

HONKISZ Marcin, MACZYŃSKI Andrzej

AUTOMATYCZNE REGULATORY W SYSTEMACH NISKIEGO I WYSOKIEGO CIŚNIENIA W POJAZDACH POŻARNICZYCH

Streszczenie

W artykule omówione zostały podstawowe układy sterowania ciśnieniem w autopompach na pojazdach pożarniczych. Przedstawiono autorskie rozwiązania praktyczne umożliwiające wydajną regulację ciśnienia przy pomocy metod dławieniowej oraz zmiennoodrotowej.

WSTĘP

Pojazdy pożarnicze stanowią szeroką grupę pojazdów specjalistycznych. Są wytwarzane w wielu firmach w Polsce, przy czym do czołowych wytwórców należą m.in. PS Szczęśniak, ISS Wawraszek, PS Bocar. Pojazdy produkowane w tych zakładach z powodzeniem konkurują z produktami takich europejskich potentatów, jak np. Rosenbauer.

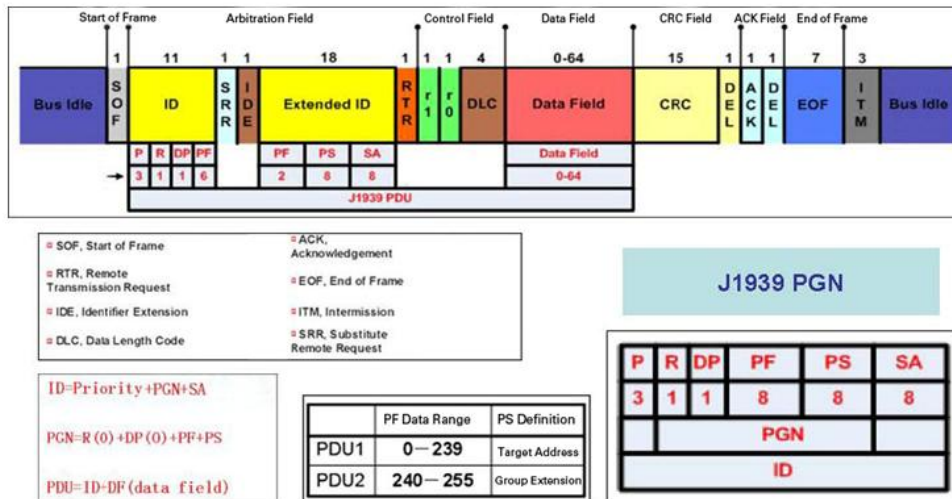
Jednym z czynników umożliwiających polskim firmom rywalizację na arenie międzynarodowej jest stały postęp technologiczny, który wprowadzają w ostatnich dekadach. Szczególnie istotny jest tutaj rozwój elektroniki i urządzeń mikrokomputerowych. Pozwala on na znaczne upraszczanie konstrukcji pod względem struktury, przy równoczesnym uzyskaniu znacznie większej funkcjonalności poprzez dowolną komplikację algorytmu przetwarzania informacji i danych.

W referacie pokrótce omówione zostaną nowoczesne, w tym autorskie, układy regulacji ciśnienia stosowane we współczesnych pojazdach pożarniczych. Umożliwiają one bardzo dokładną realizację zadań, które jeszcze 20 lat temu były niemożliwe do osiągnięcia. Warto przy tym pamiętać, że regulacja ciśnienia pracy na samochodach ratowniczo-gaśniczych jest jednym z najistotniejszych aspektów ich działania, który decyduje o ich skuteczności.

1. WSPÓŁCZESNE PODWOZIA POJAZDÓW POŻARNICZYCH

Samochody pożarnicze to pojazdy, których zabudowy specjalistyczne realizowane są na podwoziach dostarczanych przez producentów zewnętrznych. Najczęściej stosowane są podwozia takich marek, jak Scania, Iveco, Mercedes czy Volvo. Wszystkie posiadają jedną wspólną cechę – sieć CAN, która może być dowolnie wykorzystana przez firmy zabudowujące. CAN (ang. Controller Area Network) to szeregowy magistrala komunikacyjna stosowana głównie w przemyśle motoryzacyjnym. Od ponad dekady jest standardem w budowie pojazdów osobowych i ciężarowych [3].

