest coraz bliżej stania się naszą rzeczywistością, jednakże aby móc zrealizować tę wizję będzie ona wymagać wsparcia najnowszych rozwiązań technicznych. Sieć piątej generacji jako technologia jest jeszcze bardzo młoda, dlatego też minie jeszcze znaczny okres czasu zanim zobaczymy jej masowe zastosowanie. Niemniej mogą być z nią związane duże nadzieje na bycie jednym z narzędzi nowej rewolucji przemysłowej. Przedstawione możliwości sieci 5G świadczą o wszechstronności jej zastosowań. To jak wielki będzie miała wpływ na rynek przemysłowy zostanie prawdopodobnie zweryfikowane w najbliższej przyszłości.

## LITERATURA

- [1] Rao K. S., Prasad R., *Impact of 5G Technologies on Industry 4.0*, Springer Science+Business Media LLC, Springer Nature, 2018
- [2] Perkavić D., Periša M., Zorić P., Cvitić I., *Development and Implementation Possibilities of 5G in Industry 4.0*, fragment zbioru *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*, Springer, 2020
- [3] Artykuł na temat sieci 5G, <https://blog.opengroup.org/>, zasoby z dnia 03.01.2021
- [4] *Network slicing*, <https://www.sdxcentral.com/>, zasoby z dnia 03.01.2021
- [5] 5G PPP Technology Board & 5G IA Verticals Task Force, *Empowering Vertical Industries through 5G Networks – Current Status and Future Trends*, 2020
- [6] 5G w firmie Rittal, <https://iaautomatyka.pl/>, zasoby z dnia 03.01.2021
- [7] *Inteligentna fabryka 5G w Nanjing*, <https://www.ericsson.com/>, zasoby z dnia 03.01.2021
- [8] Praktyczne wykorzystania sieci 5G w przemyśle przez firmę ZTE, <https://www.zte.com.cn/>, zasoby z dnia 03.01.2021
- [9] Wykorzystanie 5G przez Atlas Copco, <https://www.atlascopcogroup.com/>, zasoby z dnia 03.01.2021.

## **APLIKACJE I MOŻLIWOŚCI INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH W GOSPODARSTWACH DOMOWYCH I PRZEMYŚLE**

### **WSTĘP**

W ostatnich latach w Polsce można zaobserwować intensywny rozwój źródeł energii odnawialnej. Wynika to z faktu, że konwencjonalna energetyka, która w tym kraju stanowi blisko 80% udziału generuje zbyt dużą emisję zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych. Bardzo popularnym źródłem OZE stają się instalacje fotowoltaiczne. Dzieje się tak również dlatego, że pozwalają one zaoszczędzić fundusze na rachunkach za energię elektryczną oraz dzięki licznym dotacjom i dofinansowaniom prosumenckim. Dlatego coraz więcej zarówno osób prywatnych, jak i zakładów przemysłowych decyduje się na inwestycje w mikroinstalacje PV.

Niniejszy artykuł dotyczy aplikacji i możliwości instalacji fotowoltaicznych w gospodarstwach domowych oraz w przemyśle. Omówione w nim zostaną poszczególne elementy jakie wchodzi w skład instalacji fotowoltaicznych, tj. rodzaje falowników, paneli fotowoltaicznych oraz ogólny zarys i zasady działania tych podzespołów. W dalszym etapie praca skupi się na możliwościach, jakie oferują instalacje fotowoltaiczne, nie tylko w generowaniu mocy czynnej, ale poruszona zostanie tematyka kompensacji mocy biernej odbiorców.

Opisany zostanie również proces właściwego doboru instalacji PV przez wzgląd na jej zainstalowaną moc czynną. Istotne jest dobranie jej w taki sposób, aby nie była przewymiarowana, lub zbyt niska. Dzięki temu inwestycja najszybciej zacznie przynosić zyski.

### **ELEMENTY INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ**

Najważniejszym elementem każdej instalacji fotowoltaicznej są moduły PV. To właśnie dzięki nim następuje konwersja energii promieniowania słonecznego

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, pawel.byszuk@pollub.edu.pl

<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, bartosz.bednarczyk@pollub.edu.pl

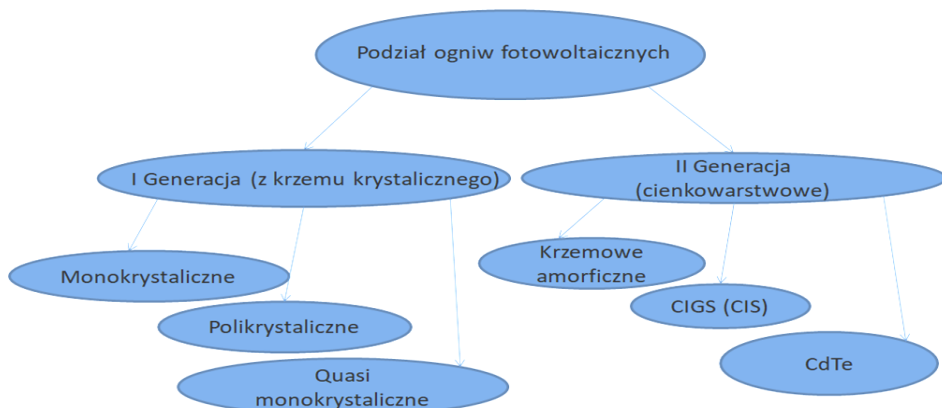
na energię elektryczną na skutek działania tzw. efektu fotowoltaicznego [5]. Najczęstszym podziałem paneli jest ten określający ich generację.

Wytypować można generację pierwszą, drugą oraz trzecią. Do generacji pierwszej zaliczyć można te moduły, które wyposażone w swej budowie są w cienką aluminiową ramkę, której nie znajdzie się w ogniwach należących do drugiej generacji. Materiałem, który wykorzystuje się w metodzie natryskowej paneli fotowoltaicznych, pierwszej generacji, z reguły jest cienka warstwa mono lub polikrystalicznego krzemu. W przypadku modułów drugiej generacji budowa nieco się różni, a dokładniej materiałem, którego używa się na powierzchni paneli PV. W tym przypadku nie wykorzystuje się krzemu jako materiału półprzewodnikowego. Najczęściej stosowanym zamiennikiem jest tellurek kadmu (CdTe) lub kombinacje pierwiastków selenu, galu indu lub miedzi (CIGS). Niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest znacznie mniejsza ilość natryskiwanego półprzewodnika co bezpośrednio przekłada się na aspekt ekonomiczny. Oczywiście w odniesieniu do modułów z generacji pierwszej ta zależność jest poprawna. Moduły drugiej generacji często nazywane cienkowarstwowymi zawdzięczają swoją nazwę właśnie dzięki cienkiej warstwie nanoszonego półprzewodnika która nie przekracza 3 mikrometrów. Obecnie moduły cienkowarstwowe dzięki mniejszej ilości materiału niezbędnego do nałożenia na panel fotowoltaiczny postrzegane są jako bardziej proekologiczne [3].

Ostatni podział wyodrębnia moduły należące do generacji trzeciej. Charakterystyczną cechą tego typu rozwiązania jest brak złącza P-N które jest konieczne we wcześniej wspomnianych grupach. Obecnie panuje trend, w którym do produkcji modułów generacji trzeciej używa się polimerów lub ogniwa organiczne. Oba te rozwiązania należą do jednej grupy DSSC. Zaletami modułów generacji trzeciej jest prostota budowy oraz niskie nakłady finansowe. Niestety, jak wiele rozwiązań tak i to ma wady. Największą z nich jest stosunkowo niska sprawność, która nie przekracza kilku procent. Kolejną wadą jest krótka żywotność komponentów wykorzystanych w produkcji całego modułu. Szczegółowy podział modułów PV przedstawia rysunek 3 (patrz rys. na s. 183).

Kolejnym niezbędnym urządzeniem w instalacji PV jest falownik. Jego głównym zadaniem jest przystosowanie oraz odpowiednia korekcja energii, aby ta była zgodna z wytycznym operatora systemu dystrybucyjnego. W innym przypadku instalacja nie może zostać do niej przyłączona. Ponadto operator systemu elektroenergetycznego zastrzega sobie prawo do odłączenia poszczególnych sieci lub odbiorców w momencie, gdy te zagrażają bezpieczeństwu

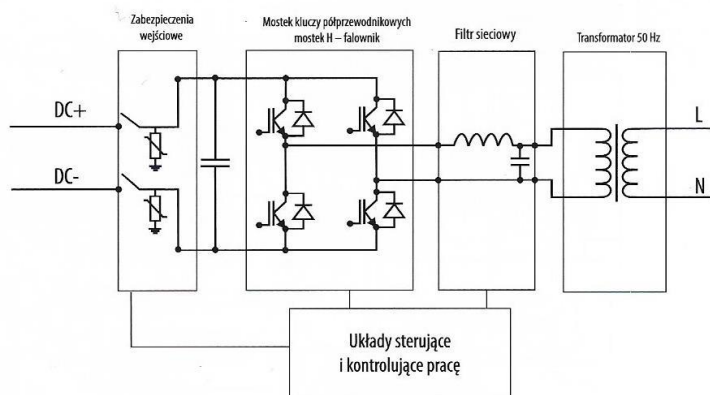
i stwarzają realne zagrożenie bezawaryjnego działania sieci dystrybucyjnej. Poprawne działanie instalacji PV jest możliwe dzięki dokładnej instalacji oraz poprzez skrupulatny dobór elementów wchodzących w skład całej instalacji.



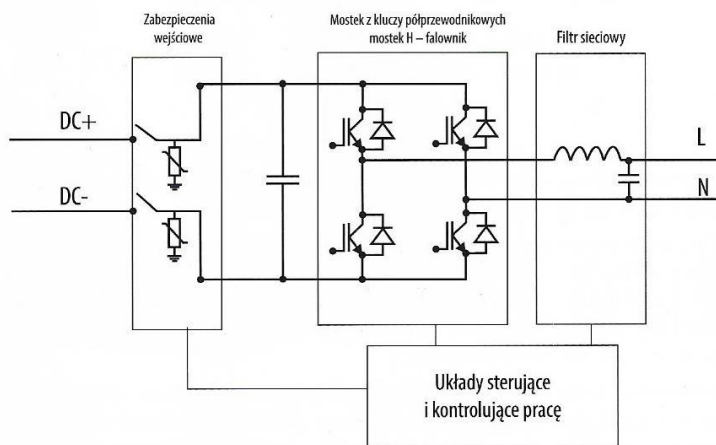
Rys. 1. Podział ogniw fotowoltaicznych [2]

Obecnie na rynku jest dostępnych wiele modeli poszczególnych firm oraz producentów. Tak jak wyżej wspomniano głównym zadaniem falowników jest zamiana prądu stałego w przemienny. Falowniki jak wiele urządzeń elektrycznych wyposażone są w szereg zabezpieczeń, które mają chronić inwerter przed niebezpiecznymi wartościami prądu wynikającymi ze źle skonfigurowanego układu bądź z jego uszkodzenia. Sama przemiana energii w falownikach zachodzi przy użyciu wbudowanych w nie tranzystorów. Inwertery instalacji fotowoltaicznych można podzielić na podgrupy. Poszczególne podgrupy dzieli się ze względu na izolację oraz rodzaj instalacji w jakiej będą pracować falowniki [3].

Do pierwszej grupy zaliczyć można falowniki transformatorowe i beztransformatorowe. Zasadniczą różnicą między obiema tymi rodzinami to galwaniczne odłączenie strony DC od AC. Strona AC to sieć odbiorcza (wtórna) natomiast strona DC to ta w której napięcie i prąd dostarczane jest w postaci stałej (pierwotna). Przez fakt posiadania przez te urządzenia transformatora, falowniki tego typu cechują się większymi rozmiarami oraz wagą, natomiast beztransformatorowe są bardziej kompaktowe przez co ich rozmiar jest mniejszy oraz waga lżejsza. Poszczególne modele powinny być wybierane w oparciu o potrzeby inwestorów które mogą być różne. Na rysunkach 2 i 3 (patrz rys. na s. 183) zaprezentowano schematy elektryczne obu rozwiązań.



Rys. 2. Schemat budowy falownika transformatorowego [3]



Rys. 3. Schemat budowy falownika beztransformatorowego [3]

Przez wzgląd na sposób współpracy mikroinstalacji z siecią elektroenergetyczną wyróżnić można falowniki wyspowe oraz sieciowe. W przypadku falowników wyspowych nie przyłącza się ich bezpośrednio do sieci odbiorczych, gdyż wyposażane są one w dodatkowe akumulatory, które magazynują energię pozyskaną z paneli fotowoltaicznych. Rozwiązania tego typu są stosowane w miejscach, w których występują bardzo duże komplikacje z przyłączeniem instalacji do sieci publicznej. W takich przypadkach stosuje się oddzielne sieci dopasowane tylko do tych poszczególnych fragmentów, w których skumulowane są instalacje wyposażone w falowniki wyspowe. Kolejnym rozwiązaniem są fa-



lowniki sieciowe. W odróżnieniu od wcześniej wspomnianych falowniki sieciowe stosuje się w instalacjach, które mają współpracować z systemem elektroenergetycznym. W tym przypadku falowniki mogą być również wyposażone w dodatkowe magazyny energii w momencie, kiedy następuje duża konsumpcja energii w danym miejscu.

Ostatnim podziałem, jakiego dokonać można dla falowników, jest ich rozmiar. Mikrofalowniki przeznaczone do sieci nie przekraczających 0,3 kW. Falowniki szeregowy których nazwa wskazuje że połączone są one do szeregu modułów PV co bezpośrednio pozwala uzyskać zwiększenie mocy uzyskiwanej w zakresie od 1 kW do 50 kW. Najczęściej wszystkie moduły podłączone są szeregowo do jednego falownika. Istnieje również możliwość przyłączenie większej ilości falowników do szeregowo połączonych modułów. Kolejnym rodzajem opisywanym będą falowniki centralne. Przeznaczone są do pracy z wieloma modułami PV. Jest to rozwiązanie najczęściej stosowane na farmach fotowoltaicznych. Moduły są połączone w sposób szeregowy, dlatego uzyskuje się odpowiednie napięcie. Kolejno uzyskane w ten sposób łańcuchy podłącza się w sposób równoległy. Zbiornice przewody łączy się w sposób bezpośredni do falownika.

## **WŁAŚCIWY DOBÓR INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ**

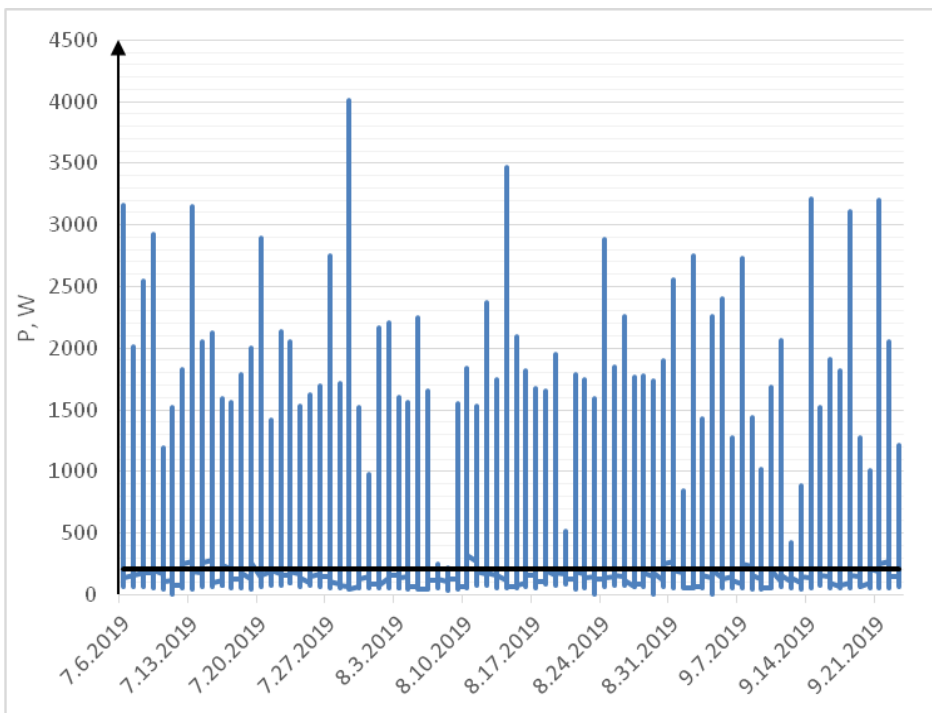
Instalacje fotowoltaiczne w gospodarstwach domowych mają za zadanie jak najdokładniej pokrywać zapotrzebowanie na energię elektryczną zainstalowanych tam urządzeń elektrycznych. Dzięki temu prosument może ograniczyć do minimum kwoty rachunków za energię elektryczną w swoim domu. W praktyce jednak bardzo rzadko zdarza się sytuacja, w której wartość energii w jednostce czasu zużywanej i produkowanej całkowicie się pokrywały.

Istnieje kilka możliwości magazynowania nadmiaru produkowanej przez mikroinstalacje energii elektrycznej, jednak każda z nich posiada istotne wady. Do tego celu można wykorzystać system energetyczny za pomocą systemu upustów [7]. Jednak korzystając z tej metody można odzyskać tylko 80% wysłanej do sieci energii, oraz tylko w przeciągi roku od jej przesłania, więc jej duża część jest tracona. Ponadto duże zgromadzenie rozproszonych generatorów energii elektrycznej stwarza również zagrożenie dla systemu energetycznego. Elektrownie słoneczne charakteryzują się tym, że utrudnione jest przewidywanie wartości mocy jaka będzie przez nie wprowadzana do sieci. Fakt ten może doprowadzić do destabilizacji sieci elektroenergetycznej.

Magazynować energię można również za pomocą akumulatorów litowo-jonowych lub kwasowo-olejowych, jednak z perspektywy czasu rozwiązanie to jest mało ekonomiczne, przez wzgląd na ich wysoki koszt oraz niską żywotność.

Badanie obrazujące wspomniany proces [1] przeprowadzono od czerwca do końca września 2019 roku. Oznacza to, że był to okres wakacyjny, a więc nasłonecznienie w skali roku było w nim najwyższe. Aby badanie było jak najbardziej miarodajne powinno trwać jak najdłużej, jednak taki okres wystarczy do zobrazowania samego procesu.

Za pomocą analizatora jakości zasilania prowadzono ciągły pomiar obciążenia mocą czynną gospodarstwa domowego. Urządzenie było zainstalowane w rozdzielnicy głównej budynku w taki sposób, aby rejestrowało każdą z faz. Prowadzone pomiary były uśredniane w interwale czasowym 15 min. Uporządkowane wyniki prowadzonych pomiarów przedstawia profil obciążenia mocą elektryczną badanego budynku przedstawiony na rysunku 4.

