

# WYBRANE PRZYKŁADY UŻYCIA MIKROKONTROLERA STM32 W PROTOTYPOWYM SYSTEMIE STEROWANIA PNEUMATYCZNO-HYDRAULICZNĄ JEDNOSTKĄ NAPĘDOWĄ

*W artykule omówiono pneumatyczno-hydrauliczną jednostkę napędową oraz problemy związane ze sterowaniem tego typu jednostką. Opisano praktyczny sposób wykorzystania mikrokontrolera ARM w układach prototypowych systemu sterowania. Przeanalizowano dostępną dokumentację oraz literaturę pod względem zagadnień związanych ze sterowaniem zaworami oraz obsługą wybranych sensorów.*

## WSTĘP

Na podstawie prac Shawa [1], oraz w wyniku inspiracji pracami Pawelskiego [2], a także opierając się wcześniej pracami autorskimi [3,4,5], opracowano pneumatyczno-hydrauliczną jednostkę napędową, której schemat przedstawiono na rysunku 1.

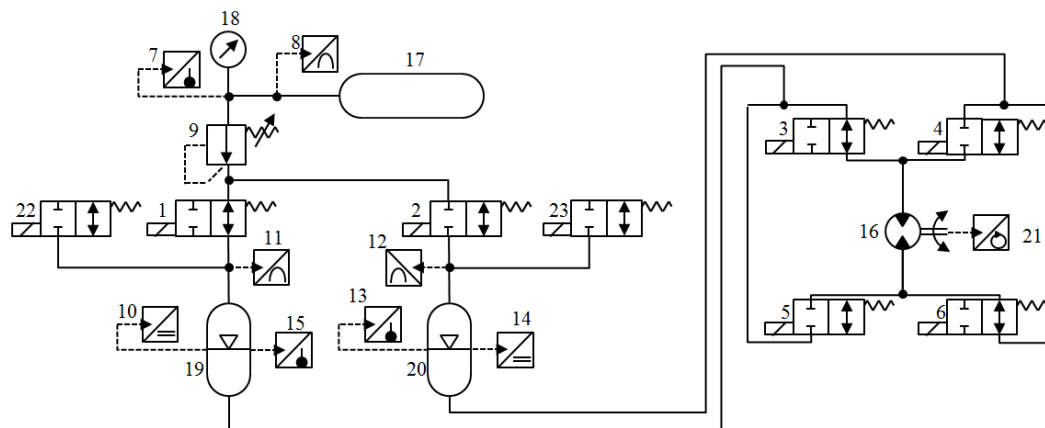
W pneumatyczno-hydraulicznej jednostce napędowej, energia sprężonego gazu (np. azotu technicznego) zamieniana jest na moment napędowy. Jednostka napędowa wykorzystuje zmodyfikowaną formę akumulatorów pneumatyczno-hydraulicznych, gdzie sprężony gaz cyklicznie przepompowuje ciecz hydrauliczną z jednego akumulatora do drugiego. Praca silnika hydraulicznego sterowana jest przez zawory hydrauliczne. Ich specjalne zestawienie i odpowiednie załączanie umożliwia utrzymanie zadanego kierunku obrotu silnika, niezależnie od kierunku przepływu cieczy hydraulicznej.

Opracowana jednostka napędowa została zainstalowana w pojeździe typu ATV, którego najważniejsze parametry przed i po modyfikacji zostały zestawione w tabeli 1.

**Tab. 1.** Właściwości pojazdu z napędem pneumatyczno-hydraulicznym

Parametr	Wartość
<b>Przed modyfikacją</b>	
DMC	360 kg
Pojemność skokowa	149 cm <sup>3</sup>
Moc maksymalna	7,1 kW (przy 7000 obr./min.)
Moment obrotowy maksymalny	10 Nm (6000 obr./min.)
Rodzaj przekładni dla silnika spalinowego	CVT
Prędkość maks. silnika spalinowego	65 km/h
<b>Po modyfikacji</b>	
Objętość gazu w zbiorniku	44 000 cm <sup>3</sup> (przy 30 MPa ~300 bar)
Rodzaj gazu	Azot techniczny
Pojemność akumulatorów pneumatyczno-hydraulicznych	1 600 cm <sup>3</sup>
Moment obrotowy maks. silnika hydraulicznego	41 Nm (przy 15 MPa ~150 bar)
Rodzaj przekładni dla silnika hydraulicznego	2-stopniowa
Prędkość maksymalna silnika hydraulicznego	45 km/h
Zmierzony opór toczenia	50 – 180 N

Źródło: oprac. własne.