Specjalnie pod kątem pojazdów ciężarowych został opracowany protokół SAE J1939, który umożliwia m.in. wymianę danych pomiędzy podwoziem a zabudową [4]. Daje on znaczne możliwości projektantom, pozwalając na przesyłanie danych w dwóch kierunkach.



Rys. 1. Standard SAE J1939 w skrócie. Ramka danych oraz podstawowe parametry
 Źródło: [4]

Jednym z najważniejszych parametrów pracy podwozi kontrolowanych z wykorzystaniem protokołu J1939 są obroty silnika zasadniczego. Regulacja obrotów zwykle realizowana jest zdalnie i automatycznie i pozwala na uzyskanie odpowiednich obrotów wału przystawki odbioru mocy (ang. PTO).

2. UKŁAD PTO – AUTOPOMPA

Aby możliwa była eksploatacja zamontowanych na pojeździe urządzeń peryferyjnych, w szczególności wysokowydajnej autopompy, niezbędne jest wyposażenie podwozia w przystawkę odbioru mocy. Istnieje wiele odmian PTO oraz kryteriów ich podziału. Najważniejszy z nich to podział na przystawki zależne i niezależne od sprzęgła [5]. Dla pojazdów pożarniczych istotna jest jednak przede wszystkim moc dostarczana przez przystawkę.

Właściwy dobór przystawki do konkretnego pojazdu i zastosowania jest niezwykle istotny [6]. Należy przy tym uwzględnić podstawowe cechy i parametry pracy układu, m. in.:

- czy przystawka ma być zależna, czy niezależna od sprzęgła,
- wartość obrotów nominalnych i maksymalnych silnika wysokoprężnego n_{eng} ,
- typ skrzyni biegów i silnika,
- dobór pod kątem planowanej pompy,
- należy sprawdzić, czy maksymalne obroty dopuszczalne pompy n nie zostaną przekroczone:

$$n_{eng} \times z < n \quad (1)$$

gdzie z to przełożenie przystawki,

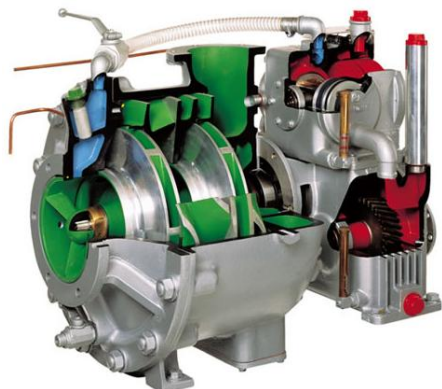
- oraz, co jest szczególnie istotne, czy maksymalna dopuszczalna moc przystawki P_{perm} (kW) nie zostanie przekroczona:

$$\frac{M \times z \times n_{eng} \times 3,14}{30000} < P_{perm} \quad (2)$$

gdzie M to moment przystawki odbioru mocy

Pamiętać należy, że to PTO jest dobierana do konkretnego modelu pompy, nigdy na odwrót.

Autopompy stosowane w pojazdach strażackich mają najczęściej zbliżoną budowę. Są to pompy zwykle odśrodkowe wirowe, przy czym w zależności od ilości stopni i wydatków mogą posiadać różne ilości wirników.