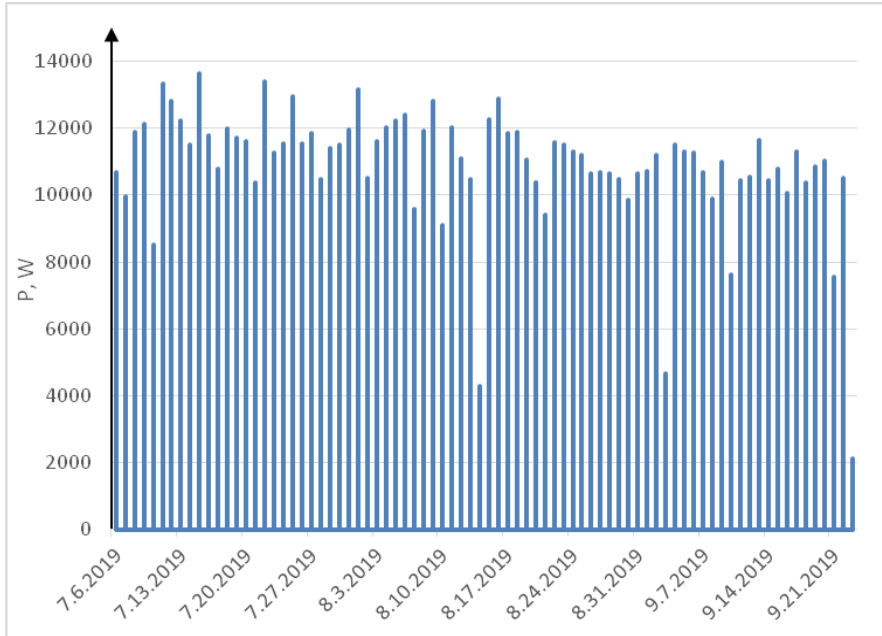


Rys. 4. Profil obciążenia badanego gospodarstwa domowego [1]

W badanym budynku na co dzień mieszka pięć dorosłych osób. W domu tym ogrzewanie realizowane jest przez kocioł węglowy. Woda bieżąca podgrzewana

jest za pomocą kolektorów słonecznych, a w przypadku zbyt niskiego natężenia światła słonecznego, opcjonalnym systemem jest elektryczny podgrzewacz wody. Większymi odbiornikami energii elektrycznej są np.: piekarniki elektryczne, pralki automatyczne czy odkurzacze. Czarną poziomą linią na profilu zapotrzebowania zaznaczono moc około 210 W, która to stanowi kwantyl mocy piętnastominutowych rzędu 0,75. Oznacza to, że średnia piętnastominutowa moc zapotrzebowania domu jest w 75% mniejsza od tej wartości. Średnio największe zużycie energii odnotowywano w okolicach południa.

Dom ten charakteryzuje się dosyć niskim średnim zużyciem energii elektrycznej. Podczas badanego okresu trwającego około 2,5 miesiąca zużyte zostało około 0,5 MWh energii. Jednak wzmożona aktywność w porach dniach cechujących się relatywnie dużym nasłonecznieniem może wpłynąć na większą opłacalność inwestycji w instalację PV. Dane do utworzenia profilu produkcji energii elektrycznej przez instalację PV uzyskano z jednostki zainstalowanej na dachu budynku Centrum Innowacji i Zaawansowanych Technologii, należącego do Politechniki Lubelskiej. Moc zainstalowana modułów fotowoltaicznych w tym przypadku wynosi 15 kW. Profil produkcji utworzony na podstawie uzyskanych pomiarów przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Profil produkcji energii elektrycznej przez instalację PV [1]

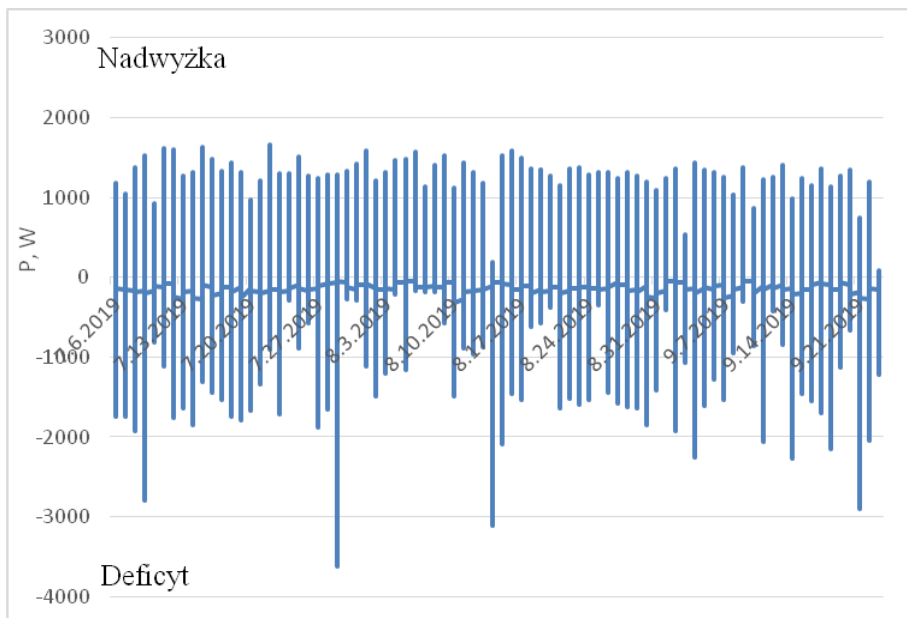
Analizując wykres można stwierdzić, że wartość wytwarzanej energii waha się od około 12 kW w okolicach południa, do 0 po zachodzie i przed wschodem słońca. Im bliżej końca lata, tym mniejsza była średnia generowana moc ogniw PV. We wrześniu maksymalne średnie piętnastominutowe wartości nigdy nie przekroczyły wartości 12 kW. Można się spodziewać, że wraz ze zbliżającym się półroczem zimowym, wartości te będą dalej maleć.

Właściwa analiza efektywności instalacji PV polega na porównaniu ze sobą profili obciążenia mocą elektryczną badanego gospodarstwa domowego, z potencjalnym profilem generacji mocy przez moduły PV. Proces ten polega na odejmowaniu od każdego pomiaru uśrednionej mocy, którą w ciągu konkretnych piętnastu minut danego dnia obciążony był dany budynek, wartości mocy wygenerowanej w tym samym czasie przez generatory słoneczne. Mnożąc otrzymane dane przez odpowiednie współczynniki można otrzymać teoretyczne profile produkcji dla instalacji PV o mocach odpowiednio niższych wartościach. W ten sposób przeanalizowano kilka wariantów pod kątem aplikacji w gospodarstwie badanym. Najbardziej adekwatna okazała się instalacja fotowoltaiczna o mocy zainstalowanej 2 kW. Bilans mocy w takim przypadku obrazuje rysunek 6. Wartości nad osią poziomą wykresu oznaczają, że w tym okresie czasowym występowała nadwyżka produkcji energii elektrycznej względem zapotrzebowania na energię w badanym gospodarstwie, a wartości poniżej osi poziomej wskazują na deficyt energii produkowanej względem zapotrzebowania.

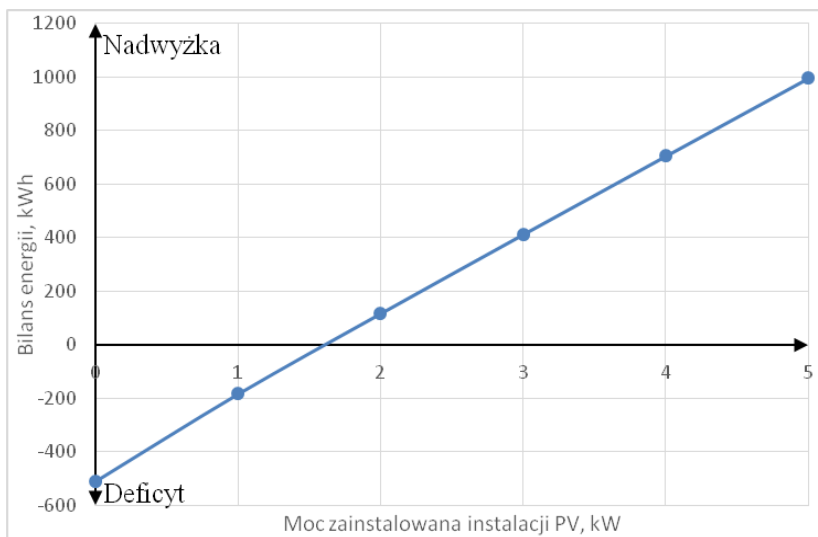
Analizując wykres można jasno określić, że nadwyżka produkcji energii elektrycznej jest wyższa, oraz występuje częściej niż deficyt. Dokonując szczegółowej analizy zebranych danych, w badanym okresie pobrano ok. 510 kWh energii elektrycznej, a wytworzono przez dwukilowatową instalację PV około 724 kWh.

Instalacja PV o mocy zainstalowanej 2 kW w pełni pokrywa zapotrzebowanie na energię elektryczną badanego gospodarstwa domowego, generując niewielki nadmiar. Prosument nie musiałby płacić rachunków za energię elektryczną w badanym okresie, a wysłana nadwyżka z pewnością zostałaby wykorzystana w okresie z niższym nasłonecznieniem. Instalacja PV o takiej mocy zainstalowanej jest optymalna do zastosowania w badanym obiekcie.

Dodatkowo, aby jeszcze precyzyjniej określić prawidłową moc instalacji, która w pełni pokryje zapotrzebowanie, na podstawie opracowanych danych utworzono charakterystykę zależności bilansu energetycznego od mocy zainstalowanej. Zależność tą obrazuje wykres przedstawiony na rysunku 7 (patrz rys. na s. 188).



Rys. 6. Bilans mocy budynku z uwzględnieniem pracy instalacji PV o mocy 2 kW[1]



Rys. 7. Zależność bilansu energetycznego badanego budynku od mocy zainstalowanej instalacji fotowoltaicznej [1]

Z wykresu (Rys. 7) wynika, że w badanym okresie najbardziej optymalna moc zainstalowana instalacji fotowoltaicznej wynosiła około 1,6 kW. Zależność jest bliska liniowej, jednak jest delikatnie zakrzywiona przez istnienie

współczynnika korygującego 0,8, który został uwzględniony na wykresie. Jednak należy pamiętać, że badany okres nie był roczny, a jedynie około 3 miesięczny, a dodatkowo trwał w okresie letnim. W takiej sytuacji należy zawyżyć uzyskaną wartość optymalną mocy, przez wzgląd na okres zimowy, w którym nasłonecznienie bez wątpienia będzie mniejsze. Nawet jeśli badanie byłoby oparte na danych z całego roku warto zawyżyć nieco wartość mocy zainstalowanej, ponieważ w następnych latach średnie roczne nasłonecznienie mogłoby być mniejsze oraz następowałoby naturalne starzenie paneli PV powiązane z pogorszeniem ich efektywności, co mogłoby oznaczać konieczność płacenia rachunków przez prosumenta.

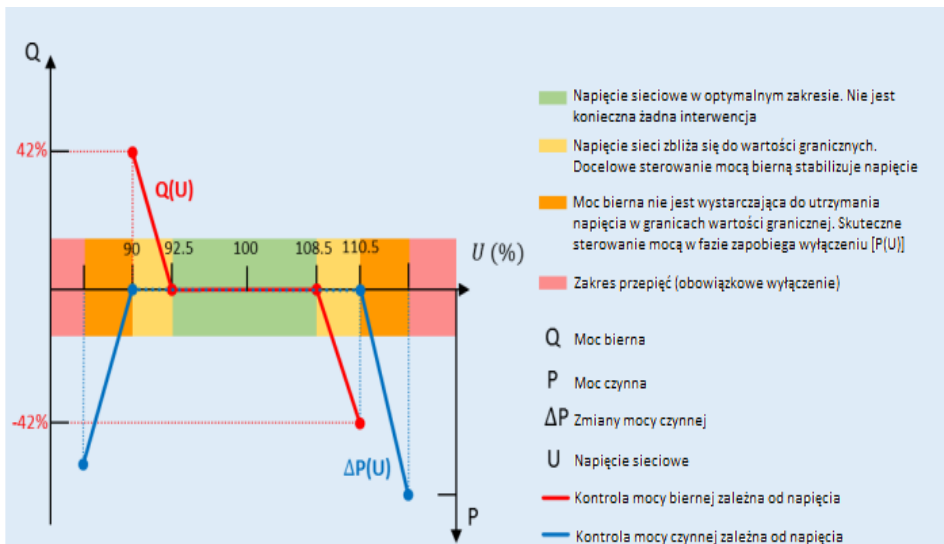
## **MOŻLIWOŚCI INWERTERÓW W GOSPODARCE MOCĄ BIERNĄ**

Głównym założeniem kompensacji mocy biernej jest dostosowanie współczynnika mocy do zaleceń operatora systemu dystrybucyjnego. Dopuszczalny pobór mocy biernej z systemu elektroenergetycznego określany jest przez  $\text{tg}\varphi$ , którego wartość nie może przekraczać 0,4. Przekroczenie tej wartości powoduje naliczanie dodatkowych opłat za pobór ponadnormatywnej mocy biernej. Fakt ten jest wyjątkowo ważny dla zakładów przemysłowych oraz innych firm korzystających z dużej ilości napędów elektrycznych większych mocy, ponieważ ich praca wymaga poboru dużej ilości energii biernej indukcyjnej. Stąd wynika potrzeba kompensacji tej mocy, co można osiągnąć na wiele różnych sposobów. Jednym z nich jest wykorzystanie inwerterów instalacji PV.

Dzięki rozwojowi technologii możliwe jest produkowanie coraz to lepszych i dokładniejszych inwerterów przy użyciu których można sterować mocą bierną oraz prowadzić jej monitorowanie w czasie rzeczywistym. Poprzez stosowanie odpowiednich modułów można doposażyć inwerter, aby ten mógł sterować mocą bierną według potrzeb użytkownika, co bezpośrednio wpłynie na opłaty związane z nadmiarowym poborem lub oddawaniem do sieci dystrybucyjnej. Obecnie na rynku dostępnych jest wiele modeli inwerterów różnych producentów. Firmy takie jak SMA, Fronius dodatkowo udostępniają do swoich inwerterów specjalne oprogramowania, które poprzez komunikację np. przez złącze RS485 łączą się z zewnętrznym urządzeniem i mogą w łatwy sposób udostępniać dane oraz prowadzić szczegółowe pomiary w określonym czasie.

Pierwszą z rodzin będzie rodzina SnapInverter firmy Fronius. Systemy fotowoltaiczne mogą dostarczać energię do sieci tylko wtedy, gdy napięcie sieci odbiorczej mieści się w określonych granicach. Szczyty produkcji energii lub

przebiegi w sieciach elektroenergetycznych mogą powodować, że wartości napięć zbliżą się do wartości nominalnych, co skutkować może niepożądanym wyłączeniem inwertera. Dzięki możliwościom, jakie oferują rozwiązania technologiczne zastosowane w inwerterach firmy Fronius, można w sposób bezpieczny i ciągły monitorować pracę całej instalacji. Zaczynając od produkcji energii przez moduły fotowoltaiczne do efektywnych wykresów, które w łatwy sposób obrazują przyrosty mocy. Wszystko to jest dostępne dzięki monitorowaniu całej instalacji fotowoltaicznej przy użyciu oprogramowania producenta, w które wyposażone są inwertery. Wszystkie te zabiegi pozwalają uniknąć opłat jak i niebezpiecznych wzrostów napięć w sieci odbiorcy. Powyższe rozwiązanie bezpośrednio przekłada się na zmniejszenie ilości produkowanej energii przez układy fotowoltaiczne. Mimo że moc bierna nie jest zużywana ani przetwarzana na moc skuteczną i oscyluje między inwerterem a urządzeniem sieci, wrośnie dopływ energii elektrycznej. Niezależnie od mocy czynnej, a zatem niezależnie od energii sterowanie mocą bierną może spowodować zarówno wzrost, jak i spadek napięcia. Dzięki odpowiedniej stabilizacji przepływu mocy biernej w zależności od aktualnego napięcia sieci, może ona bezpośrednio pomóc w stabilizacji napięcia celem uniknięcia przekroczeń wartości powyżej dopuszczalnej granicy eksploatacyjnej falownika. Odpowiednie ustawienie wartości granicznych i zakresy robocze napięcia i mocy biernej można wówczas podzielić na dwa etapy.



Rys. 8. Wykres dotyczący ustawień wg. schematu mocy/napięcia [8]

Firma Fronius zajmując się również produkcją inteligentnych liczników energii o nazwie Fronius Smart Meter. Mają one na celu lokalny pomiar produkcji i konsumpcji energii elektrycznej oraz wizualizację danych, a także szczegółowe analizy przy użyciu Fronius Solar.web. Możliwość korzystania z Solar.web uzyskuje się w chwili nabycia inwertera firmy Fronius. Licznik umożliwia szczegółowy pomiar energii oraz jej rozprawy. Dodatkowo można wykorzystywać je do lokalnego magazynowania energii cieplnej i/lub elektrycznej oraz optymalizacji wykorzystywania energii, zarządzania energią (E-Management). Jedną z ważniejszych cech Fronius Smart Meter jest możliwość regulacji ilości oddawanej energii do sieci. Pośród dostępnych modeli wyróżnić można trzy główne rodzaje inteligentnych liczników.

Jako przykład można wyróżnić Fronius Smart Meter 63A-1. Jest to jednofazowy licznik energii elektrycznej, który głównie służy w rozwiązaniach domowych przeznaczonych dla sieci jednofazowych. Może on być również stosowany w uzasadnionych przypadkach w sieciach trójfazowych. Zaletami tego rozwiązania są przystępna cena oraz oszczędność miejsca.



*Rys. 9. Licznik energii elektrycznej Fronius Smart Meter 63A-1 [8]*

Innym przykładem z rodziny Fronius Smart Meter jest licznik 50 kA-3 (Rys. 10), przeznaczony do rozwiązań komercyjnych dla systemów dużej mocy. Jego główną zaletą jest fakt, że nie ma konieczności rozłączania istniejącego toru prądowego, co oczywiście jest uzależnione od stosowanych przekładników prądowych.

Podstawowe parametry opisujące wszystkie wyżej wymienione liczniki można podzielić na:



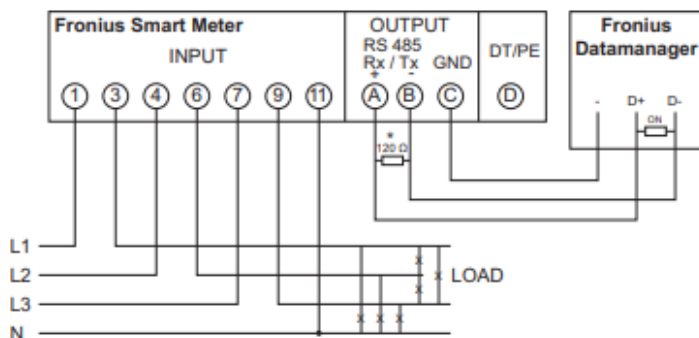
- Wartości dostępne na wyświetlaczu (prądy, napięcia, częstotliwości,  $\cos\phi$ , moce poszczególnych trzech faz, wartości chwilowe i sumaryczne energii)
- Montaż na szynie TH35 (DIN); 4 moduły
- Komunikacja z wykorzystaniem protokołu Modbus RTU (RS485)
- Przekroje przewodów (AC: 1–16mm<sup>2</sup>, Modbus: drut: 0,05–4 mm<sup>2</sup>, linka: 0,05–2,5 mm<sup>2</sup>)
- Moment dokręcający: 1,2 Nm
- Zakres temperatury pracy: –25 do +55° C.