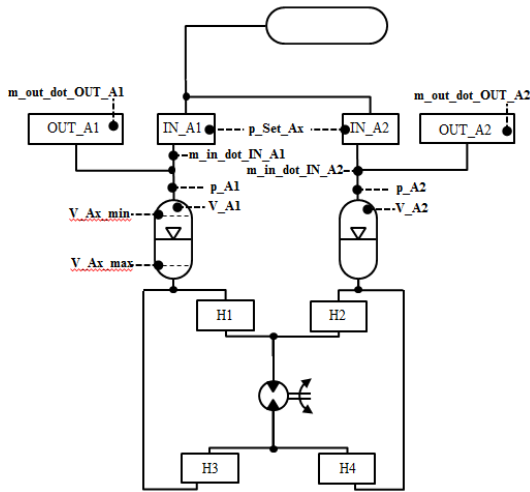


**Rys. 1.** Pneumatyczno-hydrauliczna jednostka napędowa, gdzie: 1,2 – zawory pneumatyczne, 3,4,5,6 – zawory hydrauliczne, 8,11,12 – czujniki ciśnienia, 7,13,15 – czujniki temperatury, 10,14 – ultradźwiękowa czujniki poziomu oleju, 21 – czujnik prędkości obrotowej, 9 – reduktor ciśnienia, 17 – zbiornik główny gazu, 19,20 - akumulatory pneumatyczno-hydrauliczne, 16 – silnik hydrauliczny  
Źródło: oprac. własne.

## 1. BADANIA SYMULACYJNE

### 1.1. Model symulacyjny

Dla opracowanej jednostki napędowej, przygotowano, w programie MatLAB Simulink, model symulacyjny, którego schemat i oznaczenia przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Schemat modelu symulacyjnego pneumatyczno-hydraulicznej jednostki napędowej,

gdzie:  $m_{in\_dot\_IN\_A1}$  – przepływ masy gazu przez zawór napelniający IN\_A1,  $m_{in\_dot\_IN\_A2}$  – przepływ masy gazu przez zawór napelniający IN\_A2,  $m_{out\_dot\_OUT\_A1}$  – przepływ masy gazu przez zawór upustowy OUT\_A1,  $m_{out\_dot\_OUT\_A2}$  – przepływ masy gazu przez zawór upustowy OUT\_A2,  $V_{Ax\_min}$  – minimalna objętość gazu w akumulatorze pneumatyczno-hydraulicznym,  $V_{Ax\_max}$  – maksymalna objętość gazu w akumulatorze,  $V_{A1}$  – objętość gazu w akumulatorze A1,  $V_{A2}$  – objętość gazu w akumulatorze A2,  $p_{Set\_Ax}$  – wartość zadana ciśnienia gazu w akumulatorach,  $p_{A1}$  – ciśnienie gazu w akumulatorze A1,  $p_{A2}$  – ciśnienie gazu w akumulatorze A2, H1, H2, H3, H4 – zawory hydrauliczne  
 Źródło: oprac. własne.

W modelu, przepływ masy gazu (1)[6] i cieczy hydraulicznej (2)[6] obliczany jest z poniższych wzorów.

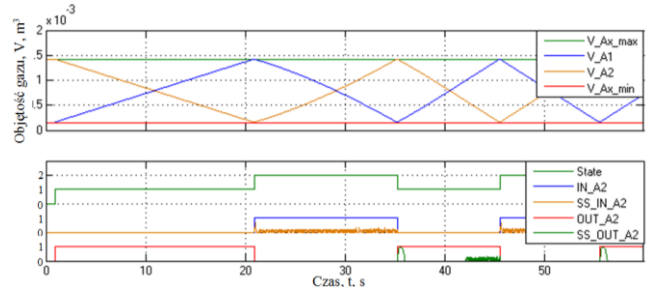
$$\dot{m}_{PV} = \begin{cases} \frac{K_v \cdot 519}{\sqrt{T_1}}, \text{ kg/h, for } \left( p_2 > \frac{p_1}{2} \right) \\ \frac{K_v \cdot 259,5 \cdot p_1}{\sqrt{T_1} \cdot \sqrt{\rho_G}}, \text{ kg/h, for } \left( p_2 < \frac{p_1}{2} \right) \end{cases} \quad (1)[6]$$

$$\dot{m}_{HV} = K_v \sqrt{1000 \cdot \rho_G \cdot \Delta p} \quad (2)[6]$$

gdzie:  $\dot{m}_{PV}$  - przepływ masowy przez zawór pneumatyczny,  $\dot{m}_{HV}$  - przepływ masowy przez zawór hydrauliczny,  $K_v$  – współczynnik przepływu,  $T_1$  – temperatura gazu wyprowadzanego,  $\rho_G$  – gęstość gazu,  $\Delta p$  – różnica ciśnień,  $p_2$  – ciśnienie gazu wyprowadzanego,  $p_1$  – ciśnienie gazu doprowadzanego.