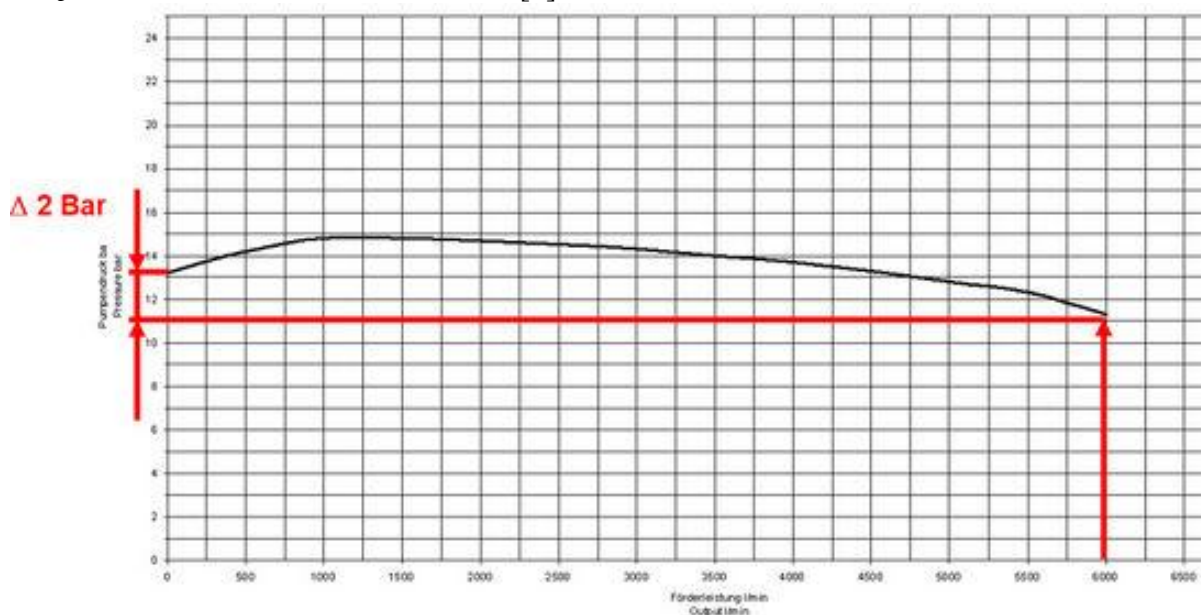
Konstrukcja	autopompa normalociśnieniowa
Stopień normalnego ciśnienia	1-stopniowa pompa odśrodkowa
Wydajność normalne ciśnienie (NP)	do 6.500 l/min przy 10 bar i 3 m wysokości ssania do 7.000 l/min przy 10 bar i pracy ze zbiornika pojazdu
Materiał	odporne na korozję stopy metali lekkich – anodowane (opcja: brąz), wał pompy wykonany ze stali nierdzewnej
Uszczelnienie	bezoobsługowe uszczelnienie mechaniczne
Pompka zasysająca	dwutłokowa pompka zasysająca – napędzana przez pas z wału pompy (rozłączalny)
Wydajność pompki zasysającej	wysokość ssania: 3 m w 5 sek *

NP: Normalne ciśnienie *) Wypompowana objętość: 100 litrów; Ciśnienie atmosferyczne: 0,975 bar

Rys. 2. Pompa Rosenbauer R600

Źródło: [7]

Rys. 2. przedstawia budowę i parametry techniczne przykładowej pompy Rosenbauer R600. Na rys. 3. zaprezentowano charakterystykę wydajności pompy. Jej charakterystyczną i korzystną cechą jest płaski przebieg, co zdecydowanie ułatwia sterowanie układem [1]. Zmiany ciśnienia spowodowane nagłym otwieraniem i zamykaniem zaworów oraz nasad są dzięki temu zredukowane do minimum [7].



Rys. 3. Pompa Rosenbauer R600 – charakterystyka pracy

Źródło: [7]

3. REGULACJA PARAMETRÓW PRACY POMPY

Celem regulacji jest dostosowanie bieżących parametrów pracy pompy do zmieniających się w czasie wymagań odbioru chwilowego. W przypadku pojazdów pożarniczych najczęściej wymagane jest stałe ciśnienie wody na nasadach tłocznych. Przy zmieniających się konfiguracjach otwarcia poszczególnych odbiorów wymóg ten powoduje konieczność stosowania automatycznego regulatora. Zwykle regulowana jest wydajność pompy.

Istnieją dwa zasadnicze sposoby regulowania wydajności pomp odśrodkowych. Są to:

- regulacja dławieniowa,
- regulacja zmiennoobrotowa.