Rys. 9. Licznik energii elektrycznej Fronius Smart Meter 53kA-3 [8]

Do poprawnego działania niezbędna jest najnowsza wersja oprogramowania Datamanager dostępna na stronie producenta. Po zalogowaniu na konto właściciela można w zakładce: Komponenty sprawdzić, czy oprogramowanie urządzenia zainstalowanego w sieci odbiorczej jest aktualne. Istnieje możliwość zainstalowania maksymalnie czterech liczników do jednej sieci. W sposób dowolny można mieszać rodzaje stosowanych liczników. Istnieje jednak warunek, że licznik główny powinien znajdować się od strony odbiorcy, tuż za licznikiem operatora systemu dystrybucyjnego. Poniżej rysunek obrazujący sposób połączenia dla licznika Fronius Smart Meter 63A-3.

Wejścia o numerach 1, 3 oraz 11 pozwalają podłączyć licznik w układzie jednofazowym. Na podstawie przekroju kabla należy dobrać odpowiednie nastawy zabezpieczeń.



Rys. 10. Sposób podłączenia licznika Fronius Smart Meter 63A-3 [9]

Właściwie dobrany inteligentny licznik firmy Fronius w połączeniu z inwerterem tego samego producenta w znaczny sposób może przyczynić się do monitorowania rozplywu mocy w sieci odbiorcy. Poprawna konfiguracja inwertera oraz inteligentnego licznika umożliwia łatwe monitorowanie całej sieci odbiorczej, w której zainstalowana jest aparatura pomiarowa na urządzeniach zewnętrznych oraz manualnie.

## PODSUMOWANIE

Implementacja instalacji fotowoltaicznych zarówno przez odbiorcę indywidualnego, jak i przez działalności gospodarcze są bez wątpienia opłacalnym rozwiązaniem. Dzięki nim można zredukować rachunki za energię czynną do minimum, ale również aktywnie wpływać na bilans mocy biernej. Oznacza to, że taka inwestycja niezależnie od jej rozmiarów, prędzej czy później zwróci się i zacznie generować korzyści. Dodatkową zaletą stosowania mikroinstalacji PV jest niewątpliwie dobry wpływ na środowisko.

Inwestor szybciej zacznie notować zyski, jeśli precyzyjnie dobierze moc instalacji do swoich potrzeb. Ukazana w tym artykule metoda przeprowadzenia takich badań jest w stanie bardzo ułatwić to zadanie.

Na rynku jest dostępnych wiele rozwiązań technologicznych pozwalających na spersonalizowanie każdego z elementów instalacji, w zależności od indywidualnych potrzeb odbiorcy. Ponadto różne programy dotacji na taką inwestycję znacznie zmniejszają wymagany do niej nakład własny. Biorąc to wszystko pod uwagę, można jasno stwierdzić, że posiadając swój własny dom bądź działalność gospodarczą, warto rozważyć montaż instalacji fotowoltaicznej.

## LITERATURA

- [1] Byszuk P., *Analiza efektywności wykorzystania instalacji fotowoltaicznej na potrzeby odbiorcy indywidualnego*, praca inżynierska, Politechnika Lubelska, 2020
- [2] Bednarczyk B., *Wykorzystanie możliwości inwerterów instalacji fotowoltaicznych do kompensacji mocy biernej odbiorcy*, praca inżynierska, Politechnika Lubelska, 2020
- [3] Szymański B., *Instalacje fotowoltaiczne*, Wyd. PWN, Warszawa 2016
- [4] Góralczyk I., Tytko R., *Urządzenia, instalacje fotowoltaiczne i elektryczne*, Kraków 2015
- [5] Tytko R., *Fotowoltaika – Podręcznik dla studentów, uczniów, instalatorów, inwestorów*, Eco Investments, 2019
- [6] Sibiński M., Znajdek K., *Przyrządy i instalacje fotowoltaiczne*, Wyd. PWN, Warszawa 2016
- [7] Strona internetowa <http://ideadomu.pl/jak-dziala-system-bilansowania-rocznego-tzw-opustu/>, zasoby z dnia 29.11.2020
- [8] Strona internetowa [https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Technical%20Articles/SE\\_TEA\\_Quick\\_Guide\\_Reactive\\_Power\\_settings\\_in\\_dependence\\_of\\_the\\_grid\\_voltage\\_according\\_to\\_ASNZS\\_4777.2.2015\\_EN\\_AU.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Technical%20Articles/SE_TEA_Quick_Guide_Reactive_Power_settings_in_dependence_of_the_grid_voltage_according_to_ASNZS_4777.2.2015_EN_AU.pdf), zasoby z dnia 19.11.2019
- [9] Instrukcja obsługi inwertera Fronius Smart Meter 63A-3 <https://www.fronius.com/pl-pl/poland/energia-sloneczna/produkty-i-rozwizania/wszystkie-produkty/monitorowanie-instalacji/sprz%C4%99t/fronius-smart-meter/fronius-smart-meter-63a-3> Fronius Smart Meter 63A-3, zasoby z dnia 15.01.2020.

## EKOLOGICZNY PARADOKS, CZYLI BATERIE SAMOCHODÓW ELEKTRYCZNYCH

### WSTĘP

Co raz częściej możemy zauważyć samochody, które przemieszczają się po naszych polskich drogach nie emitując praktycznie żadnego dźwięku. Kilka lat temu rzadki widok auta hybrydowego lub elektrycznego, teraz nie budzi żadnego zdziwienia. Świadomość społeczeństwa w kwestii dbania o środowisko rośnie, lecz czy każdy wie, jaki rzeczywisty wpływ na przyrodę mają samochody korzystające z silników elektrycznych? Temat ten, poruszany głównie przez producentów tychże aut, pokazuje jak dużą przewagę w zmniejszaniu emisji gazów cieplarnianych mają auta elektryczne nad tymi korzystającymi z konwencjonalnych źródeł energii, a to właśnie powoduje najwięcej kontrowersji wśród osób interesujących się aspektami proekologicznymi. Uświadomienie społeczeństwa o plusach i minusach trendu wprowadzania energii elektrycznej do motoryzacji to główny cel tego artykułu. Jedynym sposobem na zrozumienie tego zagadnienia jest jego przeanalizowanie.

Statystyki przedstawiające ilość nowych aut, jaka pojawiła się na polskich drogach w 2019 roku jasno pokazują, dominację samochodów z silnikami spalinowymi nad hybrydami i elektrycznymi. 555 150 to liczba wszystkich nowych aut, lecz samochody korzystające z energii elektrycznej to zaledwie 7,5%, z czego 7% to stare hybrydy. Porównując rok 2018 i 2019 pod względem ilości nowych samochodów elektrycznych dane są imponujące, ponieważ mamy do czynienia z ponad podwójnym wzrostem ilości zakupionych aut elektrycznych korzystających jedynie z energii zmagazynowanej w akumulatorach (BEV – Battery Electric Vehicle) oraz samochodów hybrydowych z opcją ładowania z sieci (*plug-in*, PHEV). Dane te dotyczą Polski, gdzie rozwój tego filaru motoryzacji dopiero się zaczyna, a rozważając dane z całego świata możemy spodziewać się, że przez najbliższe lata nie będzie zwalniał tempa.

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, magdalena.baj@pollub.edu.pl

<sup>2</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, konrad.kubiniiec@pollub.edu.pl

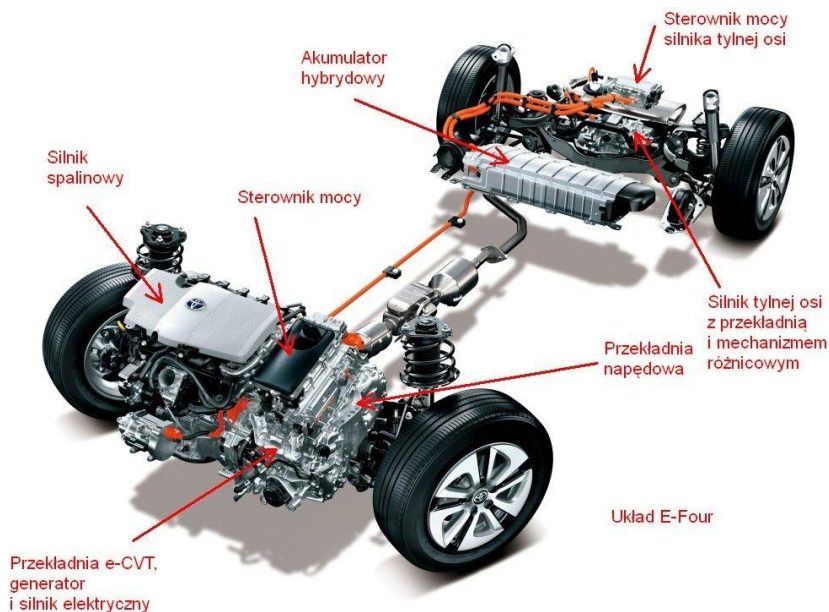
## JAK DZIAŁA SAMOCHÓD ELEKTRYCZNY

Samochody korzystające z energii elektrycznej do poruszania się możemy podzielić na trzy typy:

- HEV (Hybrid Electric Vehicle)
- PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
- BEV (Battery Electric Vehicle),

które na swój szczególny sposób pozyskują energię elektryczną i magazynowaną w akumulatorach.

Samochody typu HEV rozpowszechnione jako pierwsze charakteryzują się posiadaniem dwóch napędów w postaci silnika spalinowego i elektrycznego.



Rys. 1. Schemat napędu samochodu hybrydowego z napędem dwuosiowym (źródło: <https://www.landcruiser.pl/czytelnia/aktualnosci-nowosci-swiat-inne/64-nowosci/553-hybrydowy-naped-na-4-kola>)

Zasada działania sprowadza się do akumulacji energii elektrycznej odzyskanej w czasie jazdy pojazdem z hamowania, zwalniania, dojeżdżania do skrzyżowań oraz innych manewrów pozwalających na tego typu zamianę energii. Jednostka sterująca sama decyduje, z którego rodzaju napędu korzystać w danej sytuacji i w jakim stopniu. W celu obniżenia emisji spalin możliwy jest tryb jazdy elektrycznej. System ten sprawdza się przy wykorzystaniu auta w jeździe

miejskiej, gdzie często następuje zmiana kierunku przyśpieszenia. Pojazdy te nie posiadają możliwości ładowania z zewnętrznych źródeł, co jest ograniczeniem.

Zastosowany napęd elektryczny jest najczęściej stosowany jako dodatkowy do silnika spalinowego co pozwala na zainstalowanie akumulatorów o nie dużej pojemności ok. 1–2 kWh, i przybliżonej wadze 40–50 kg. Montowane są często pod tylną kanapą, tak by ograniczyć zajmowane przez nie miejsce. Ich wielkość nie wpływa znacząco na wagę całego pojazdu. Baterie do hybryd wykonuje się w technologii niklowo-metalowo-wodorkowej. Doświadczenia i badania konstruktorów potwierdzają, że nawet po przebiegu ok. 300 000 kilometrów ich sprawność może przekraczać 90%, a zdarzają się auta mające ponad pół miliona kilometrów bez wymiany akumulatorów. Głównym elementem odpowiadającym za żywotność baterii jest sposób sterowania pracą układu napędowego i niedoprowadzanie do całkowitego rozładowania i przeładowania, co ma szczególnie niszczący wpływ na pojemność.

Drugim typem samochodów hybrydowych jest PHEV. Zasada działania jest ta sama, co we wcześniej przedstawionym typie hybrydy z tą różnicą, że dodatkowo dostajemy możliwość ładowania akumulatorów z sieci elektrycznej (*plug-in*). Takie rozwiązanie technologiczne pozwala na zastosowanie większej pojemności akumulatorów, a co za tym idzie mniejsze zużycie paliwa. W przypadku ograniczenia poruszania się do odległości nie powodujących całkowitego rozładowania akumulatora, możemy zapomnieć o tankowaniu samochodu. Sprawdza się to w strefie miejskiej, która jest wyposażona w dużą ilość ładowarek sieciowych. Efektem mniejszego zużycia paliwa w silniku spalinowym jest stosowanie mniejszych zbiorników, co rekompensowane jest wagą i wielkością akumulatorów. Aktualnie stosuje się akumulatory litowo-jonowe ponieważ charakteryzują się największą żywotnością, przy ładowaniu w przedziale 20–80% pełnej pojemności. W samochodach typu PHEV, które używane są głównie w strefie miejskiej, stosuje się pojemności 8–10 kWh, co pozwala na przejechanie ok. 50 kilometrów na samym napędzie elektrycznym. Modele PHEV to aktualnie synonim funkcjonalności. Kierowca może dostosować samochód i napęd do swoich potrzeb. Trzy tryby pozwalają na pracę samego silnika spalinowego, pracę hybrydową lub elektryczną w zależności od wymagań.

Samochód typu BEV to kwintesencja ekologiczności. Czysta energia pochodząca z ładowania akumulatorów przetwarzana na ruch przez napęd zbudowany z jednego lub kilku silników elektrycznych bez spalania paliw kopalnych powodujących zanieczyszczenie powietrza dwutlenkiem węgla i powodowania glo-

balnego ocieplenia. Rzeczywiście samochód z takim układem jest ekologiczny pod względem ograniczenia wytwarzania spalin.



Rys. 2. Schemat napędu samochodu elektrycznego ([http://www.elektroonline.pl/a/10486,Czy-jestesmy-gotowi-na-elektryczne-samochody,," data-bbox="145 441 850 474">Elektrotechnika](http://www.elektroonline.pl/a/10486,Czy-jestesmy-gotowi-na-elektryczne-samochody,,))

Możemy je podzielić na kilka rodzajów w zależności od przeznaczenia. Przyjmuje się, że przeciętny samochód elektryczny potrzebuje na przejechanie 100 km około 17 kWh energii. Oznacza to, że na przejechanie 400 km, akumulator zamontowany do pojazdu musi mieć pojemność 50–70 kWh, który może ważyć nawet 300 kg. Patrząc porównywalnie do zbiornika na benzynę lub ropę jest to dość spore obciążenie. Inżynierowie zajmujący się samochodami elektrycznymi ciągle pracują nad zmniejszeniem tych rozmiarów, co jest aktualnie bardzo rozwojowym tematem. W tym momencie pod względem produkcji samochodów elektrycznych przoduje wszystkim dobrze znana, amerykańska firma Tesla. Ich samochody w zależności od modelu mogą osiągać od 400 do nawet 600 km na jednym ładowaniu.

## AKUMULATOR, CZYLI ŹRÓDŁO ENERGII

Biorąc pod uwagę aspekty cenowe, masę i warunki pracy, które mają bezpośredni wpływ na osiągi samochodów elektrycznych najlepiej prezentują się ogniwa odwracalne niskotemperaturowe, powszechnie nazywane akumulatorami. Aktualnie jest kilka popularnych rodzajów ogniw wtórnych, oferujących technologię o cechach pożądanym w BEV, czyli duża liczba cykli pracy, duża

energia właściwa, wysoki dopuszczalny prąd rozładowania przy jego minimalnym wpływie na trwałość oraz niski poziom samorozładowania. Do tych ogniwi możemy zaliczyć takie typy jak:

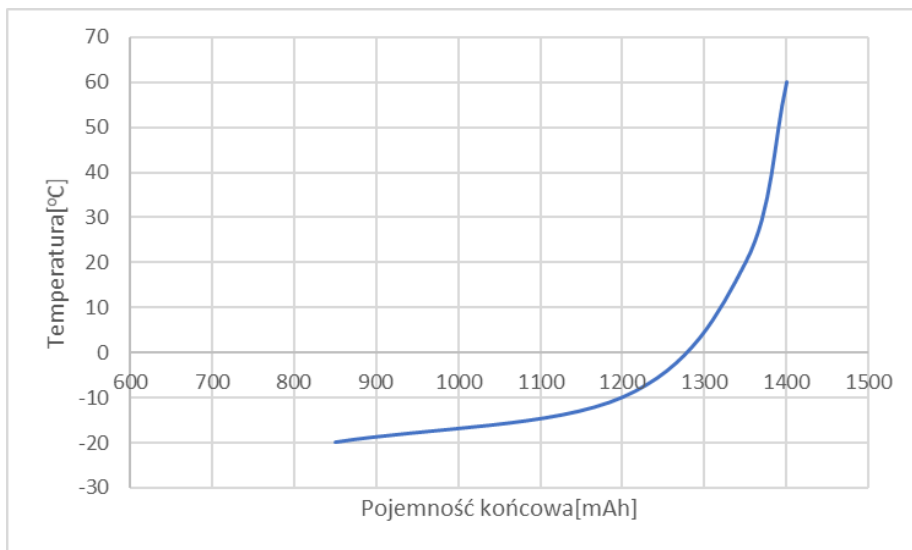
- kwasowo-ołowiowe (lead-acid battery, Pb-Acid)
- niklowo-kadmowe (nickel-cadmium battery, Ni-Cd)
- wodorkowe (nickel-metal hydride battery, Ni-MH)
- litowe (lithium battery, Li-Metal, Li-Ion, PLiON).

Z wymienionych powyżej rodzajów na uwagę zasługują ogniwa litowo-jonowe, które od momentu pierwszego ich zastosowania notują szybki wzrost rozwoju co powoduje ich rozpowszechnienie. Na rynku istnieje kilka odmian tych ogniwi, które różnią się budową lub zastosowanymi związkami chemicznymi, lecz wszystkie należą do jednej rodziny akumulatorów litowo-jonowych. Tani koszt produkcji i dobre parametry spowodowały, że producenci aut elektrycznych chętnie używają je w swoich produktach, a w 2016 roku już 50% aut była w nie wyposażona. Zawdzięczają to swojej trwałości i żywotności, która sięga nawet 10 lat i możliwości wykonania 2500–3500 cykli ładowania. Niestety ich minusem jest wrażliwość na przeładowania i całkowite rozładowania.

Zakres temperatury pracy dla ogniwi litowo-jonowych mieści się w przedziale 0–45°C, co jest stosunkowo dużym zakresem i zapewnia bezpieczne ładowanie, lecz mimo to temperatura wewnątrz musi być ciągle monitorowana ponieważ przekraczanie dopuszczalnych temperatur wpływa negatywnie na jakość ładowania i żywotność ogniwa. Może doprowadzić to również do deformacji lub rozszczelnienia, co łączy się z natychmiastową potrzebą wymiany akumulatora.

Głównym tematem rządzącym wydajnością prądową i efektywnym ładunkiem akumulatora są reakcje chemiczne, na które wpływ ma zmiana temperatury. Zależności te przedstawiają wykonane wykresy. Na ich podstawie można zauważyć, że praca w ujemnej temperaturze akumulatora jest możliwa, lecz ograniczeniu ulegają jego możliwości napędowe oraz uszkadza to trwałość. Temperatury powyżej dopuszczalnej również nie są korzystne ze względu na wcześniej już przedstawione możliwości przegrzania i pożaru. Jak widać akumulatory w samochodach elektrycznych wymagają specjalnych warunków pracy w określonym przedziale temperatury.