### 1.2. Wyniki symulacji

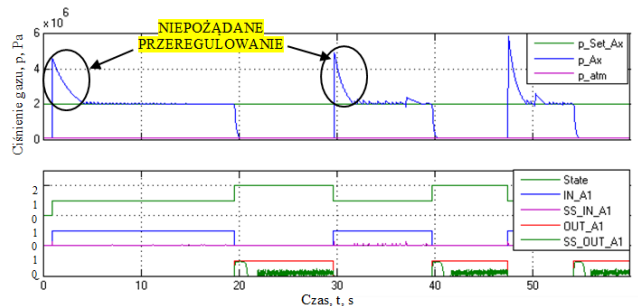
Na rysunku 3 przedstawiono zmianę objętości gazu w akumulatorach 1 i 2. Kształt wykresu wskazuje na skuteczność działania symulowanej strategii sterowania opracowanej pneumatyczno-hydraulicznej jednostki napędowej, Natomiast wzrost w czasie częstotliwości zmian stanów sygnałów sterujących o rozpędzeniu się silnika hydraulicznego.



**Rys. 3.** Zmiana objętości gazu w pneumatyczno-hydraulicznych akumulatorach 1 i 2,

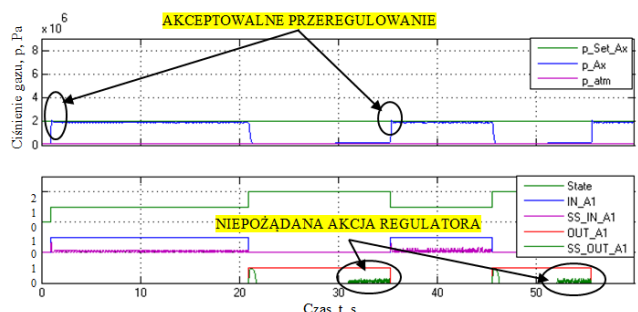
gdzie: State – stan przełączenia kierunku przepływu cieczy hydraulicznej, IN\_A2 – wymuszenie pracy zaworu napelniającego, SS\_IN\_A2 – odpowiedź regulatora ciśnienia dla akumulatora A2, OUT\_A2 – wymuszenie pracy zaworu opróżniającego, SS\_OUT\_A2 – odpowiedź regulatora ciśnienia dla akumulatora A2  
 Źródło: oprac. własne.

Na rysunku 4 widoczne są tzw. niepożądane przeregulowania ciśnienia. Może to świadczyć o tym, że zawory w warunkach rzeczywistych będą pracować zbyt wolno dla wybranej struktury regulatora ciśnienia.



**Rys. 4.** Zmiana ciśnienia gazu w akumulatorze 1 (bez reduktora)  
 Źródło: oprac. własne.

Natomiast rysunek 5 pokazuje efekt możliwej niwelacji niepożądanych przeregulowań poprzez wykorzystanie reduktora ciśnienia gazu.



**Rys. 5.** Zmiana ciśnienia gazu w akumulatorze 1 (z reduktorem)

## 2. UKŁAD STEROWANIA

Wyniki symulacji ujawniły problemy związane ze sterowaniem opracowaną pneumatyczno-hydrauliczną jednostką napędową, a do najważniejszych z nich należy przeregulowanie wartości ciśnienia gazu w akumulatorach oraz niezerowy czas otwarcia/zamknięcia zaworów pneumatycznych i hydraulicznych.

W celu weryfikacji strategii sterowania (opracowanej z wykorzystaniem modelu symulacyjnego) postanowiono wykorzystać tzw. prototypowe układy sterowania, które w założeniu mają ułatwić opracowanie finalnej strategii sterowania oraz umożliwić porównanie danych z symulacji z danymi otrzymanymi w eksperymencie.

Do wszystkich testowych układów pomiarowych i sterujących, wykorzystano płytkę rozwojową Nucleo z mikrokontrolerem STM32F303RE.

### 2.1. Układ do testowania elektrozaworów

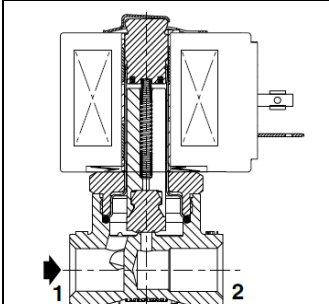
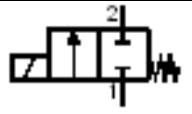
W układzie do testowania elektrozaworów pneumatycznych (rys. 6) oraz hydraulicznych w opracowanej jednostce napędowej wykorzystano układ tranzystorów IRFZ44N typu MOSFET z kanałem N [7]. Tranzystor dodatkowo zabezpieczony jest diodą prostowniczą, co dodatkowo zabezpiecza go przed napięciem wtórnym z cewki i nadmiernym przegrzaniem. Z charakterystyki dobrego tranzystora wynika, że aby „otworzyć” bramkę tranzystora należy ją zasilić minimalnie napięciem 4,5 V, co pozwala na przepuszczenie w tych warunkach, pomiędzy emiterem i kolektorem, prądu 10 A [7]. Stan wysoki układu logicznego mikrokontrolera wynosi maksymalnie 3,3 V, co sugeruje potrzebę wykorzystania np. transoptora i zasilania zewnętrznego (4,5 V) do sterowania tranzystorem.