3.1. Regulacja dławieniowa

Idea działania regulacji dławieniowej opiera się na umieszczeniu dowolnego zaworu w rurociągu tłocznym. Najczęściej umieszczany jest on tuż za pompą, choć nie jest to regułą.

Spadek ciśnienia $\Delta h_{zr} = \Delta p_{zr}$ na zaworze regulującym (rys. 4a) zależy od stopnia jego otwarcia. Można napisać:

$$\Delta h_{zr} = \frac{\Delta p_{zr}}{\rho \times g} = \frac{\zeta \times c^2}{2 \times g} = \alpha \times Q^2 \quad (3)$$

gdzie $c = Q/A$; $A = \pi d^2$,

d – średnica nominalna zaworu,

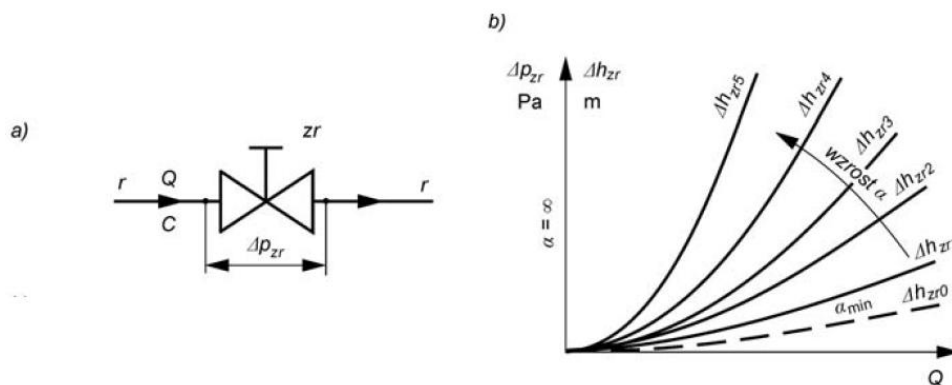
Δh – wysokość strat hydraulicznych na elemencie,

Δp – spadek ciśnienia na elemencie,

ζ – współczynnik oporu miejscowego elementu rurociągu,

Q – wydajność pompy,

α – stopień otwarcia zaworu regulującego.

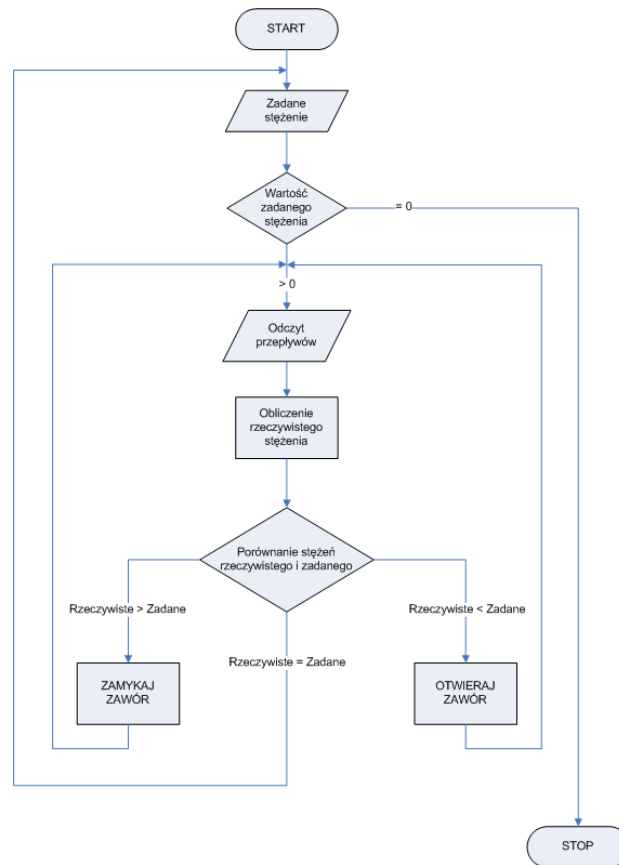


Rys. 4. Regulacja dławieniowa: a) zawór dławiący b) charakterystyki stopnia otwarcia zaworu
Źródło: [2]

Wartości $\alpha = \alpha_{min}$ odpowiada zawór całkowicie otwarty, zaś $\alpha = \infty$ – całkowicie zamknięty. Zależność spadku ciśnienia na elemencie dławiącym w zależności od aktualnej wydajności pompy dla różnych stopni otwarcia elementu dławiącego przedstawia rys. 4b) [2].