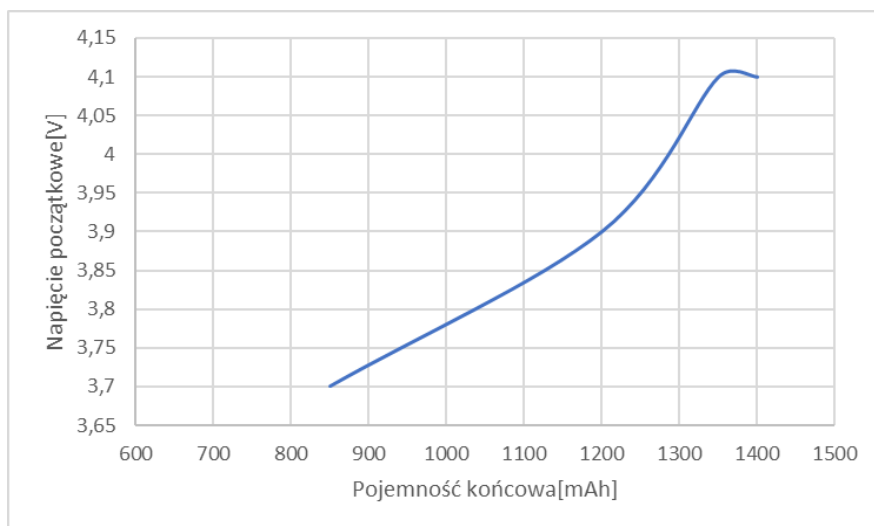




Rys. 3. Wykres zależności pojemności od temperatury (opracowanie własne na podstawie [2])

Zauważyć trzeba, że stosowane jest najczęściej łączenie setek ogniw, których chłodzenie jest ograniczone i niejednorodne ze względu na ilość. By to zrobić używa się specjalne układy opierające się na powietrzu lub cieczy. Innym sposobem ograniczenia ryzyka zapłonu jest dodawanie do elektrolitu wewnątrz ogniwa, który ma za zadanie opóźnienie zapłonu. Do zapalenia i wybuchu elektrolitu może dojść, gdy przekroczy on temperaturę 150°C. Podzielenie akumulatora na mniejsze części zmniejsza ryzyko wymienionych zagrożeń. Poszczególne ogniwa są od siebie odizolowane, co zapewnia bezpieczeństwo reszty w przypadku uszkodzenia jednego lub kilku. Umieszczenie akumulatorów również jest ważne ze względu na zabezpieczenie ich w trakcie możliwego wypadku. Producenci aut elektrycznych stosują swoje opracowane metody, lecz najczęściej usytuowane są one pod spodem samochodu. Dodatkowo wymagane jest zastosowanie zabezpieczeń np. bezpieczników, wyłączników automatycznych, które w przypadku uszkodzenia samochodu natychmiastowo odłączą zasilanie.

Biorąc pod uwagę przytoczone informacje można ocenić, że akumulatory litowo-jonowe wraz z zastosowanym osprzętem są bezpiecznym źródłem energii przy użytkowaniu przez właściciela samochodu.



Rys. 4. Wykres zależności pojemności od napięcia początkowego (opracowanie na podstawie [2])

## PORÓWNANIE EMISJI CO<sub>2</sub> SAMOCHODÓW BEV I SPALINOWYCH

Dane opracowane przez Europejską Agencję Środowiska w 2019 roku, średnia emisja dwutlenku węgla przez nowe samochody wynosiła 122,4 g/km. Unijnie przepisy wprowadzone na rok 2021 mówią jasno, że maksymalny dozwolony średni poziom emisji ma być ograniczony do 95 g/km. Jest to mocne uderzenie w branżę motoryzacyjną, ponieważ udział transportu w ogólnej emisji CO<sub>2</sub> w Unii Europejskiej stanowi około 30%, z czego 72% to transport drogowy, czyli samochodowy. Patrząc na te dane można wywnioskować, że wprowadzenie większej ilości samochodów z zasilaniem elektrycznym może pozytywnie wpłynąć na ograniczenie tej emisji i prawie każdy producent samochodów pracuje w tym momencie nad swoimi modelami hybryd i samochodów elektrycznych. Samochody typu BEV podczas pracy nie produkują spalin i nie emitują dwutlenku węgla, a zastosowanie napędów hybrydowych na pewno mocno ogranicza tą produkcję. Można przyjąć, że biorąc pod uwagę tylko i wyłącznie rodzaj napędu zastosowanego, to samochód elektryczny deklasuje auto spalinowe pod tym względem.

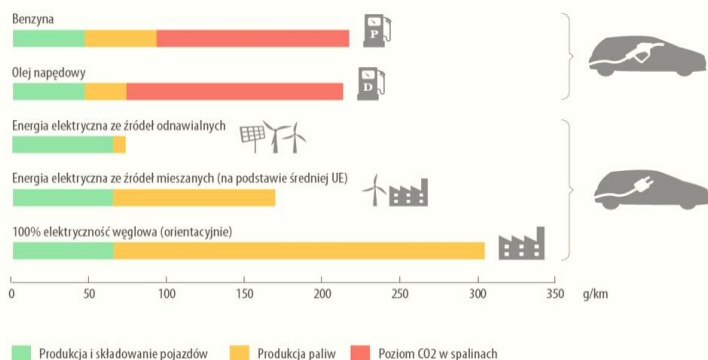
Niestety zawsze jest jakieś „ale”. Do jazdy samochodem elektrycznym potrzebujemy naładowania akumulatorów, czyli gdzieś tą energię trzeba wyprodukować. Każde państwo ma swoje źródła, z których produkowana jest energia elektryczna, co ma bezpośredni wpływ na produkcję dwutlenku węgla więc porównanie samochodów korzystających z ładowania z sieci elektrycznej do tych

z silnikami spalinowymi nie może obejść się bez brania pod uwagę tego aspektu. Przyjmuje się, że średni poziom emisji CO<sub>2</sub> podczas fazy użytkowania samochodu elektrycznego plasuje się na poziomie 62 g/km, co może dziwić w szczególności porównując do wymagań stawianych przez Unię Europejską dla nowych samochodów spalinowych.

Na załączonej grafice (Rys. 4), przedstawiony został zakres emisji CO<sub>2</sub> z 2014 roku dla 5 różnych przykładów źródła energii. Brane pod uwagę były trzy aspekty bezpośrednio łączące się z „życiem” samochodu. Jak widać samochody elektryczne mają potencjał do wyprzedzenia samochodów spalinowych, lecz najważniejszym elementem tej układanki jest źródło pochodzenia wyprodukowanej energii do ładowania. Grafika przedstawia również poziomy emisji dwutlenku węgla przy produkcji i składowaniu pojazdów. Aktualne dane mówią, iż emisja podczas produkcji samochodów elektrycznych waha się w okolicach 57 g/km, a dla przykładu porównując do tego samochód z silnikiem diesla jest to emisja w granicach 29 g/km. Tak duża wartość wiąże się głównie z produkcją akumulatorów oraz skomplikowanego procesu pozyskiwania surowców. Udział tych elementów w 2014 roku to prawie połowa emisji podczas całego cyklu użytkowego samochodu elektrycznego.

## EMISJE CO<sub>2</sub> W TRANSPORCIE W UE

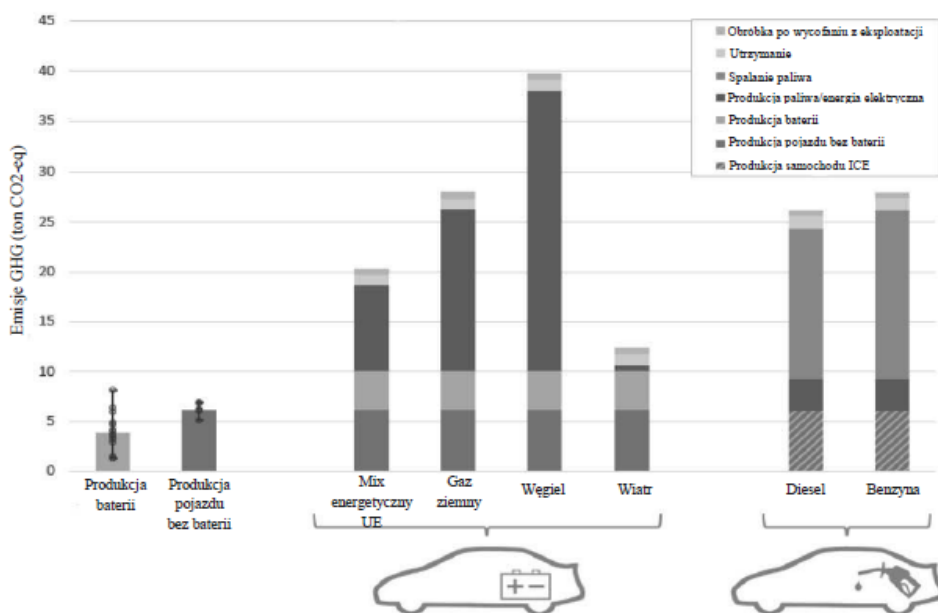
### Zakres emisji CO<sub>2</sub> w cyklu życia różnych pojazdów i rodzajów paliw (2014 r.)



Rys. 5. Wykres emisji CO<sub>2</sub> z cyklu życia pojazdów (źródło: Europejska Agencja Środowiska)

## PROCES PRODUKCJI AKUMULATORA

Wyodrębnienie procesu produkcji akumulatorów ma na celu przedstawienie rzeczywistego stanu emisji, który również wpływa na środowisko. Dane przedstawione wcześniej pokazują stan z 2014 roku, oraz jak duży udział miała w tym ta produkcja. Aktualnie do wyprodukowania baterii litowo-jonowej potrzeba 25–30 kWh energii na kilogram produktu. Oznacza to, że do wytworzenia jednego akumulatora o wadze 300kg i pojemności 30 kWh, czyli najczęściej używanej wielkości jakie montowane są w samochodach elektrycznych, potrzeba 7500–9000 kWh. Wyniki mogą być różne ze względu na różne rodzaje, techniki produkcji, rozmiary i budowę ogniw, dlatego wyniki emisji mogą być nawet wyższe. Ze względu na tak duży wpływ na emisję producenci akumulatorów nie upubliczniają danych z produkcji co utrudnia dokładne szacunki, a większość badań opracowana została na podstawie założeń lub danych wtórnych dostępnych w literaturze. Ostatnie badania na podstawie danych z przemysłu dały wyniki na poziomie 140–170 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh (3,4–4,1 t CO<sub>2</sub>-eq na zestaw baterii o pojemności 24 kWh) [2].



Rys. 6. Emisje gazów cieplarnianych w cyklu życia średniej wielkości pojazdu elektrycznego zasilanego baterią o pojemności 24 kWh (po lewej) i pojazdu wyposażonego w silnik spalinowy (po prawej) (źródło: Parlament Europejski, 2018) [2]

Dane z 2018 roku jasno pokazują, że wyniki emisji są ciągle poprawiane i napawają optymizmem. Porównując wcześniej zamieszczone dane z 2014 roku gdzie, produkcja akumulatorów odpowiadała blisko połowie emisji CO<sub>2</sub>, to cztery lata później zmniejszyła się do 35–41%. Jednak trzeba zwrócić uwagę, że ciągle prowadzone są badania i wprowadzane unowocześnienia, aby ograniczyć emisję. Możemy spodziewać się, że w niedługim czasie dane spływające z przemysłu mogą pozytywnie zaskoczyć.

## **PRZYSZŁOŚĆ ZUŻYTYCH BATERII**

Dużo kontrowersji powoduje także temat składowania zużytych akumulatorów, ponieważ można usłyszeć o nie do końca ekologicznych sposobach pozbywania się tego rodzaju elektrośmieci. Informacje o wielkich składowiskach elektrośmieci powstających w Afryce, gdzie wysyłane są śmieci z krajów bardziej rozwiniętych to na pewno duży problem, ale trzeba wziąć pod uwagę, że ciągle pracuje się nad rozwiązaniem tego problemu na różne sposoby.

Przyjmuje się, że w samochodach osobowych akumulator może pracować przez około 10 lat, a w pojazdach komunikacji zbiorowej takich jak autobusy, ale też w taksówkach z napędami hybrydowymi, które są mocniej eksploatowane ten czas skraca się nawet do 4 lat. Oznacza to, że pierwsze partie akumulatorów zostały już wymienione na nowe i teraz przychodzi czas na zrobienie z nimi porządku. Aby ograniczyć ich negatywny wpływ na środowisko stosuje się kilka metod.

Odpowiedzialność za rozwiązanie tego problemu spada na producentów samochodów elektrycznych i akumulatorów, którzy już w tym momencie wprowadzają różnego typu rozwiązania jak na przykład:

- regeneracja baterii
- recykling i odzyskiwanie surowców
- budowanie magazynów energii.

Informacje z rynku nie napawają optymizmem właścicieli samochodów elektrycznych ponieważ ostatnie lata pokazały, że wymiana akumulatorów może okazać sporym obciążeniem dla portfela tych osób. Oczywiście regeneracja jest stosowana również nie tylko w przypadku ponownego użycia w samochodach elektrycznych. Akumulatory dostają drugie życie jako magazyny energii co daje duże możliwości wykorzystania ich ponownie. Do zasilania napędu elektrycznego wymagany jest poziom co najmniej 70% sprawności baterii, ponieważ inaczej jego praca nie będzie efektywna. Potrzeby budowania magazynów ener-

gii ciągle rosną, a zużyte ogniwa, które już nie nadają się do użytku w samochodzie idealnie przydają się na przykład do akumulacji energii pozyskanych z odnawialnych źródeł takich jak panele słoneczne. Wykorzystanie to jest korzystne na małą skalę (domy jednorodzinne) jak i dużą, gdzie zabezpieczają całe osiedla. Jest to bardzo oszczędna opcja zbudowania magazynu energii, ponieważ takie ogniwa mogą kosztować 30–70% mniej niż nowe, a ich pojemność i sprawność jest na pewno wystarczająca, żeby zabezpieczyć potrzeby budynku na energię w przypadku wystąpienia awarii lub tym podobnych. Jednym z bardziej znanych przykładów takiego zastosowania jest magazyn energii zbudowany z baterii pochodzących z samochodów Nissan Leaf, które są wykorzystywane m.in. do magazynowania energii elektrycznej na stadionie Amsterdam ArenA drużyny piłkarskiej Ajax Amsterdam. Instalacja o pojemności 4 MWh służy do zasilania awaryjnego systemu oświetlenia energią ze źródeł odnawialnych – paneli fotowoltaicznych i turbin wiatrowych. Drugim takim przykładem jest użycie baterii z samochodów BMW i3, które tworzą magazyn energii dla fabryki tego modelu. Pozyskiwana jest z turbin wiatrowych i jest gromadzona w instalacji z wymontowanych akumulatorów. Podobnych przykładów jest już wiele. Opracowana przez McKinsey&Company szacunkowa łączna pojemność magazynów wykorzystujących baterie samochodowe może, do 2030 roku przekroczyć 200 GWh. Zwracają jednak uwagę, że na drodze do wykorzystania potencjału używanych baterii staje ich zróżnicowanie – w rozmiarze, formacie, składzie chemicznym elektrod ponieważ do 2025 roku może się pojawić nawet 250 nowych modeli samochodów elektrycznych.

Skutki bagatelizowania problemu narastającej ilości nie nadających się do użytku ogniw może odbić się nie tylko na środowisku, ale przede wszystkim na społeczeństwie. Ciągły wzrost musi zostać ograniczony, ponieważ od tego zależy dobro nas wszystkich.

## **CO DALEJ?**

Samochody elektryczne to bez wątpienia dziedzina, która będzie się rozwijać w zawrotnym tempie. Ocenienie przyszłości jest trudne i zależy od wielu zmiennych, które można opracować na podstawie przedstawionych danych i faktów. Każdy krok w rozwoju ma swoich zwolenników i przeciwników, ale podstawą powinno być przeanalizowanie plusów i minusów, a nie jednostronne ocenianie danego zagadnienia. Kontrowersje wokół wytwarzania, użytkowania i utylizacji

akumulatorów będą miały swoje podstawy do momentu, gdy nie zostaną rozwiane przez rzeczowe i stabilne argumenty. Ocenienie wyższości użytkowania energii elektrycznej w napędach samochodowych, nad energią ze spalania paliw kopalnych również nie jest możliwe ponieważ procent użytkowanych samochodów elektrycznych to kropla w morzu motoryzacji. Potrzeba jeszcze kilku lub kilkunastu lat by określić bezpośrednie skutki tej rewolucji.

Przedstawione w artykule podstawowe informacje na temat aut elektrycznych, ich użytkowania, pośredniej emisji CO<sub>2</sub> i wpływu na środowisko, produkcji akumulatorów i ich wykorzystaniu w późniejszym etapie ich „życia” dają możliwość do wypracowania własnych niepowtarzalnych wniosków. Każdy powinien sam ocenić czy według niego jest to temat z potencjałem, czy może powinniśmy znacząco ograniczyć inwestycje w ten dział motoryzacji.

## LITERATURA

- [1] <https://www.landcruiser.pl/czytelnia/aktualnosci-nowosci-swiat-inne/64-nowosci/553-hybrydowy-naped-na-4-kola>, zasoby z dnia 12.02.2021
- [2] Sendek-Matysiak E., Ocena baterii litowo-jonowych stosowanych w samochodach elektrycznych typu BEV pod względem bezpieczeństwa i wpływu na środowisko, Politechnika Świętokrzyska, 2019
- [3] <https://businessinsider.com.pl/technologie/nowe-technologie/co-sie-dzieje-ze-zuzytymi-bateriami-z-samochodow-elektrycznych-i-autobusow/63wg6gm> zasoby z dnia 12.02.2021
- [4] <https://biznesalert.pl/elektromobilnosc-baterie-recykling/> zasoby z dnia 12.02.2021
- [5] <https://www.volkswagen.pl/pl/swiat-volkswagena/ochrona-srodowiska/recykling-baterii-i-akumulatorow.html> zasoby z dnia 12.02.2021
- [6] <https://sip.lex.pl/akty-prawne/dzu-dziennik-ustaw/baterie-i-akumulatory-17545060/art-14> zasoby z dnia 12.02.2021
- [7] <https://e.autokult.pl/35416,blisko-100-tys-zl-za-akumulatory-w-autach-elektrycznych-wysoka-cena-ratowania-swiate> zasoby z dnia 12.02.2021
- [8] <http://www.elektroonline.pl/a/10486,Czy-jestesmy-gotowi-na-elektryczne-samochody> Elektrotechnika. zasoby z dnia 12.02.2021.

## **PROJEKTOWANIE NOWOCZESNYCH ROZDZIELNIC ŚREDNIEGO NAPIĘCIA**

### **WSTĘP**

Coraz większe zapotrzebowanie na energię elektryczną wymusza na projektantach infrastruktury energetycznej zwiększanie wydajności aparatury rozdzielczej. Nowoczesne rozwiązania w dziedzinie rozdziału energii elektrycznej pozwalają na rozdział i przesył dużych prądów roboczych, zachowując kompaktowe rozmiary rozdzielnic.

Od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku obserwuje się zjawisko coraz częstszego stosowania w sieciach SN rozdzielnic w izolacji sześćcfluorku siarki. To co je wyróżnia, to w porównaniu do rozdzielnic w izolacji powietrznej niewątpliwie małe gabaryty. Rozdzielnice SN w izolacji powietrznej posiadają jednakże kilka zasadniczych eksploatacyjnych zalet, których nie znajdziemy w rozdzielnicach z SF<sub>6</sub>.