Sekwencja otwierania/zamykania zaworów pneumatycznych i hydraulicznych jest realizowana przez wspomniany wcześniej mikrokontroler STM32.

#### Elektrozawór pneumatyczny

Dobry elektrozawór pneumatyczny jest zaworem dwustanowym normalnie zamkniętym, co znaczy, że podając na cewkę prąd, elektrozawór otwiera się, a w innym wypadku sprężyna dociska element grzybkowy i tym samym zamyka zawór. Pobór mocy przez cewkę wynosi ok. 11 W przy napięciu 24 V DC, co jest kluczowe dla doboru tranzystora sterującego pracą cewki. Najważniejsze parametry zaworu zestawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Parametry elektrozaworu ASCO E262K200S1W00FL [8]

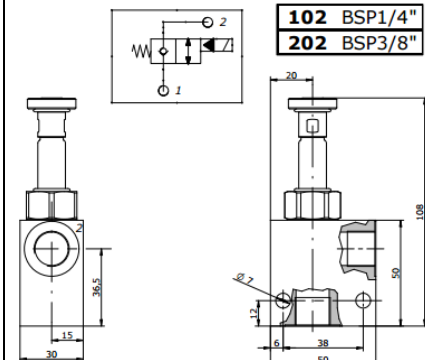
	
	Medium: powietrze, olej, gaz, woda Średnica przyłącza: 1/4" Średnica zwężenia: 1,2 mm Współczynnik przepływu Kv: 0,05 m³/h Zakres ciśnień: - 6,8 MPa (przy zasilaniu 24V AC), - 10,3 MPa (przy zasilaniu 24V DC),

Źródło: Dokumentacja ASCO.

#### Elektrozawór hydrauliczny

Dobry elektrozawór hydrauliczny również jest zaworem dwustanowym, ale normalnie otwartym. Analogicznie jak w przypadku dobrego zaworu pneumatycznego – zasilenie cewki zamyka zawór, brak zasilania – sprężyna otwiera zawór. Pobór mocy przez cewkę, w tym przypadku, jest podobny, więc możliwe jest zastosowanie tego samego typu tranzystora. Najważniejsze parametry elektrozaworu zestawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Parametry elektrozaworu OLEODINAMICA SVCP-S08-TS3-N-1-D24-D-A202 [9]

	Ciśnienie maks.: 35 MPa
	Przepływ nominalny: 2,4 m³/h (40 L/min.)
	Zakres temperatury pracy: -30 ÷ 110 °C
	Wewnętrzne przecieki: 5 cm³/min. (przy 35 MPa)

Źródło: Dokumentacja OLEODINAMICA.

#### Konfiguracja wybranego portu GPIO

Dobre zawory są zaworami dwustanowymi, co znaczy, że aby móc sterować ich pracą, w najprostszym przypadku, wystarczy sterować bramką tranzystora dwustanowo i tym samym zasilać uzwojenie cewki elektrozaworu.

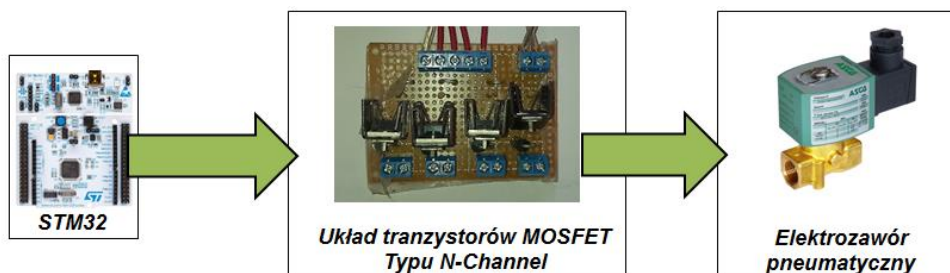
Konfiguracja portów GPIO (ang. General Purpose Input/Output) mikrokontrolera sprowadza się do udostępnienia sygnału zegarowego dla wybranego portu oraz zainicjowania wybranych wyprowadzeń jako wyjścia typu Push-Pull.

#### Algorytm testowego sterowania zaworami

Do sterowania elektrozaworami wystarczy w ustalonej sekwencji włączać i wyłączać zasilanie cewek z eksperymentalnie (bazując na danych z symulacji) dobranymi czasami trwania stanów wysokich i niskich..

Sterowanie przebiega wg określonego algorytmu, przedstawionego poniżej.