Regulacja dławieniowa może być wykorzystana w przypadku stosowania dozownika środka pianotwórczego. Typowo w takich aplikacjach stosowane są układy złożone z przepływomierzy oraz przepustnicy, która pozwala na bardzo dokładną (w nominalnym zakresie) regulację dławieniową.

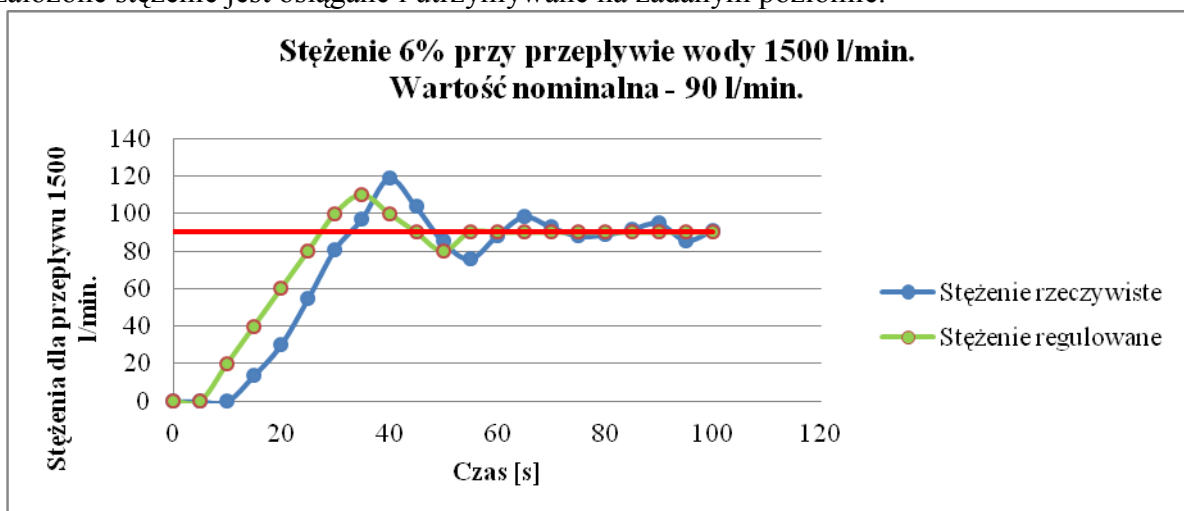
W ramach projektu zrealizowanego dla jednej z firm zabudowujących pojazdy specjalistyczne autor artykułu opracował nowatorskie rozwiązanie, które zapewnia bardzo precyzyjną regulację dławieniową środka pianotwórczego dostarczanego do podawanej za pomocą pompy wody. W typowych rozwiązaniach dozowanie środka pianotwórczego odbywa się w trzech stężeniach: 1, 3 oraz 6%. Autorski system umożliwia uzyskiwanie dowolnych stężeń środka z zakresu 1–10% ze skokiem 0,1%. Uproszczony algorytm działania tego rozwiązania został przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Algorytm regulacji dławieniowej na przykładzie regulatora środka pianotwórczego
 Źródło: opracowanie własne