### **BUDOWA PÓL ROZDZIELCZYCH I ICH WYPOSAŻENIE**

#### ***Przedział szyn zbiorczych***

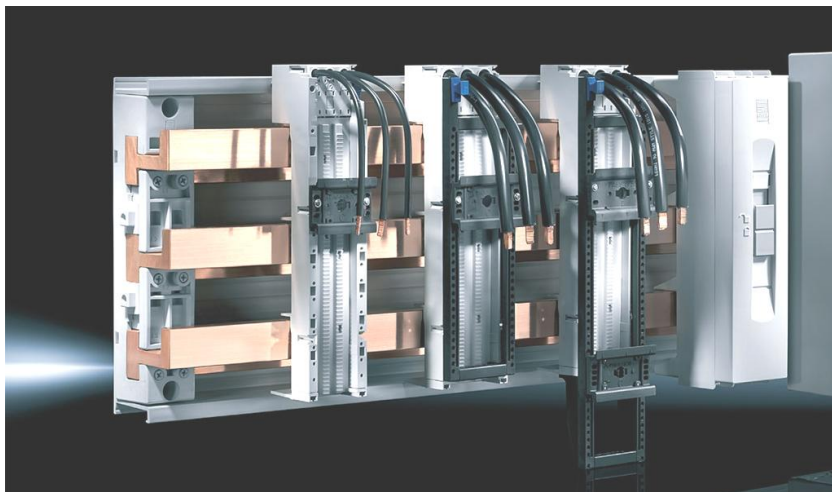
Przedział szyn zbiorczych izolowanych powietrzem jest usytuowany w górnej części pola i zazwyczaj przebiega wzdłuż całej rozdzielnicy. Pole pomiarowe lub sprzęgłowe usytuowane w części środkowej rozdzielnicy dzieli główny przedział szyn zbiorczych. Zastosowanie szyn zbiorczych zapewnia przede wszystkim oszczędność miejsca w rozdzielnicy. Oferowane na rynku systemy szynowe uwzględniają szereg rozwiązań, które są gwarancją pewności połączeń, szybkiego montażu oraz niezawodności dystrybucji energii elektrycznej. Podczas projektowania bierze się pod uwagę właściwości funkcjonalne, parametry elektryczne oraz cieplne. Podstawą każdego systemu dystrybucji są szyny wykonane z miedzi, aluminium lub aluminium pokrytego miedzianą otuliną. Przy wyborze systemu szyn zbiorczych należy zwrócić uwagę na szereg czynników

---

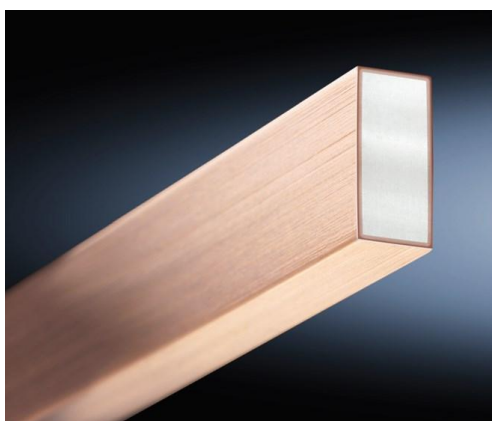
<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, [radoslaw.wnuk1@pollub.edu.pl](mailto:radoslaw.wnuk1@pollub.edu.pl)



takich jak obciążalność prądowa, wytrzymałość zwarciowa oraz warunki środowiskowe. Typowe belki mają rozstaw 60, 100, 185 mm przy grubości 5 i 10 mm oraz szerokość mieszczącą się pomiędzy 20 a 100 mm.



*Rys. 7 Szynoprzewody z systemem szybkiego łączenia (źródło: Ritall)*



*Rys. 2 Szyny Cuponal, wykonane z aluminiowego rdzenia pokrytego powłoką miedzianą (źródło: Ritall)*

Bardziej nowoczesnym rozwiązaniem są szyny o przekroju dwuteownika o standardowym rozstawie 60 mm. Umożliwia to montaż typowych aparatów, takich jak rozłączniki bezpiecznikowe lub wyłączniki mocy. Rozwiązanie to wyróżnia się sposobem montażu szyn, aparatów czy odprowadzeń. Zastosowanie adapterów zapewnia bezotworową instalację oraz łączenie szyn, podkładki

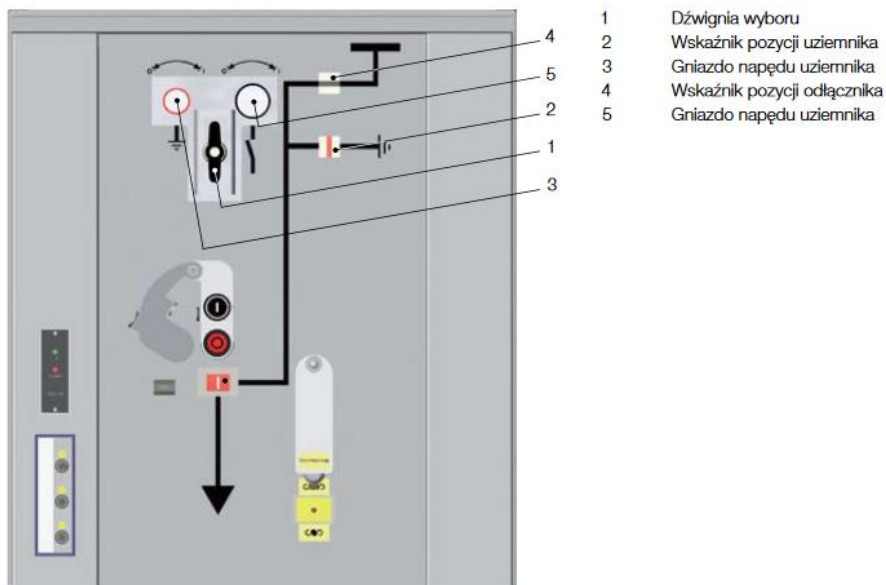
dystansowe pozwalają na regulację szerokości rozstawu. Dostępne są również elementy wyrównujące przy pomocy których niwelujemy różnie w przypadku stosowania szyn o różnych grubościach. Belki prowadzone są po specjalnych wspornikach izolacyjnych, odległości pomiędzy wspornikami izolacyjnymi warunkują maksymalne prądy zwarciove.

### ***Szyny dystrybucyjne i ochronne***

Szyny dystrybucyjne zazwyczaj prowadzone są z tyłu rozdzielnic oraz w układzie poziomym. W przypadku, gdy w rozdzielnic nie przewidziano członów wysuwnych lub ruchomych, a prąd znamionowy szyn zbiorczych nie przekracza 4000 A. Elementy o prądzie do 1600 A montowane są w przedziale o głębokości nie mniejszej niż 1 m, z kolei szyny o prądzie przekraczającym tą wartość instaluje się na minimalnej głębokości przedziału 2 m. Szerokość toru szynowego wynika z rodzaju aparatury, która będzie zasilana, natomiast odległość pomiędzy wspornikami izolacyjnymi wynikają z prądów zwarciowych. Dystrybucyjne szyny ochronne prowadzone są w dolne, tylnej części rozdzielnic. Belka ochronna mocowana jest bezpośrednio do konstrukcji lub prowadzona w uchwytych szynowych.

### ***Przedział rozłącznika***

Rozłącznik trójpołożeniowy umieszczony jest pomiędzy przedziałem szyn zbiorczych a przedziałem kablowym. Trzy pozycje przełączania: łączenie, rozłączanie oraz uziemianie są jednoznacznie zdefiniowane przez strukturę mechaniczną aparatu. Dzięki takiemu rozwiązaniu niemożliwe jest jednoczesne dokonanie łączenia i uziemienia. Osłona rozłącznika wykonana może być w różnych technologiach, popularny sposób wykonania osłony to połączenie żywicy epoksydowej i stali nierdzewnej. Rozłącznik taki jest kombinacją rozłącznika i uziemnika z możliwością załączania prądów oraz dodatkowego kabla uziemiającego. Taka konfiguracja tworzy wypełnioną gazem SF<sub>6</sub> obudowę, w której umieszczone są elektryczne części obwodu głównego rozłącznika. Takie rozwiązanie posiada taką zaletę że dolna część osłony rozłącznika wykonana ze stali nierdzewnej może stanowić metalową przegrodę pomiędzy przedziałem szyn zbiorczych i przedziałem kablowym. Takie rozwiązanie podnosi poziom bezpieczeństwa rozłącznika, dzięki skutecznej ochronie przed dotykem bezpośrednim.



Rys. 3. Panel kontrolny, kontrola mechaniczna oraz wskaźniki odłącznika trójpołożeniowego (źródło: ABB)

Stosowane są rozłączniki trójpołożeniowe typu nożowego. Styk rozłącznikowy takiego rozłącznika jest wyposażony w płytkowy system gaszenia łuku elektrycznego. Składa się on z płytek ochładzających, które rozszczepiają łuk elektryczny na krótkie łuki składowe połączone ze sobą szeregowo. Odtworzenie przerwy izolacyjnej po wygaśnięciu łuku elektrycznego przy przejściu prądu przez zero jest wspomagane przez dodatkowe chłodzenie łuku.

Rozłącznik taki może być wyposażony w zintegrowane bezpieczniki. Wkładki bezpiecznikowe znajdują się poniżej rozłącznika, w powietrzu o ciśnieniu atmosferycznym. Kłapa wkładek bezpiecznikowych zlokalizowana obok izolowanych uchwytów bezpieczników wysokonapięciowych. Kłapa bezpieczników jest zablokowana, jeżeli kabel zasilania nie jest uziemiony. Dodatkowy uziemnik do uziemiania linii kablowych zapewnia uziemienie przepalonych wkładek bezpiecznikowych również od strony kabla. Przystawienie uziemnika linii kablowej następuje równocześnie z przestawieniem uziemnika rozłącznika trójpołożeniowego.



- 1 Przycisk mechaniczny OFF rozłącznika
- 2 Przycisk mechaniczny ON rozłącznika
- 3 Gniazdo dla ręcznego zbrojenia sprężyny rozłącznika
- 4 Gniazdo dla operacji uziemnikiem
- 5 Wskaźnik mechaniczny „wyłącznik zamknięty” (ON), „wyłącznik otwarty” (OFF)
- 6 Wskaźnik przepalenia bezpieczników
- 7 Wskaźnik mechaniczny „sprężyna zazbrojona” „sprężyna rozbrojona”

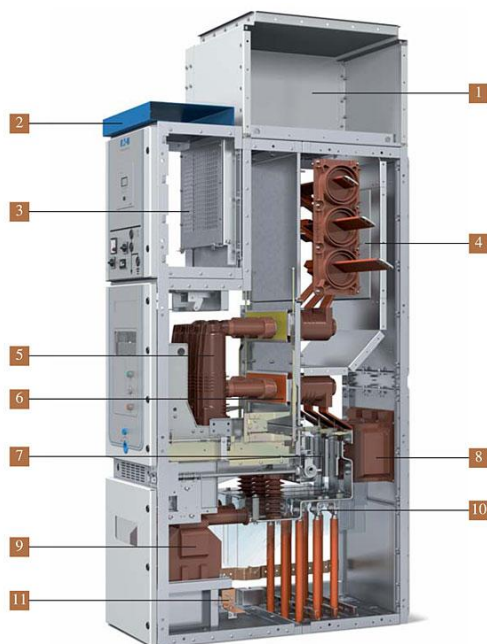
Rys. 4. Urządzenia kontrolne oraz wskaźniki panelu z rozłącznikiem z bezpiecznikami  
(źródło: ABB)

### **Przedział kablowy**

Około trzy czwarte objętości pola zarezerwowane jest dla przyłączy kabli zasilających oraz odpływowych, uziemników, przekładników i bezpieczników. Najczęściej stosowanymi wyłącznikami są te wypełnione sześćsiufluorkiem siarki lub próżniowe. Pola wyposażone w rozłączniki, dzięki którym wszystkie części będące pod napięciem podczas normalnej pracy są odłączone i uziemione przed otwarciem przedziału. Przedziały wyposażone w takie zabezpieczenia są oznakowane jako „dostępny przedział kontrolowany blokadą”. Przedziały pozbawione rozłączników zawierają elementy umożliwiające blokadę dostępu od zewnątrz pola poprzez założenie kłódki. Takie rozwiązanie oznakowane jest jako „przedział dostępny na podstawie procedury”.

### **Komora łukowa**

Poprzez komorę łukowa gazy powstałe w wyniku wewnętrznego łuku elektrycznego są wyprowadzane poza pomieszczenie rozdzielni. Komora łukowa może zostać rozbudowana poprzez zastosowanie dodatkowych elementów. System komór łukowych może być rozbudowany o przejścia przez ściany czy kraty wydmuchowe. Komora łukowa ma za zadanie również redukować ciśnienie i pochłaniać łuk elektryczny. Używane są również ceramiczne powierzchnie absorpcyjne, które skutecznie gaszą i filtrują ogień oraz gazy.



Rys. 5. Przekrój pola wyłącznikowego rozdzielnic Power Xpert UX (źródło: Eaton)

## PRZEKŁADNIKI PRĄDOWE

Przekładniki prądowe są to transformatory, które obniżają prąd do proporcjonalnych i mierzalnych wartości oraz odseparowują mierzone urządzenia, mierniki, przekaźniki oraz styczniki od obwodu elektroenergetycznego. Przekładnik prądowe pracują w warunkach zbliżonych do stanu zwarcia i mierzą przepływający prąd pierwotny.

Standardowo wykonane przekładniki prądowe przeznaczone do rozdzielnic średniego napięcia wykonane są jako wsporcze w obudowie żywicznej. Opcjonalnie mogą mieć wykonanie pierścieniowe. Przekładniki prądowe mogą posiadać wielokrotne wtórne uzwojenia z oddzielnymi od siebie magnetycznymi rdzeniami o taki samych lub różnych parametrach. Rodzaj użytego rdzenia zależy o przeznaczenia przekładnika prądowego. Mogą być stosowane z wieloma rdzeniami o różnych klasach dokładności, z rdzeniami pomiarowym lub zabezpieczającymi o różnych współczynnikach błędów. Przekładniki prądowe muszą być dostosowane do maksymalnych prądów przepływających w rozdzielnic.



Rys. 6. Konstrukcja przykładowego przekładnika prądowego (źródło: GP Elektron)

## PRZEKŁADNIKI NAPIĘCIOWE

Przekładniki napięciowe służą do zasilania obwodów pomiarowych, jak i zabezpieczeniowych urządzeń elektrycznych. Przekładniki jednocześnie separują aparaturę pomiarową oraz zabezpieczeniową od strony wysokiego napięcia. Posiadają tylko jeden rdzeń stalowy, na które nawinięte są uzwojenia wtórne. Przekładniki dostosowane są do napięcia znamionowego projektowanej rozdzielni. Dostępne są trzy konfiguracje przekładników: stacjonarne, wysuwne z żaluzjami oraz wysuwane bez żaluzji. Wszystkie konfiguracje wyposażone są w bezpieczniki po stronie pierwotnej.



Rys. 7. Konstrukcja przykładowego napowietrznego przekładnika napięciowego (źródło: Astat)

Drzwi przedziału kablowego, w którym są zabudowane przekładniki napięciowe blokowane są w zależności od położenia styków uziemnika. Przekładniki w konfiguracji wysuwanej z żaluzjami mogą być wysunięte przy zamkniętych drzwiach przedziału kablowego. Przekładnik może być wysunięty nawet przy obecności napięcia. Jednobiegunowo izolowane przekładniki napięciowe obok uzwojeń pomiarowych i zabezpieczających przewidywane są również dodatkowe uzwojenia uziemiające. W przeciwieństwie do przekładników prądowych zwojeń wtórnych przekładników napięciowych nie wolno zwierać. Zacisku uziemiającego uzwojenia pierwotnego nie wolno rozłączać w czasie pracy.

## PODSUMOWANIE

Projektowanie rozdzielnic średniego napięcia wymaga szerokiej znajomości dostępnej literatury oraz nowoczesnych rozwiązań dostosowanych do rosnących wymagań. Ciągłe rozwijająca się aparatura pozwala zmniejszać gabaryty rozdzielnic przy zachowaniu tych samych parametrów. Ze względu na ochronę środowiska wypierane z rynku są rozwiązania bazujące na sześciofluorku siarki. Powoduje to konieczność opracowania rozwiązań równie skutecznych oraz przystępnych gabarytowo. Nie sposób wymienić wszystkich warunków i rozwiązań branych pod uwagę podczas projektowania nowoczesnych rozdzielnic. Możemy tylko przybliżyć strategię projektowania. Popularne w ostatnim czasie farmy fotowoltaiczne łączone bezpośrednio z siecią średniego napięcia wymagają niezawodnego działania oraz zapewnienia bezpieczeństwa aparatury oraz samej instalacji. Bardzo popularne staje się korzystanie ze zdalnej obsługi rozdzielnic zlokalizowanych w trudnodostępnych miejscach. Umożliwia to szybką reakcję oraz podgląd bieżących parametrów rozdzielnic.

## LITERATURA

- [1] Karol Kuczyński, *Budowa rozdzielnic SN – wybrane zagadnienia*, [www.elektro.info.pl](http://www.elektro.info.pl), zasoby z dnia 20.11.2020
- [2] Katalog produktów, <https://new.abb.com/pl>, zasoby z dnia 22.12.2020
- [3] Mariusz Hudyga, *Rozdzielnic SN Eaton Power Xpert UX*, [www.elektrosystemy.pl](http://www.elektrosystemy.pl), zasoby z dnia 12.12.2020
- [4] Oferta handlowa, <https://gislebork.pl>, zasoby z dnia 20.12.2020
- [5] Andrzej Wiaterek, *Podstawowe parametry przekładników prądowych*, [www.gpelektron.pl](http://www.gpelektron.pl), zasoby z dnia 20.11.2020.

## **WPLYW WYGRZEWANIA NA WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE NANOKOMPOZYTÓW $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{(100-x)}$ O MAŁEJ ZAWARTOŚCI FAZY METALICZNEJ WYTWORZONYCH W ATMOSFERZE ARGONU Z NISKĄ ZAWARTOŚCIĄ TLENU**

### **WSTĘP**

Jednym z najbardziej rozwijających się kierunków w nauce oraz technice jest nanotechnologia. Jest to nauka obejmująca tworzenie struktur o rozmiarach nanometrycznych. W dzisiejszych czasach dużym zainteresowaniem cieszą się nanokompozyty. Potrzeby rynku w znalezieniu wysokiej jakości materiałów oraz nowych zastosowań ich w produkcji i przemyśle są przyczyną zaproponowania rozwiązań oraz modyfikacji istniejących już materiałów w tym nanokompozytów [18].

Wpływ temperatury oraz zawartość fazy metalicznej w danym kompozycie kształtują jego właściwości dając możliwości jego zastosowania w przemyśle m.in. elektrotechnice i elektronice czy w innych obszarach [18].

### **ZNACZENIE I ROLA NANOKOMPOZYTÓW**

Nanokompozyty składają się z co najmniej dwóch komponentów, z których przynajmniej jeden ze składników ma wymiar w skali nanometrycznej. Właściwości tych materiałów zmieniają się kiedy pracują oraz funkcjonują w nanostrukturach. Ich właściwości zmieniają się również pod wpływem wielkości oraz kształtu cząsteczki [10, 11]. Są to właściwości mechaniczne, magnetyczne, chemiczne itp. Dzięki dodaniu wypełniacza zwanego inaczej nanonapełniaczem mogą poprawić się właściwości nanokompozytu. Nanonapełniacz i osnowa oddziałują na siebie. Osnowa to faza otaczająca cząsteczki innej fazy [1].