1. Inicjacja konfiguracji ustawienia systemu.
2. Inicjacja konfiguracji GPIO.
3. Ustawienie stanu wysokiego dla wybranych zaworów pneumatycznych.
4. Ustawienie stanu niskiego dla wybranych zaworów hydraulicznych.
5. Odczekanie zdanego czasu.
6. Ustawienie stanu wysokiego dla wybranych zaworów pneumatycznych.
7. Ustawienie stanu niskiego dla wybranych zaworów hydraulicznych.



Rys. 6. Układ do testowania elektrozaworów. Źródło: oprac. własne.

nych.

8. Odczekanie zdanego czasu.
9. Powtórzenie sekwencji od punktu 3.

## 2.2. Układ do pomiaru prędkości obrotowej

W układzie do pomiaru prędkości obrotowej (rys. 7) wykorzystano układ scalony firmy Texas Instruments SN75175, a jako czujnik prędkości obrotowej, dobrano enkoder firmy Kübler model KIH40.

Podczas testu dane wyświetlane są na wyświetlaczu LCD.

### Czujnik prędkości obrotowej

Enkoder Kübler model KIH40 to optyczny enkoder inkrementalny o rozdzielczości pomiarowej 1024 imp./obr. Jego najważniejsze parametry zestawiono w tabeli 4.

**Tab. 4. Właściwości enkodera Kübler - KIH40 [10]**

Parametr	Wartość
<b>Właściwości mechaniczne</b>	
Maksymalna prędkość obrotowa	4500 obr./min.
Moment bezwładności	$0,2 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
Waga	0,17 kg
Stopień ochrony	IP64
Temperatura pracy	$-20 \text{ }^\circ\text{C} \div +70 \text{ }^\circ\text{C}$
<b>Właściwości elektryczne (RS422)</b>	
Napięcie zasilania	5V DC ( $\pm 5 \%$ )
Pobór prądu	typ. 40 mA, maks. 90 mA
Dopuszczalne obciążenie	maks. $\pm 20 \text{ mA}$
Częstotliwość taktowania	maks. 250 kHz
Poziom sygnału	stan wysoki: min. 2,5 V stan niski: min. 0,5 V

Źródło: Dokumentacja Kuebler.

### Odbiornik linii R-422

Układ scalony firmy Texas Instruments model SN75175 jest początkowym odbiornikiem linii pracujący w standardzie protokołu RS422, a jego najważniejsze parametry zestawiono w tabeli 5.

**Tab. 5. Właściwości układu Texas Instruments - SN75175 [11]**

Parametr	Wartość
Napięcie zasilania	5 V
Napięcie sygnału wejściowego	$\pm 25 \text{ V}$
Pobór prądu	50 mA
Temperatura pracy	SN65175: $-40 \text{ }^\circ\text{C} \div +85 \text{ }^\circ\text{C}$ SN75175: $0 \text{ }^\circ\text{C} \div +70 \text{ }^\circ\text{C}$

Źródło: Dokumentacja Texas Instruments.

### Konfiguracja wybranego timera (wybranej struktury licznika)

Mikrokontroler STM32 jest wyposażony w sprzętowe liczniki (timery), które są przystosowane m.in. do pracy z enkoderami. Aby je wykorzystać do pomiaru prędkości obrotowej, należy skonfigurować wybrany timer do pracy w tzw. trybie enkoderowym [12].

W pierwszej kolejności należy udostępnić sygnał zegarowy dla wybranego timera oraz portu GPIO, które obsługują wymagane wyprowadzenia mikrokontrolera. Do nich zostaną podłączone linie A i B enkodera. Następnie należy skonfigurować wyprowadzenia wybranego portu GPIO do obsługi funkcji alternatywnych, jakim jest tryb enkoderowy wybranego timera. Jeśli jest to wymagane, należy włączyć wewnętrzne rezystory podciągające do źródła zasilania (pull-up).

Timery są wyposażone w od 1 do 4 kanałów, którymi są sprzężone z dedykowanymi wyprowadzeniami mikrokontrolera. Dzięki kanałom, możliwe jest taktowanie timera zewnętrznym sygnałem, w tym przypadku wybranym sygnałem z linii enkodera. Zatem należy skonfigurować dwa kanały (jeden dla linii A i drugi dla linii B) timera do zliczania zboczy narastających i opadających sygnału z linii odpowiednio A i B enkodera, co umożliwi uzyskanie maksymalnej rozdzielczości pomiaru. Rozdzielczość pomiarowa wybranego enkodera to 1024 imp./obr. Konfigurując timer w sposób jak wspomniano wyżej, możliwe jest uzyskanie rozdzielczości pomiarowej nawet 4096 imp./obr. Założono, że ten poziom rozdzielczości pomiarowej, umożliwi obserwację nierównomiernej pracy silnika hydraulicznego (jeśli taka wystąpi) oraz jego przyspieszeń i opóźnień.

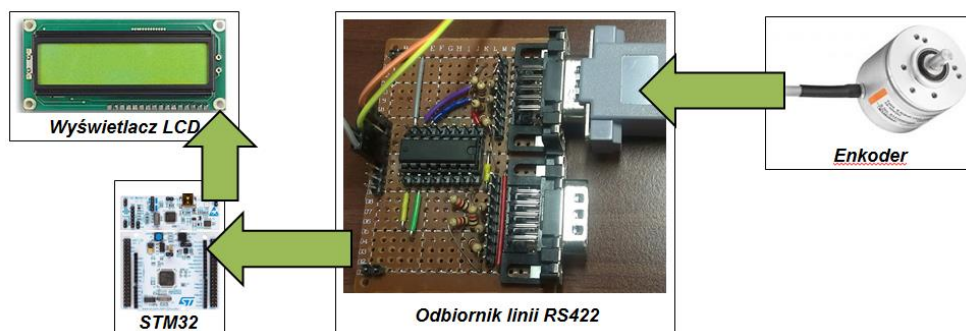
### Algorytm pomiaru prędkości obrotowej

Do pomiaru wykorzystano inny timer niż ten do obsługi enkodera, który w zadanym czasie generuje przerwanie zegarowe. To przerwanie wywoływane jest regularnie i stanowi podstawę czasu do pomiaru prędkości obrotowej. Podczas tego przerwania odczytywany jest rejestr timera zliczającego zbocza narastające i opadające obu sygnałów enkodera. Pomiar przebiega wg określonego algorytmu, przedstawionego poniżej.

1. Inicjacja konfiguracji systemu.
2. Inicjacja konfiguracji timera 3 obsługującego sygnał enkodera.
3. Inicjacja konfiguracji timera 6 generującego przerwanie zegarowe (co 10 ms).
4. Inicjacja konfiguracji wyświetlacza.
5. Oczekiwanie na przerwanie timera 6.
6. Odczytanie i zapisanie do pamięci wartość rejestru timera 3.
7. Powtórzenie punktów 5 i 6.
8. Porównanie i zapisanie wartości.
9. Obliczenie wartości prędkości obrotowej.
10. Wyświetlenie wartości na LCD.
11. Powtórzenie sekwencji od punktu 5.

### 2.3. Układ do pomiaru ciśnienia

W układzie do pomiaru ciśnienia (rys. 8) wykorzystano czujniki firmy IFM model PA9022 oraz zestaw dzielników napięcia, umożliwiając tym obniżenie napięcia sygnału z czujnika do poziomu napięcia akceptowalnego przez układ logiczny mikrokontrolera. Podczas testu dane wyświetlane są na wyświetlaczu LCD.



**Rys. 7** Układ do testowania enkodera inkrementalnego Kübler - KIH40

Źródło: oprac. własne.

## Czujniki ciśnienia

Czujnik ciśnienia IFM model PA9022 znajduje zastosowanie do pomiaru ciśnienia cieczy i gazów, a jego najważniejsze parametry zestawiono w tabeli 6.

**Tab. 6. Właściwości czujnik ciśnienia IFM model PA9022 [13]**

Parametr	Wartość
<b>Właściwości mechaniczne</b>	
Zakres pomiarowy	0 ÷ 100 bar
Przebieżalność	300 bar
Ciśnienie niszczące	650 bar
Temperatura medium	-25 °C ÷ 90 °C
Temperatura otoczenia	-25 °C ÷ 80 °C
Stopień ochrony	IP 68 / IP 69K
<b>Właściwości elektryczne</b>	
Napięcie zasilania	16 ÷ 32 V DC
Napięcie wyjścia	0 ÷ 10 V DC
Pobór prądu	< 18 mA
Obciążenie	min. 2000 W

Źródło: Dokumentacja IFM.

Napięcie wyjściowe z czujnika ciśnienia wynosi 0 ÷ 10 V. Jest to zbyt wysokie napięcie dla wybranego mikrokontrolera, dla którego napięcie dopuszczalne to 3,3 V. Aby pomiar mógł być możliwy, należy proporcjonalnie do ciśnienia obniżyć napięcie z czujnika do poziomu bezpiecznego dla mikrokontrolera. Do tego zadania można wykorzystać dzielniki napięcia. Pamiętając o tym, że podczas pomiaru, odczytana wartość np. 3300 mV odpowiada 100×10<sup>5</sup> Pa (100 bar), co znaczy, że każdą odczytaną wartość napięcia należy pomnożyć przez współczynnik  $k_p = 0,03$ , aby przeskalować pomiar do jednostki ciśnienia – 10<sup>5</sup> Pa.

### Konfiguracja wybranego ADC

Mikrokontroler STM32 jest wyposażony w układy analogowo-cyfrowe, które mogą zamieniać sygnał analogowy do postaci cyfrowej zadaną rozdzielczością pomiarową. Aby je wykorzystać do pomiaru ciśnienia, należy skonfigurować wybrany przetwornik ADC (ang. Analog to Digital Converter) [12]. Przetworniki ADC w wybranym mikrokontrolerze STM32 mają rozdzielczość pomiarową 12-bit, co znaczy, że mierząc napięcie w zakresie 0 do 3300 mV, to przetwornik będzie konwertował wartość analogową do postaci cyfrowej z rozdzielczością 3300mV/4096.