Osnowa nanokompozytów, jako główny składnik, ma za zadanie chronić włókna przed jakimikolwiek uszkodzeniami mechanicznymi, ma również spajać

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, kornel.wioroko@pollub.edu.pl



włókna i przekazywać naprężenia oraz uniemożliwić powstanie pęknięcia krucho. Wyróżniamy trzy grupy nanokompozytów ze względu na różne rodzaje osnowy [14]. Są to między innymi nanokompozyty metaliczne (na osnowie metalu), nanokompozyty ceramiczne (na osnowie ceramiki) oraz nanokompozyty polimerowe (na osnowie polimeru) [1].

Od mikrostruktury zależą właściwości nanokompozytów. Decydują o tym wielkość elementów struktury osnowy, czyli wielkość cząstek zbrojących, oraz to gdzie występują naprężenia szczątkowe. Nanonapełniacz w nanokompozytach ma zazwyczaj największe znaczenie, w znacznym stopniu wpływa na właściwości danego kompozytu.

## **METODY WYTWARZANIA NANOKOMPOZYTÓW**

Aktualnie technika pozwala nam na otrzymywanie nanokompozytów różnymi metodami, które zależą od rodzaju osnowy. Nanokompozyty metaliczne i ceramiczne posiadają pewną wspólną własność, dlatego ich metody wytwarzania zostaną omówione równocześnie. Pomijając metody wytwarzania nanokompozytów polimerowych, ponieważ badany nanokompozyt posiada strukturę metal-dielektryk, dlatego został wytworzony metodą rozpylania kombinowaną wiązką argonu oraz tlenu. Ta metoda zawdzięcza jednoczesne rozpylenie stopu ferromagnetycznego metalu oraz dielektryka i uformowanie ich na podłożu, zapewnia dobrą powtarzalność składu fazowego warstw, niewysoką temperaturę podłoża przy syntezie, homogeniczność oraz inne profity [18].

### ***Metoda spiekania proszków***

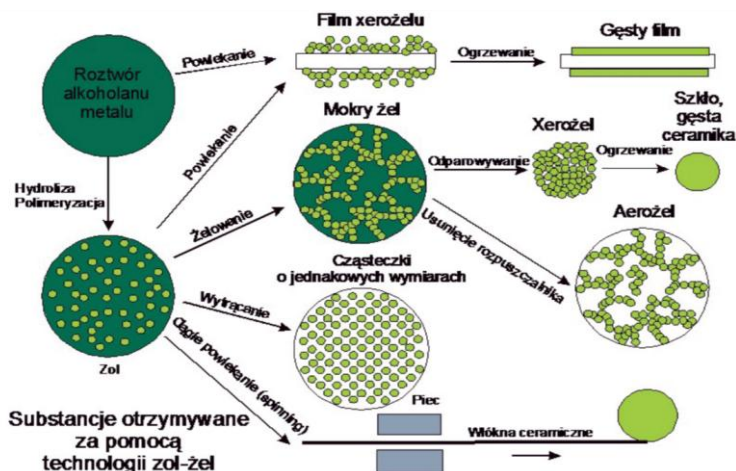
Ta technologia skupia się na uzyskaniu proszków o nanokrystalicznej budowie cząstek, dzięki zmieleniu poszczególnych składników danego nanokompozytu w młynku kulowym, który musi być wysokoenergetyczny. Procesy takie jak topienie oraz kruszenie cząstek zachodzą podczas mielenia w młynku, co doprowadza do dużego zanieczyszczenia materiału w trakcie procesu poprzez zużywające się elementy mielące [16]. Otrzymanie jednolitej struktury po procedurze mielenia stanowi nie lada wyzwanie. Duża niejednorodność oraz zanieczyszczenia, za które odpowiada proces mielenia sprzyja temu, by efekt końcowy produkcji danego materiału był mniej wytrzymały [10].

### ***Metoda zol-żel***

Metoda zol-żel jest związana z ciągiem reakcji chemicznych, polega na przemianie ciekłego roztworu substratów zwanego (zol) w polimer (żel), który posiada tę samą objętość jaką ma zol. W metodzie tej wykorzystywana jest reak-

cja hydrolizy prekursorów, dzięki której otrzymuje się homogeniczny zol. Tak wytworzony żel zostaje poddany suszeniu. W wyniku suszenia żelu uzyskujemy produkt syntezy. Dzięki tej metodzie możemy uzyskać ceramiki oraz szkła w przeróżnej strukturze: cienkich warstw, mikroporowatych membran, ceramicznych włókien, litej lub wysoko porowatej (aerożelowej) [7, 12].

Poniższy rysunek 1 przedstawia otrzymywanie materiałów ceramicznych za pomocą metody zol-żel.



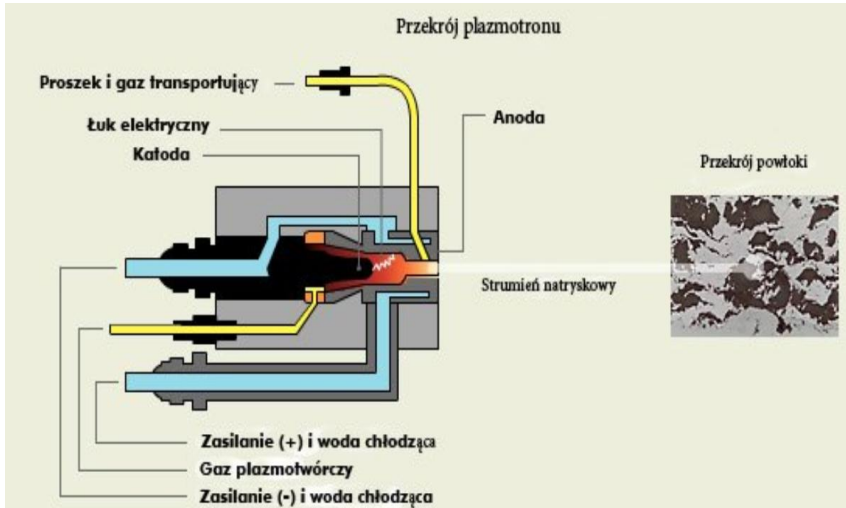
Rys. 1. Otrzymywanie materiałów ceramicznych za pomocą metody zol-żel [10]

### Natryskiwanie termiczne

W metodach natryskiwania termicznego można wyróżnić dwa typy procesów natryskiwania takie jak: natryskiwanie plazmowe, natryskiwanie naddźwiękowe.

Natryskiwanie plazmowe (natrysk plazmowy) jest najpopularniejszym i najbardziej korzystnym technicznie procesem technologii natrysku cieplnego [14]. W tej metodzie można użyć materiałów o bardzo wysokiej lub niskiej temperaturze topnienia. Najczęstszym gazem używanym w tej metodzie jest argon oraz azot. Substancja wtryskiwana jest do palnika, przez który zostaje wpuszczany gaz [12]. Jeżeli zostanie przyłożone napięcie do anody oraz katody, wprowadzony proszek przechodzi w stan plazmy. Z kolei nakładana warstwa ulega krystalizacji na danym podłożu, na które go natryskujemy [1, 5, 6].

Rysunek 2 przedstawia schemat budowy pistoletu plazmowego składającego się z: katody, anody, zasilanie (+) i woda chłodząca, zasilanie (-) i woda chłodząca, gazu plazmo twórczego, strumienia natryskowego oraz proszku i gazu transportującego.

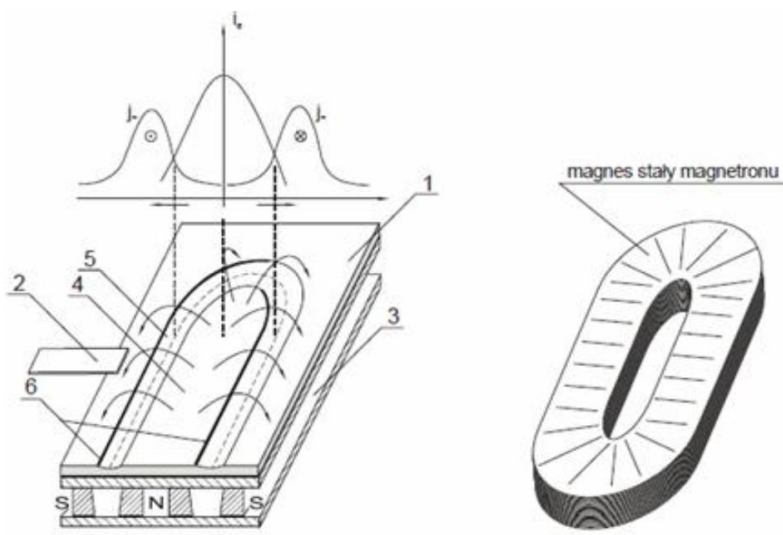


Rys. 2. Schemat budowy pistoletu plazmowego [10]

Zaletą natryskiwania termicznego jest możliwość nakładania bardzo cienkich warstw nanocząsteczek, jednak trzeba uważać na koszty, które są bardzo duże [1, 5, 6, 8].

### ***Rozpylanie magnetronowe***

Metoda ta polega na wybijaniu atomów z powierzchni elektrody oraz osadzaniu ich na powierzchni podłoża. Magnetron ma wywołać wyładowanie jarzeniowe w polach magnetycznych oraz elektrycznych. Lokalizuje się to wyładowanie za pomocą stałego pola magnetycznego. Nadanie jonom odpowiedniej energii oraz przyciągnięcia zawdzięczamy poprzez spolaryzowanie powierzchni wysokim ujemnym potencjałem. Gazy, które doprowadzamy do komory są jonami pierwotnymi gazów obojętnych lub gazów reaktywnych, najczęściej jest to argon [1, 2, 4, 9]. Rysunek 3 przedstawia schemat źródła magnetronowego przekrój oraz magnes stały.



Rys. 3. Schemat źródła magnetronowego (przekrój) i magnesu stałego [10]: 1 – target – katoda, 2 – anoda, 3 – nabiegunniki, 4 – przestrzeń środkowa, 5 – przestrzeń erozyjna, 6 – pobocze z warstwą ustronną

### **Rozpylanie jonowo-wiązkowe**

Metoda ta pozwala osadzić na powierzchni rozpylenie ferromagnetycznego stopu oraz dielektryka. Fragmenty tarczy odzepiają się i przemieszczają przez komorę w wyniku zderzenia z jonami, wówczas osadzając się na podłożu. Skład warstwy jest mniej więcej taki sam jak skład tarczy, dlatego rozpylaniem jonowym można nanieść warstwy stopów [2]. Jeżeli na metal bądź materiał dielektryczny w tym samym czasie będą trafiać atomy obu składników, będą formować nanoziarna, przy czym metal będzie formować ziarna w kształcie podobnym do kulistego [1, 7].

## **WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE I MAGNETYCZNE NANOKOMPOZYTU O STRUKTURZE METAL-DIELEKTRYK**

Nanocząsteczki magnetyczne i stopowe w metalach niemagnetycznych, izolatorach, ferrytach i polimerach cieszą się dużym zainteresowaniem ze względu na ich potencjalne zastosowania w transformatorach wysokiej częstotliwości, elementach indukcyjnych, elektronice oraz ogólnie w przemyśle. Wśród różnych materiałów magnetycznych, nanokrystaliczny Fe zyskuje uwagę dzięki wysokiemu nasyceniu, sieciowaniem magnetycznym, przepuszczalności i niskiej koedycyjności [1, 10].

Nanokompozyty krzemionkowe budzą szczególne zainteresowanie, ponieważ mają wyższą rezystywność, a to w połączeniu z dobrymi właściwościami magnetycznymi metalicznego Fe czyni je dobrym kandydatem do zastosowań dielektrycznych i może być dobrym materiałem zastępczym dla ferrytów [1, 3, 8]. W nanokompozytach metal-dielektryk, w zależności od zawartości fazy metalicznej  $x$  i progu perkolacji  $x_c$ , występują różne mechanizmy przewodzenia. Obserwowany wzrost konduktywności wraz ze wzrostem temperatury świadczy o występowaniu w nanokompozycie przewodzenia typu „dielektrycznego”. Zawartość fazy metalicznej jest wtedy mniejsza od progu perkolacji ( $x < x_c$ ).

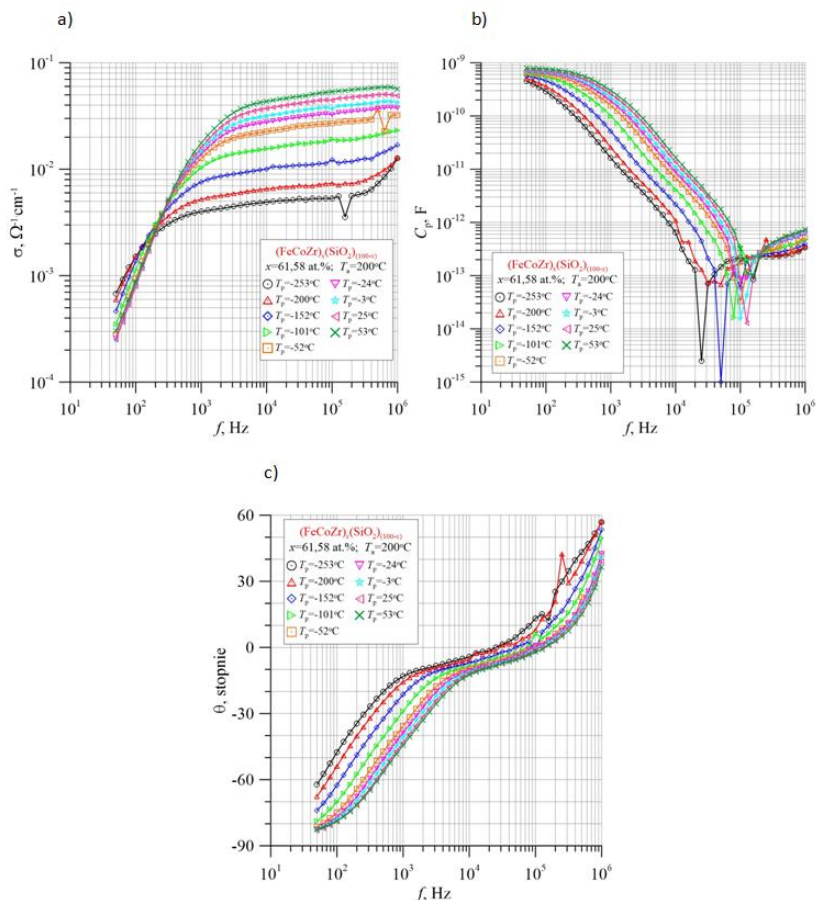
Obniżenie konduktywności wraz ze wzrostem temperatury pomiarowej świadczy o tym, że w nanokompozycie mamy do czynienia z przewodzeniem typowym dla metali. Dla tego przypadku zawartość fazy metalicznej w nanokompozycie jest większa od progu perkolacji ( $x \geq x_c$ ). Gdy wartość fazy metalicznej  $x$  przekroczy wartość progu perkolacji  $x_c$  zachodzi zmiana mechanizmu przewodzenia z dielektrycznego na metaliczny [7, 9].

## **WYNIKI POMIARÓW NANOKOMPOZYTU (FeCoZr)<sub>x</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>(100-x)</sub>**

W rozdziale tym przedstawione zostaną wyniki pomiarów właściwości elektrycznych (konduktywność, kąt przesunięcia fazowego oraz pojemność) dla dwóch próbek nanokompozytu (FeCoZr)<sub>x</sub>(SiO<sub>2</sub>)<sub>(100-x)</sub> o zawartościach fazy metalicznej  $x_1 = 61,58$  at.% oraz  $x_2 = 69,64$  at.% wytworzonych w atmosferze argonu z niską zawartością tlenu. Badania przeprowadzono przy użyciu aparatury prądu przemiennego w zakresie częstotliwości 50 Hz do 1 MHz oraz temperatur pomiarowych  $T_p$  z przedziału od  $-253^\circ\text{C}$  do  $373^\circ\text{C}$ . Każdorazowo po przeprowadzeniu pomiarów właściwości elektrycznych próbki poddawano wygrzewaniu z izochronicznemu w zakresie temperatur wygrzewania od  $200^\circ\text{C}$  do  $400^\circ\text{C}$  z krokiem  $25^\circ\text{C}$  [18].

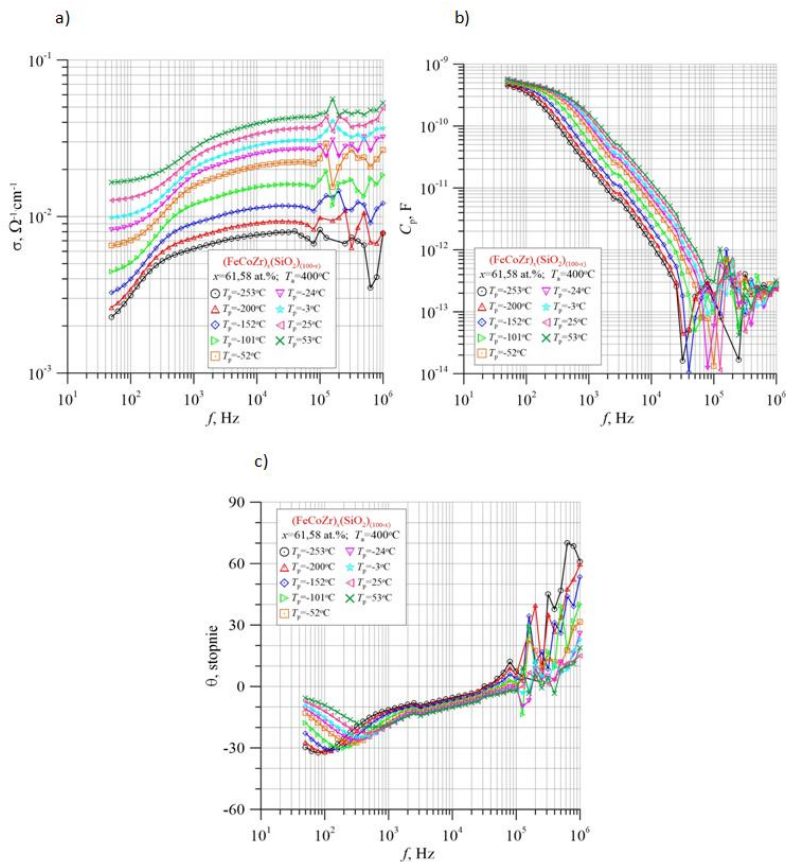
### **BADANIE NANOKOMPOZYTU O ZAWARTOŚCI FAZY METALICZNEJ $X_1 = 61,58$ AT. %**

Rysunek 4 przedstawia zależności częstotliwościowe nanokompozytu wygrzanego w temperaturze  $200^\circ\text{C}$  o zawartości fazy metalicznej  $x_1 = 61,58$  at.%. Na rysunku (a) widzimy dwa stadia zmian konduktywności pod wpływem zmian częstotliwości. Bardzo szybki wzrost konduktywności jest obserwowany w zakresie niskich i średnich częstotliwości oraz wolny wzrost dążący do stabilizacji widzimy w obszarze wysokich częstotliwości.