ADC w swojej strukturze posiada tzw. kanały. Każdy z 3 przetworników, wybranego mikrokontrolera STM32, posiada 4 multiplexowane kanały, które umożliwiają pomiar napięcia i zapis wartości do rejestru danego ADC. Jest to pewna trudność, ponieważ przy odczycie napięcia z większej ilości wyprowadzeń mikrokontrolera, zapisana wartość pomiaru jest nadpisywana w pamięci mikrokontrolera. Aby móc odczytać pomiar z każdego z osobna kanału ADC można wykorzystać tzw. mechanizm DMA (ang. Direct Memory Access). Jego zadaniem jest transfer danych pomiędzy obszarami pamięci lub pomiędzy pamięcią i peryferiami zaraz gdy takie dane powstaną np. w wyniku konwersji analogowo-cyfrowej. Umożliwia to tym samym ciągłą (i relatywnie szybko) wymianę danych - bo bez udziału procesora.

Aby prawidłowo skonfigurować ADC do pracy w trybie DMA,

należy, podobnie jak to miało miejsce przy konfiguracji timera, w pierwszej kolejności udostępnić sygnał zegarowy dla wybranego ADC i portu GPIO. Do nich, podłączone są wyprowadzenia, na których realizowany będzie pomiar napięcia. Wykorzystując mechanizm DMA, trzeba również dla niego udostępnić sygnał zegarowy. Następnie należy dokonać konfiguracji mechanizmu DMA, wskazać kanał DMA, który służyć będzie do odczytu rejestru wybranego ADC. DMA jest wyposażony w 12 kanałów, a każdy jest przypisany danym peryferiom [12]. Odczytana wartość pomiaru ADC będzie zapisywana bezpośrednio do bufora w pamięci, zatem DMA należy skonfigurować w trybie umożliwiającym transfer danych z peryferii do pamięci. W dalszej kolejności należy zainicjować konfigurację DMA oraz wskazać jakie struktury, mechanizm DMA, ma ze sobą powiązać. W tym przypadku będzie to rejestr wybranego ADC oraz bufor pamięci RAM. Transfer danych będzie odbywać się za pomocą przerwania od wybranego kanału DMA zaraz po skończonej konwersji pomiaru ADC.

Kolejnym zadaniem jest konfiguracja i zainicjowanie pracy wybranego przetwornika, deklaracja dzielnika sygnału zegarowego. Jego wartość wpływa na rozdzielczość pomiaru. Przy odczycie napięcia kilku kanałów ADC należy ustawić tryb ciągłego skanowania kanałów przetwornika oraz zadeklarować ilość konwersji, co zwykle jest równe ilości wykorzystywanych kanałów ADC.

W dalszej kolejności trzeba uruchomić kalibrację pomiaru w trybie pojedynczego pomiaru oraz skonfigurować czas próbkowania wybranych kanałów ADC.

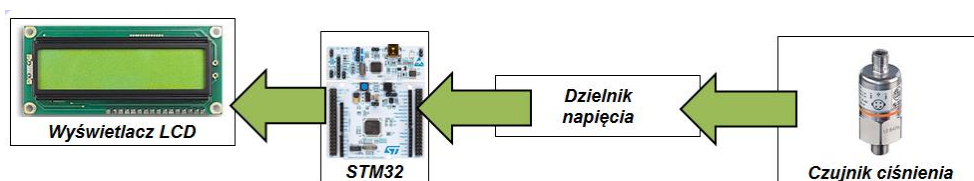
### Algorytm pomiaru

Do pomiaru wykorzystano również inny timer. Jego zadaniem jest w ustalonym czasie generować przerwanie zegarowe, podczas którego odczytywany jest bufor. To niego DMA dokonuje transferu danych z rejestru wybranego ADC po zakończeniu sekwencji pomiarowej każdego kanału ADC. Pomiar przebiega wg określonego algorytmu, przedstawionego poniżej.

1. Inicjacja konfiguracji ustawienia systemu.
2. Inicjacja konfiguracji DMA.
3. Inicjacja konfiguracji ADC.
4. Inicjacja konfiguracji timera 6 generującego przerwanie zegarowe (co 100 ms).
5. Inicjacja konfiguracji wyświetlacza.
6. Oczekiwanie na przerwanie timera 6.
7. Odczyt bufora danych z ADC.
8. Przeskalowanie wartość z bufora do jednostki ciśnienia.
9. Wyświetlenie wartość na LCD.
10. Powtórzenie sekwencji od punktu 6.

### PODSUMOWANIE

- Badania symulacyjne ujawniły możliwe problemy ze sterowaniem pneumatyczno-hydrauliczną jednostką napędową jak przeregulowanie ciśnienia.
- Testowy układ sterowania zaworami ujawnił kilka niekorzystnych zjawisk jak nadmierna temperatura tranzystora, problemysterowania bramki tranzystora dla mniejszego przepływu prądu oraz możliwość wykorzystania tranzystora z kanałem typu



**Rys. 8. Układ do testowania czujników ciśnienia IFM – PA9022**

Źródło: oprac. własne.

- P polegający na przeciwnym niż w przypadku tranzystora z kanałem N sterowaniu napięciem bramki.
- Testowy układ pomiarowy prędkości obrotowej pozwala na uzyskanie zadowalającej rozdzielczości pomiarowej, niezbędnej dla późniejszych badań identyfikacji jednostki napędowej (poniżej założonego progu  $1 \times 10^5$  Pa (1bar).
  - Testowy układ pomiaru ciśnienia pozwolił w prosty sposób na zapoznanie się z wybranym czujnikiem ciśnienia i zweryfikowanie poprawności rejestracji danych z czujnika przez mikrokontroler STM32.
  - Testowe układy sterowania pozwalają na weryfikację danych z symulacji i modyfikację końcowego układu sterowania lub konstrukcji jednostki napędowej przy minimalizacji błędów w projektowaniu tak skomplikowanego systemu.

### BIBLIOGRAFIA

1. Shaw D., Yu J., Chieh Ch.: Design of a Hydraulic Motor System Driven by Compressed Air, *Energies* Vol. 6, pp. 3149-3166, 2013,
2. PAWELSKI Z.: *Modelowanie i obliczanie napędu hydrobusu*, Monografie, Łódź (2000),
3. Czok R., Brol S.: *The use of a simulation model of vehicle with pneumatic-hydraulic drive-train for estimation of selected characteristics*, Proceedings of the institute of vehicles 3(107)/2016, Warszawa, 2016,
4. Mróz P., Brol S.: *Simulation model of pneumatic-hydraulic drive*, Proceedings of the institute of vehicles 3(107)/2016, PW, Warsaw, 2016,
5. Mróz P., Brol S.: *Conception control system of pneumatic-hydraulic drive system*, Proceedings of the institute of vehicles 2(106)/2016, PW, Warsaw, 2016,
6. Fisher : *Control Valve Handbook*, Emerson Process Management, Fisher Controls International LLC 2005,
7. Dokumentacja tranzystora MOSFET IRFZ44N: <http://www.infineon.com/dgdl/irfz44n.pdf?fileId=5546d462533600a40153563b3575220b>,
8. Dokumentacja elektrozaworu pneumatycznego E262K200S1W00FL firmy ASCO: [http://www.valves-direct.com/media/specs/Series\\_262\\_\\_ASCO\\_Direct\\_Operated\\_Solenoid\\_Valves\\_for\\_High\\_Pressure\\_Fluids\\_G1-8-G1-4\\_3.pdf](http://www.valves-direct.com/media/specs/Series_262__ASCO_Direct_Operated_Solenoid_Valves_for_High_Pressure_Fluids_G1-8-G1-4_3.pdf),
9. Dokumentacja elektrozaworu hydraulicznego SVCP-S08-TS3-N-1-D24-D-A202 firmy OLEODINAMICA: <http://www.oleodinamica2mp.it/cataloghi/schede/SVCP-S08-TS3.pdf>,
10. Dokumentacja enkodera Kübler - KIH40: [https://www.kuebler.com/pdf/?KIS40-KIH40\\_en.pdf](https://www.kuebler.com/pdf/?KIS40-KIH40_en.pdf),
11. Dokumentacja układu Texas Instruments - SN75175: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn75175.pdf>
12. Dokumentacja mikrokontrolera STM32F303RE: [http://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/dm00043574.pdf](http://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00043574.pdf),
13. Dokumentacja czujnika ciśnienia IFM - PA9022: [http://tds.ifm-electronic.com/tentacle/aus/PA9022.pdf?requestId=82314243e19e261a&locale=en\\_GB](http://tds.ifm-electronic.com/tentacle/aus/PA9022.pdf?requestId=82314243e19e261a&locale=en_GB),

### Selected examples of using STM32 microcontroller in a prototype pneumatic-hydraulic drive control system

*This article discusses the pneumatic-hydraulic propulsion drive and problems with control of this type of drive. Described practical way of using the ARM microcontroller in the prototype systems of the control system pneumatic-hydraulic drive. Analyzed available documentation and literature in terms of valve control and sensor handling.*

Autorzy:

dr hab. inż. **Sebastian Brol**, prof. PO – pracownik samodzielny w Katedrze Pojazdów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej, s.brol@po.opole.pl

mgr inż. **Piotr Mróz** – doktorant w Katedrze Pojazdów na Wydziale Mechanicznym Politechniki, p.mroz@mixbox.pl