Rys. 4. Zależności: a) konduktywności, b) pojemności, c) kąta przesunięcia fazowego badanego nanokompozytu  $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{(100-x)}$  od częstotliwości dla próbki wygrzanej w temperaturze  $200^\circ\text{C}$  o zawartości fazy metalicznej  $x_1 = 61,58 \text{ at.}\%$  [18]

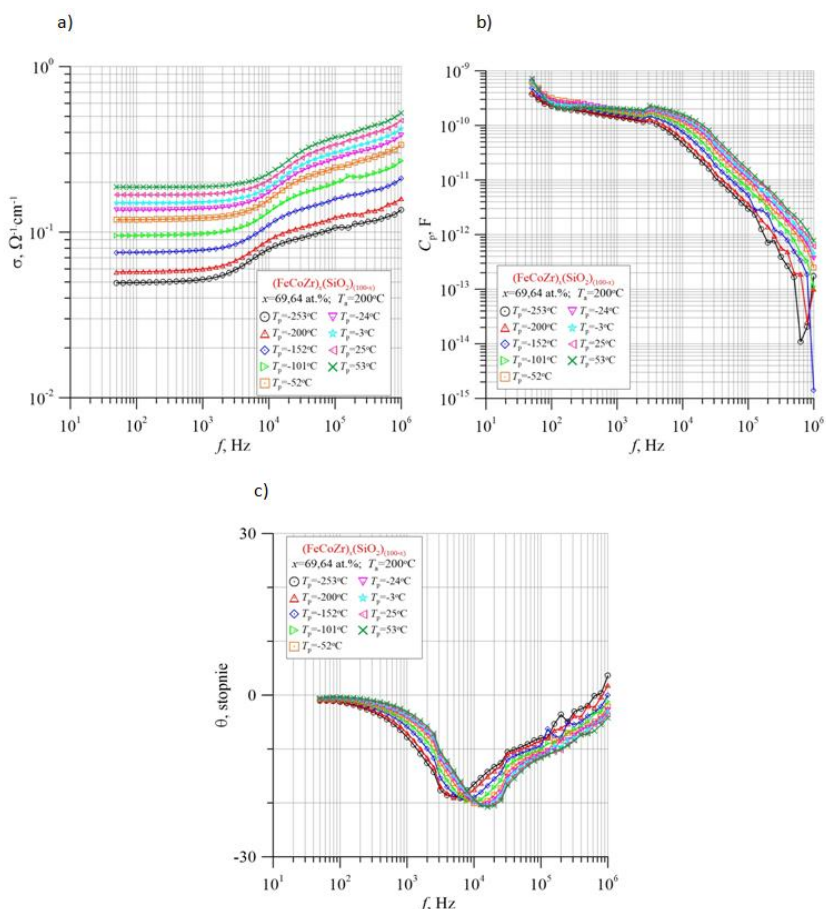
Widać, iż pojemność wraz ze wzrostem temperatury pomiarowej zwiększa się. Natomiast wraz ze wzrostem częstotliwości pomiarowej wartość pojemności w szybki sposób zmniejsza się od wartości bliskich  $10^{-9} \text{ F}$  dla niskich częstotliwości do ok.  $10^{-13} \text{ F}$  dla częstotliwości z przedziału od  $2 \times 10^4 \text{ Hz}$  do  $2 \times 10^5 \text{ Hz}$ . Zauważyć można, że wraz ze wzrostem temperatury pomiarowej wartości kąta przesunięcia fazowego zmniejszają się. Kąt przesunięcia zmienia się z wartości ujemnych do wartości dodatnich. Zmiany następują w przedziale od  $-62^\circ$  do  $57^\circ$  dla temperatury pomiarowej  $T_p = -253^\circ\text{C}$ . Dla najwyższej temperatury pomiarowej  $T_p = 53^\circ\text{C}$  kąt przesunięcia fazowego zmienia się od  $-82^\circ$  (przy najniższej częstotliwości) do  $37^\circ$  (przy najwyższej częstotliwości). Częstotliwość, przy której wartość kąta przesunięcia wynosi  $0^\circ$  nazywa się częstotliwością rezonansową [18].



Rys. 5. Zależności: a) konduktywności, b) pojemności, c) kąta przesunięcia fazowego badanego nanokompozytu  $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{(100-x)}$  od częstotliwości dla próbki wygrzanej w temperaturze  $400^\circ\text{C}$  o zawartości fazy metalicznej  $x_1 = 61,58 \text{ at.}\%$  [18]

Rysunek 5 przedstawia zależności częstotliwościowe nanokompozytu wygrzanego w temperaturze  $400^\circ\text{C}$  o zawartości fazy metalicznej  $x_1 = 61,58 \text{ at.}\%$ . Przy częstotliwości pomiarowej  $50 \text{ Hz}$  konduktywność wynosi ok.  $2,2 \times 10^{-3} \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$  dla najniższej temperatury pomiarowej  $T_p = -253^\circ\text{C}$ , natomiast ok.  $1,8 \times 10^2 \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$  dla temperatury pomiarowej  $T_p = 53^\circ\text{C}$ . Szybszy wzrost konduktywności obserwowany w zakresie niskich i średnich częstotliwości oraz wolniejszy wzrost dążący do stabilizacji w obszarze wysokich częstotliwości. Przy częstotliwości, dla której widoczne jest minimum wartości pojemności obserwujemy przejście zależności kąta przesunięcia fazowego przez zero – zależność widoczna na rysunku (c). Można zauważyć, że czym niższa temperatura badanej próbki tym wartość pojemności jest mniejsza, natomiast wraz ze wzrostem

temperatury pomiarowej wartości pojemności się zwiększają. Możemy zaobserwować, że w zakresie niskich częstotliwości zauważalny jest spadek wartości kąta przesunięcia fazowego. Kąt przesunięcia fazowego zmienia się z wartości ujemnych do wartości dodatnich. Częstotliwości, przy której wartość kąta przesunięcia fazowego osiąga wartość  $0^\circ$  odpowiada częstotliwości, dla której obserwowane jest minimum pojemności w funkcji częstotliwości [18].



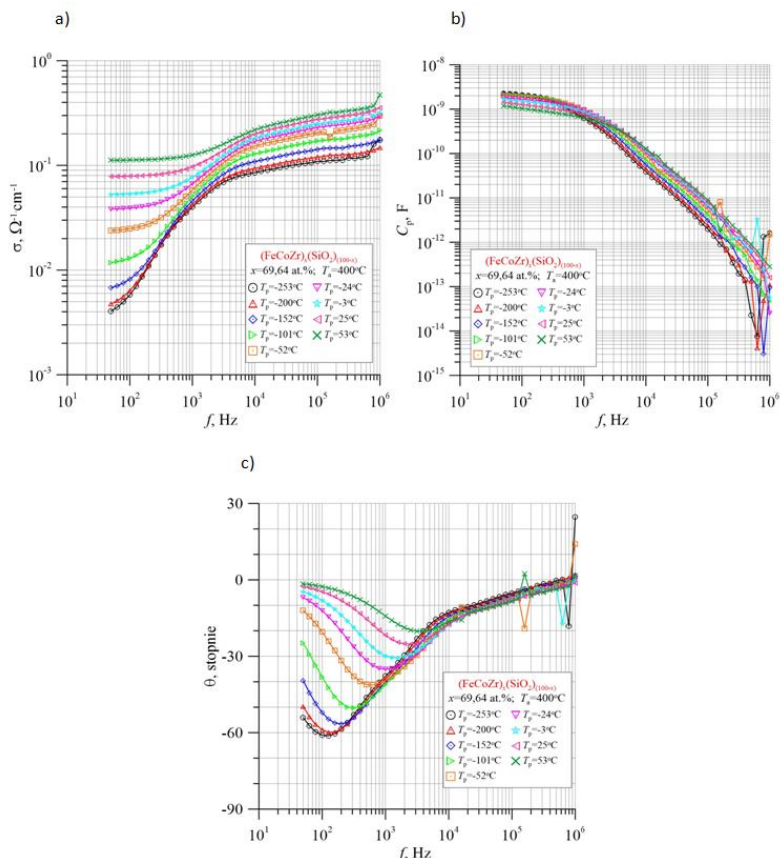
Rys. 6. Zależności: a) konduktywności, b) pojemności, c) kąta przesunięcia fazowego badanego nanokompozytu  $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{(100-x)}$  od częstotliwości dla próbki wygrzanej w temperaturze  $200^\circ\text{C}$  o zawartości fazy metalicznej  $x_1 = 69,64$  at. % [18]

Rysunek 6 przedstawia zależności częstotliwościowe nanokompozytu wygrzanego w temperaturze  $200^\circ\text{C}$  o zawartości fazy metalicznej  $x_1 = 69,64$  at.%. Na danej zależności (a) widać, iż wraz ze wzrostem temperatury pomiarowej



wartości pojemności się zwiększają. Natomiast wraz ze wzrostem częstotliwości pomiarowej wartość pojemność w szybki sposób zmniejsza się od wartości bliskich  $10^9$  F dla niskich częstotliwości do ok.  $10^{13}$  F dla częstotliwości z przedziału od  $2 \times 10^4$  Hz do  $2 \times 10^5$  Hz. Kąt przesunięcia fazowego jest ujemny w praktycznie całym zakresie, oprócz dla temperatur  $T_p = -253^\circ\text{C}$  oraz  $T_p = -200^\circ\text{C}$  w zakresie najwyższej częstotliwości. Dla niskich częstotliwości z przedziału od 50 Hz do ok.  $10^4$  Hz obserwujemy spadek wartości kąta przesunięcia fazowego do wartości ok.  $-20^\circ$ . W zakresie częstotliwości od 50 Hz do ok.  $10^4$  Hz konduktywność gwałtownie rośnie, a w zakresie najwyższych częstotliwości dąży do stabilizacji. Dla temperatury  $T_p = -101^\circ\text{C}$  konduktywność wynosi ok.  $4 \times 10^{-4} \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ , natomiast dla temperatury pomiarowej  $T_p = 53^\circ\text{C}$  wynosi ok.  $1,5 \times 10^{-3} \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$  w przypadku najniższej częstotliwości, natomiast dla temperatury pomiarowej  $T_p = -200^\circ\text{C}$  konduktywność wynosi ok.  $1,3 \times 10^{-1} \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ , dla temperatury pomiarowej  $T_p = -101^\circ\text{C}$  wynosi ok.  $2,1 \times 10^{-1} \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$  dla częstotliwości o największej wartości [18].

Rysunek 7 (patrz rys na s. 225) przedstawia zależności częstotliwościowe nanokompozytu wygrzanego w temperaturze  $400^\circ\text{C}$  o zawartości fazy metalicznej  $x_1 = 69,64$  at.%. Widzimy dwa stadia zmian konduktywności pod wpływem zmian częstotliwości. Bardzo szybki wzrost konduktywności obserwowany w zakresie wysokich i średnich częstotliwości oraz wolny wzrost dążący do stabilizacji w obszarze niskich częstotliwości. Dla temperatur pomiarowych od  $T_p = -24^\circ\text{C}$  do  $T_p = 53^\circ\text{C}$  z zakresu częstotliwości od 50 Hz do ok.  $2 \times 10^2$  Hz konduktywność jest na stałym poziomie, natomiast dla temperatur o niższych wartościach z zakresów częstotliwości od 50 Hz do ok.  $10^3$  Hz następuje gwałtowny wzrost konduktywności bez tendencji do ustabilizowania. Dla wszystkich temperatur pomiarowych z zakresu częstotliwości od 50 Hz do częstotliwości ok.  $2,5 \times 10^3$  Hz wartość kąta przesunięcia fazowego jest większa dla temperatur wyższych, natomiast po przekroczeniu częstotliwości ok.  $2,5 \times 10^3$  Hz jest dokładnie odwrotnie, czym większa temperatura pomiarowa tym mniejsza jest wartość kąta przesunięcia fazowego [18].



Rys. 7. Zależności: a) konduktywności, b) pojemności, c) kąta przesunięcia fazowego badanego nanokompozytu  $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{(100-x)}$  od częstotliwości dla próbki wygrzanej w temperaturze  $400^\circ\text{C}$  o zawartości fazy metalicznej  $x_1 = 69,64 \text{ at.}\%$  [1]

## PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono i omówiono wyniki pomiarów nanokompozytów  $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{(100-x)}$ , w których fazę metaliczną tworzy ferromagnetyk FeCoZr o zawartościach fazy metalicznej  $x_1 = 61,58 \text{ at.}\%$  oraz  $x_1 = 69,64 \text{ at.}\%$ . Opisano skład, metody wytwarzania nanokompozytów, znaczenie i rolę jaką pełnią, właściwości elektryczne i magnetyczne nanokompozytu o strukturze metal-dielektryk oraz wpływ wygrzewania na właściwości nanokompozytów  $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{(100-x)}$ , którego osnową jest ditlenek krzemu [18]. Przedstawiono porównanie uzyskanych wyników dla próbek nanokompozytu o zawartościach fazy metalicznej  $x_1 = 61,58 \text{ at.}\%$  oraz  $x_1 = 69,64 \text{ at.}\%$  wygrzanych w różnych temperaturach. Każda próbka wykazywała się wzrostem konduktywności wraz

ze wzrostem temperatury pomiarowej. Na tej podstawie można stwierdzić, że badany nanokompozyt wykazuje przewodzenie typu dielektrycznego. Ogólne zaobserwowane temperaturowe i częstotliwościowe zmiany pojemności charakterystyczne dla każdej próbki to gwałtowny spadek pojemności w zakresie wysokich częstotliwości. Dzięki wygrzewaniu w wysokich temperaturach charakterystyka częstotliwościowej zależności kąta przesunięcia fazowego osiągała wartość  $0^\circ$ . Zmiana charakteru materiału z pojemnościowego na indukcyjny po przekroczeniu częstotliwości rezonansowej jest interesującym zjawiskiem. Badania nad nanokompozytami przyczyniają się do zwiększenia obszarów ich zastosowania, wpływ temperatury oraz zawartość fazy metalicznej kształtują jego właściwości dając możliwości jego zastosowania w przemyśle m.in. elektrotechnice i elektronice czy w innych obszarach nauki.

## LITERATURA

- [1] Kurzydłowski K., Lewandowska M., *Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2010
- [2] Fedotova J., Kołtunowicz T., Zhukowski P., *Transport ładunków i właściwości strukturalne wybranych nanokompozytów metal-dielektryk*, Wyd. Politechnika Lubelska, 2012
- [3] Królikowski W., *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*, Wyd. Naukowe PWN Warszawa, 2012
- [4] Hagi A., Klodzinska E., Kubica S., Zaikov G., *Selected nanopolymers research*, Toruń, 2012
- [5] Kurzydłowski K., Lewandowska M., *Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2010
- [6] Bienias J., *Struktura i właściwości materiałów kompozytowych*, Wyd. Politechnika Lubelska, Lublin 2002
- [7] Thirumal E., Prabhu D., Chattopadhyay K., Ravichandran V., *Synthesis, magnetic and electrical properties of Fe-containing SiO<sub>2</sub>nanocomposite*, Indie, "Journal of Alloys and Compounds", 172, 2010
- [8] Kierczyński K., Kołtunowicz T., *Właściwości elektryczne nanokompozytów (FeCoZr)<sub>x</sub>(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>(100-x)</sub> wytworzonych rozpylaniem wiązką argonu i tlenu jako układy kondensatorowe*, Lublin, Politechnika Lubelska, 2015
- [9] Wiglusz R.J., *Porfirny zamknięte w żelu krzemionkowym*, Polska Akademia Nauk, Wrocław, 2011
- [10] <http://zasoby.open.agh.edu.pl>, zasoby z dnia 20.01.2021
- [11] <http://zasoby.open.agh.edu.pl/~10smgzyl/index350a.html?module=articles&action=show&name=wstep-budowa-materialow>, zasoby z dnia 20.01.2021

- [12] [http://www.deltami.edu.pl/temat/matematyka/geometria/stereometria/2015/09/29/Wypelniane\\_przestrzeni/](http://www.deltami.edu.pl/temat/matematyka/geometria/stereometria/2015/09/29/Wypelniane_przestrzeni/), zasoby z dnia 20.01.2021
- [13] [http://miesiecznikchemik.pl/wp-content/uploads/2015/01/chemik\\_2014\\_04-2.pdf](http://miesiecznikchemik.pl/wp-content/uploads/2015/01/chemik_2014_04-2.pdf)
- [14] <http://www.tworzywa.pwr.wroc.pl/pl/dydaktyka/budowa-zwiazkow-wielkoczasteczkowych>, zasoby z dnia 20.01.2021
- [15] <https://kompozyty.ptmk.net>, zasoby z dnia 20.01.2021
- [16] <https://www.pnc.pl/natryskiwanie-cieplne/natryskiwanie-plazmowe.html>, zasoby z dnia 20.01.2021
- [17] Wiórko K., *Wpływ wygrzewania w zakresie 200°C–400°C na właściwości elektryczne nanokompozytów  $(\text{FeCoZr})_x(\text{SiO}_2)_{(100-x)}$  o małej zawartości fazy metalicznej wytworzonych w atmosferze argonu z niską zawartością tlenu*, praca inżynierska, Politechnika Lubelska, 2020.

## **WYKORZYSTANIE PLATFORMY ARDUINO DO ZARZĄDZANIA INSTALACJĄ BUDYNKOWĄ**

### **WSTĘP**

W dzisiejszych czasach ludzie coraz większą uwagę przywiązują do komfortu i wygody w życiu codziennym. Zastosowanie mikrokontrolerów oraz platformy Arduino pozwala na stworzenie nieograniczonej liczby układów, które pomogą w monitorowaniu i zarządzaniu instalacją budynkową, tworząc tak zwany inteligentny budynek [1].

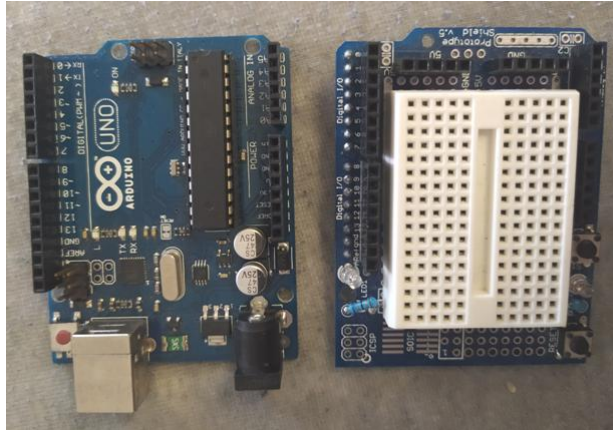
Inteligentny budynek nie tylko poprawia komfort życia, ale dzięki wykorzystaniu wielu czujników pozwala redukować koszty utrzymania budynku. W budynkach komercyjnych inteligentna instalacja pozwala na sterowanie i monitorowanie klimatyzacją, oświetleniem, ogrzewaniem, alarmem, roletami czy kontrolą dostępu. Rozwój technologii powoduje, że stworzenie inteligentnej instalacji jest coraz tańsze, a sama instalacja jest podatna na łatwą rozbudowę w każdym momencie i daje niezawodne działanie całego systemu.

### **CZYM JEST ARDUINO**

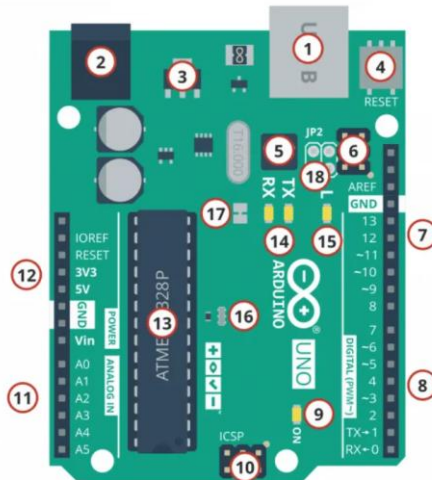
Arduino jest to gotowy zestaw, który pracuje na bazie mikrokontrolera z rodziny AVR. Łączy ze sobą mikrokontroler i programator oraz posiada dedykowany kompilator, dodatkowo Arduino posiada wiele gotowych elementów, układów, płytek rozszerzających pozwalających na szybką rozbudowę projektów [2]. Arduino programuje się w dedykowanym języku programowania, które bazuje na języku C, jednak jest dużo prostsze z uwagi na to, że posiada wiele bibliotek i nie trzeba dobrze znać rejestrów mikrokontrolera [2].

---

<sup>1</sup> Politechnika Lubelska, WEiI, jaskowski.piotr@pollub.edu.pl



Rys. 1. Arduino UNO R3 (po lewej) z płytką umożliwiającą zbudowanie małego projektu wkładana na Arduino (po prawej)




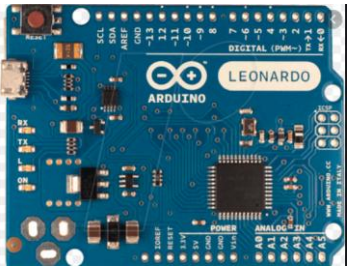

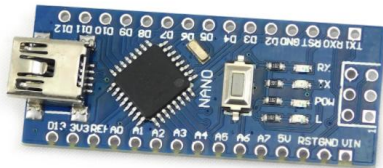
1. Złącze USB
2. Złącze zasilania (optymalnie 7V - 12V)
3. Stabilizator napięcia - napięcie wejściowe ze złącza zasilania obniżane jest do 5V
4. Przycisk resetu - resetuje płytkę Arduino
5. Mikrokontroler odpowiedzialny za komunikację z komputerem przez USB
6. Złącze programowania do mikrokontrolera z punktu 5.
7. Złącze sygnałowe
8. Złącze sygnałowe
9. Dioda LED sygnalizująca podłączenie napięcia do Arduino
10. Wyjście programatora dla mikrokontrolera z punktu 13.
11. Złącze sygnałowe
12. Złącze zasilania
13. Główny mikrokontroler AVR ATmega328
14. Diody LED sygnalizujące transmisję do/z komputera
15. Dioda LED do dyspozycji użytkownika
16. Rezonator ceramiczny taktujący mikrokontroler z częstotliwością 16MHz
17. Zworka, której przecięcie wyłącza automatyczne resetowanie Arduino.
18. Pola lutownicze z wyprowadzonymi sygnałami mikrokontrolera z punktu 5, używane ekstremalnie rzadko w bardzo specyficznych i niestandardowych sytuacjach.

Rys. 2. Najważniejsze elementy wykorzystane do Arduino Uno R3 [2]

Procesor wykorzystany w Arduino Uno R3 jest 8-bitowy mikrokontroler Atmel, AVR Atmega328, która pracuje z częstotliwością do 16 MHz. Arduino Uno posiada 14 cyfrowych wejść/wyjść, 6 z nich można użyć jako wyjście PWM wykorzystywane do sterowania serwomechanizmami oraz 6 wejść analogowych. Dzięki nim można poprzez czujniki odczytywać pewne wartości i przekształcić na sygnał cyfrowy, który może już być interpretowany przez mikrokontroler (np. temperatura, wilgotność) [2, 6]

Produkty Arduino można podzielić na 4 główne modele, które zestawiono opisowo w poniższej tabeli.

Tab. 1. Podział modeli Arduino (źródło: opracowanie własne przy wykorzystaniu [4])

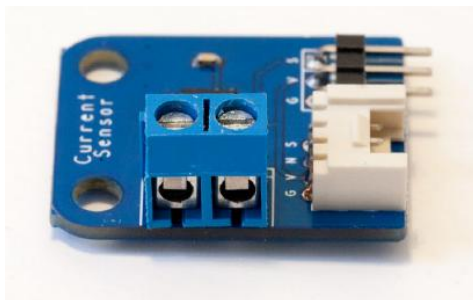
Lp	Nazwa	Rysunek	Opis
1	Arduino Uno		Model podstawowy
2	Arduino Leonardo		Model z dodatkowym oprogramowaniem umożliwiającą dodatkową komunikację przez USB
3	Arduino Mega		Model z dodatkową pamięcią i większą liczbą wejść/wyjść
4	Arduino Nano		Model o mniejszych wymiarach, mniej pamięci i wejść/wyjść

## CHMUROWY MONITORING ZUŻYCIA ENERGII

Projekt ma za zadanie badać ile dane urządzenie pobiera energii elektrycznej. Dane będą wysyłane do chmury obliczeniowej za pomocą chipu Wi-Fi. Informacje przesyłane będą do serwisu ThingSpeak co umożliwi zdalne monitorowanie poboru energii podłączonego odbiornika [5].

### SPRZĘT I OPROGRAMOWANIE WYKORZYSTANE DO PROJEKTU

Niezbędne elementy do zbudowania układu to moduł Arduino Uno, chip Wi-Fi CC3000 a także czujnik prądu. W projekcie będzie wykorzystany czujnik analogowy który zawiera układ scalony ACS712. Czujnik analogowy zwraca na pinie napięcie proporcjonalne do mierzonego prądu [5].



Rys. 3. Czujnik prądu z układem scalonym ACS 712 [5]

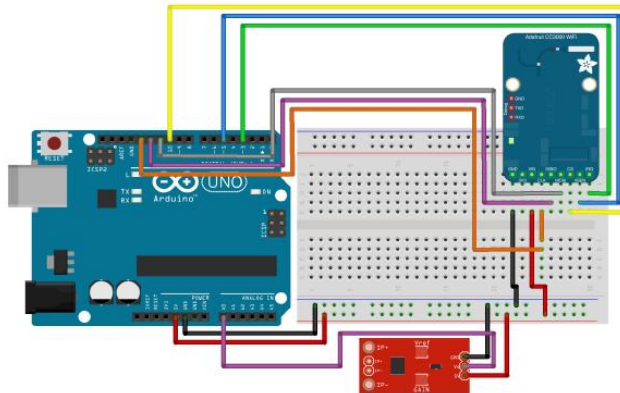
Czujnik posiada wyprowadzenia G, V, S które odpowiednio oznaczają masę, zasilanie i sygnał. Właśnie na pinie S pojawia się sygnał który jest proporcjonalny do natężenia mierzonego prądu. Można wykorzystać moduły różnych firm ważne aby był zasilany ze źródła o napięciu 5 V (zasilanie Arduino) ze względu na zgodność napięcia jakie zasilane są oba urządzenia. Do projektu będzie trzeba jeszcze użyć gniazdka i wtyczki do którego podłączone będzie urządzenie pomiarowe i urządzenie mierzone [5].

### ŁĄCZENIE PODZESPOŁÓW

Do zbudowania całego układu musimy podłączyć 4 podzespoły. Na początku płytkę Arduino łączymy z chipem Wi-Fi i układem do pomiaru prądu. A układ do pomiaru prądu należy podłączyć z gniazdkiem i wtyczką.

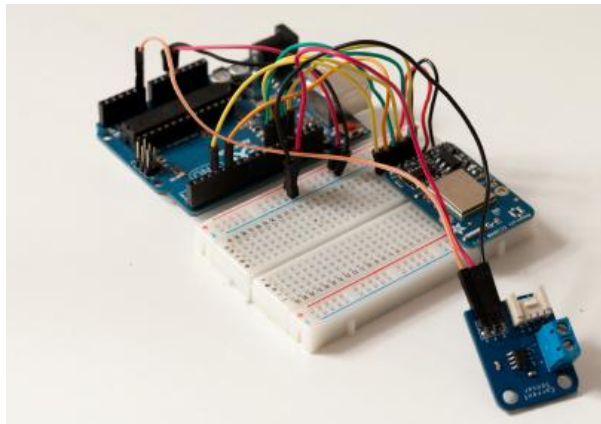


Podłączenie chipu Wi-Fi posiada sporo wyprowadzeń, dlatego trzeba podłączyć dokładnie ze schematem, jakaś pomyłka w najlepszym przypadku może doprowadzić do niezadziałania całego projektu, a w najgorszym uszkodzenie któregoś z podzespołów [5].



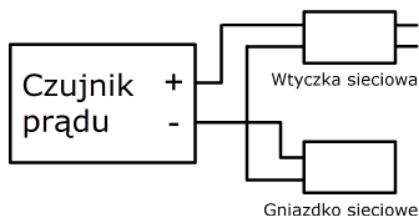
Rys. 4. Schemat podłączenia układu [5]

Podłączenie czujnika prądu jest prostsze ponieważ moduł posiada tylko 3 wyprowadzenia, pin V łączymy z zasilaniem na Arduino, G z masą, natomiast S podłączamy do wejścia analogowego A0.



Rys. 5. Wygląd podłączonego układu

Pozostało jeszcze podłączenie czujnika prądu z przewodami z wtyczką i gniazdkiem. Jak widać na schemacie niżej należy jedne żyły połączyć ze sobą a dwie wolne wpiąć do modułu [5].



Rys. 6. Schemat połączonego układu [5]

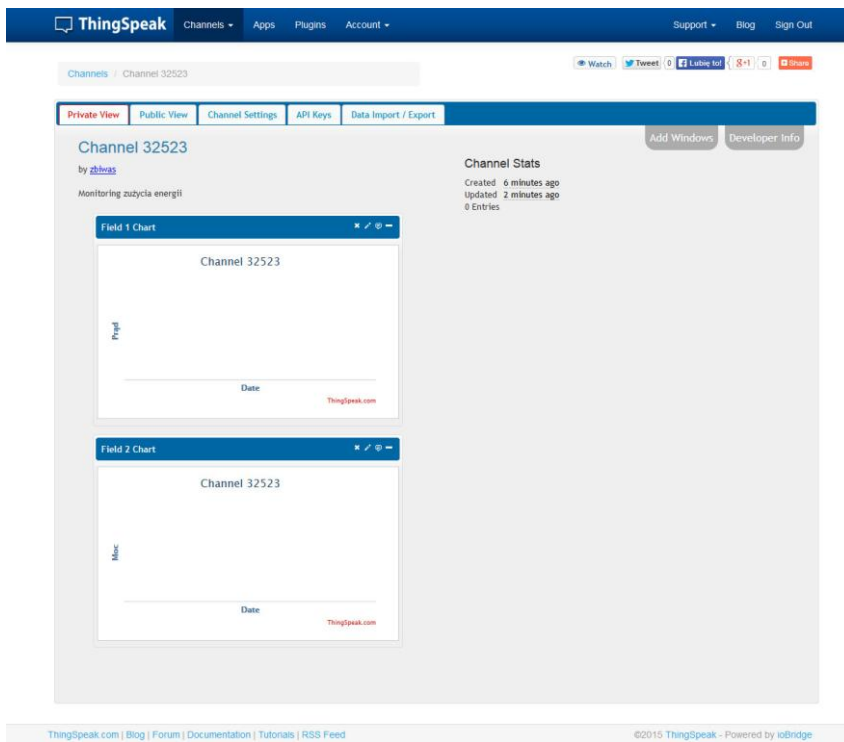
## TESTOWANIE UKŁADU

Aby sprawdzić, czy układ działa prawidłowo, trzeba przetestować jego działanie jeszcze przed połączeniem się z chmurą dlatego na początku należy napisać program, który pozwoli na odczyt.

Najpierw w programie podajemy, do którego pinu podłączony jest czujnik pomiarowy. Następnie w programie należy zadeklarować zmienne, które będą zachowywać wartości prądu, napięcia i mocy. Z uwagi ze napięcia nie będziemy mierzyć na bieżąco, dlatego należy zadeklarować takie jakie obowiązuje, czyli 230 V. Następnym krokiem jest konfiguracja czujnika, trzeba to zrobić z uwagi na to, że czujnik jest analogowy i może wydawać pewny sygnał, nawet jeżeli nie będzie przepływał przez niego prąd. Aby zwiększyć dokładność pomiaru należy robić wiele odczytów i uśredniać je. Dlatego w programie napisano procedurę, która wysyła odczyt z grup liczących kilkuset pomiarów. Pobrane pomiary są jako amplituda, dlatego trzeba przeliczyć daną wartość na wartość skuteczną. I na koniec, aby zobaczyć wyniki pomiarów, wysyłano dane do monitora portu szeregowego. Jako wyniki w monitorze można zobaczyć takie dane (w stanie spoczynku oraz po podłączeniu obciążenia) [5].

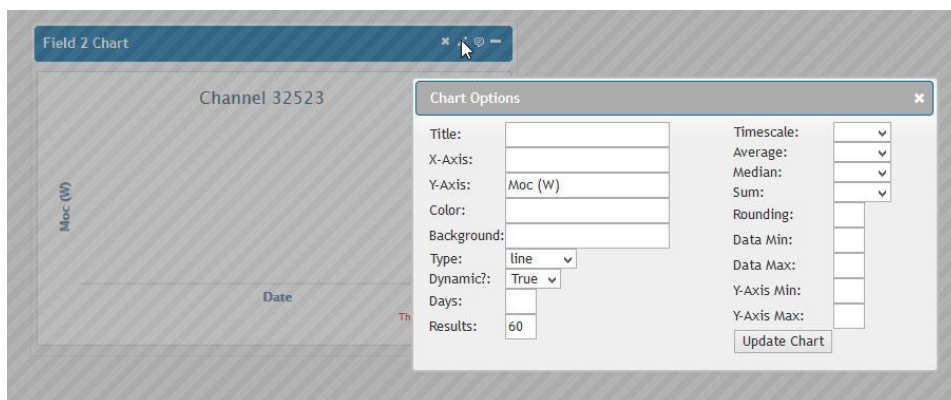
## KONFIGUROWANIE KONTA W SERWISIE THINGSPEAK

Po zalogowaniu się na konto ThingSpeak należy stworzyć nowy kanał, następnie w danym kanale dodać pola, które jedno zdefiniowane będzie jako prąd, a drugie jako moc. Po wprowadzeniu danych kanał powinien wyglądać tak:



Rys. 7. Wygląd podłączonego układu [5]

Aby do wykresu dodać różne parametry, np. nazwę wykresu czy jednostki trzeba kliknąć „ołówek”, wprowadzić parametry i potwierdzić je, klikając przycisk *Update Chart* [5].



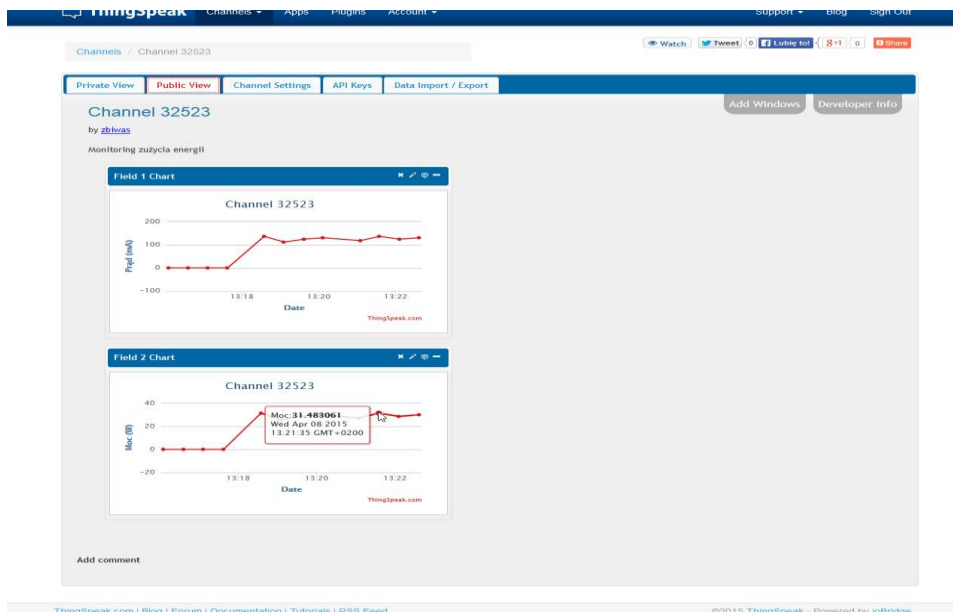
Rys. 8. Definiowanie podłączonego układu [5]

## WYSYLANIE DANYCH DO THINGSPEAK

Wcześniej napisany program, który poprzednio wykorzystano do testowania układu, został zmodyfikowany, dodano bibliotekę do chipu CC3000 i zdefiniowano jego piny. Stworzono instalację chipu i zdefiniowano konfiguracje Wi-Fi czyli wpisano SSID oraz podano hasło. Do odpowiedniego zadziałania programu dodano jeszcze kilka funkcji:

- połączenie z siecią Wi-Fi
- przekonwertowanie odczytanego pomiaru, tak aby można go było wysłać do serwisu ThingSpeak
- nawiązanie próby połączenia się z serwisem
- jeśli się ono powiedzie dochodzi do transmisji danych
- natomiast jeżeli nie uda się połączyć z serwerem wykonywany jest kolejny pomiar, po 10 nieudanych próbach połączenia się z serwerem wymuszane jest połączenie programu od początku.

Po zakończeniu pisania programu i załadowaniu go w monitorze portu szeregowego pokaże się informacja, czy dane do serwisu zostały wysłane. W samym serwisie na wcześniej skonfigurowanym kanale pojawią się dane na wykresach, co prezentuje rysunek 9 [5].



Rys. 9. Dane skonfigurowanego układu [5]

## PODSUMOWANIE

W projekcie został zbudowany układ do pomiaru prądu zużywającego przez podłączony odbiornik, platforma Arduino wykorzystana przy budowie pozwala na łatwy pomiar prądu pobieranego przez odbiornik i wysłanie danych do wirtualnej chmury, gdzie w każdym dowolnym momencie i z dowolnego miejsca możemy monitorować zużycie energii elektrycznej.

Wiele firm produkuje gotowe zestawy, moduły do szybkiego i prostego zbudowania jakiegoś urządzenia (moduły Wi-Fi, bluetooth, GSM, czujniki odległości, podczerwieni i wiele innych). Dzięki nim można zbudować nieograniczoną liczbę urządzeń, od prostego sterowania oświetleniem, po zaawansowane systemy dozoru, wszystko ograniczone jest tylko wyobraźnią użytkownika. Samodzielne zbudowanie inteligentnego systemu na platformie Arduino pozwala na dobranie odpowiednich funkcji według potrzeb, a wykonany system umożliwia oszczędniejsze użytkowanie domu i poprawia komfort życia.

## LITERATURA

- [1] Kanaszewski M., *Stanowisko demonstracyjne automatyki budynkowej z zastosowaniem modułów Wi-Fi* Praca inżynierska, Lublin 2020
- [2] <https://forbot.pl/blog/kurs-arduino-podstawy-programowania-spis-tresci-kursu-id5290>, zasoby z dnia 07.01.2020
- [3] Konior M., *Inteligentny znak informacyjny ze zmienną treścią sterowany mikrokontrolerem Arduino*, Praca inżynierska, Sosnowiec 2014
- [4] Ogorzałek M., *Projekt zabawki edukacyjnej dla dziecka*, Praca magisterska, Warszawa 2014
- [5] Shwartz M., *Arduino. Automatyka domowa dla każdego*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2015
- [6] <https://botland.com.pl/arduino-moduly-glowne/1060-arduino-uno-rev3-a000066-8058333490090.html>, zasoby z dnia 07.01.2020.