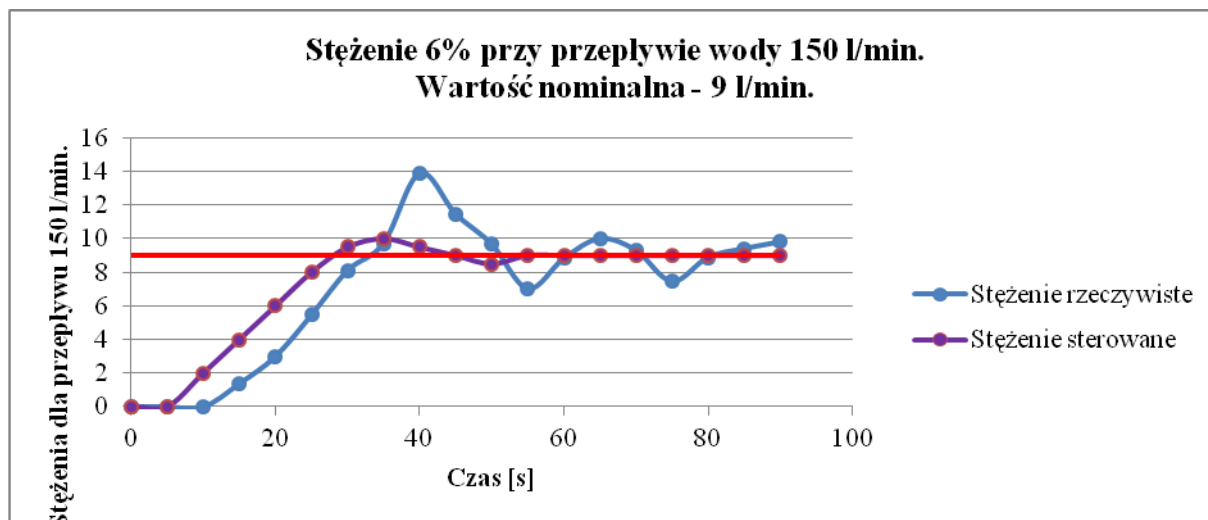
Rozwiązanie to zostało dotychczas zastosowane w kilkudziesięciu pojazdach specjalnych wykonanych dla wojskowych straży pożarnych. Wcześniej należało przeprowadzić szereg testów pod kątem certyfikacji pojazdu. Badania wykazały, że zaproponowane rozwiązanie spełnia z dużym zapasem wymagania określone przez odpowiednie normy jakościowe [8, 9].

Wykresy z rys. 6. oraz 7. przedstawiają pracę regulatora w warunkach rzeczywistych. Pierwszy otrzymano dla przepływów nominalnych – 1500 l/min. Widać, że w krótkim czasie założone stężenie jest osiągnięte i utrzymywane na zadanym poziomie.



Rys. 6. Działanie algorytmu regulacji dławieniowej dla przepływu nominalnego
 Źródło: opracowanie własne

Wykres z rys. 7. pokazuje pracę układu dla skrajnie niskiej wartości przepływu wody – 150 l/min. Przy tej wartości dozowanie 6% środka pianotwórczego jest w zasadzie nieosiągalne dla dotychczasowych rozwiązań rynkowych. Jak widać, w przypadku zaproponowanego algorytmu sterowania stężenie takie jest osiągnięte, oczywiście przy nieco większych oscylacjach wokół wartości zadanej.



Rys. 7. Działanie algorytmu regulacji dławieniowej dla przepływu niskiego
Źródło: opracowanie własne

Istotne są tutaj wymagania normy, które mówią o czasie stabilizacji stężenia dozowanego środka. Minuta, która była potrzebna na tą stabilizację w przypadku zaprezentowanym na rys. 7., jest w pełni zadowalającym wynikiem.

Omawiany regulator zachowuje się jak typowy regulator PID z przeregulowaniem. Przeregulowanie w sygnale sterowanym wynika z znacznej inercji układu. Inercję tę wprowadzają: dwa przepływomierze, które podają wyniki z pewnym opóźnieniem (wynik jest uśredniany i dodatkowo całkowany), przepustnica, której działanie (sterowane za pomocą silników DC, a kontrolowane pętlą zwrotną za pomocą czujnika potencjometrycznego) wpływa na stan układu z kilkusekundowym opóźnieniem, oraz czujnik ciśnienia. Rozwiązanie to zostało jednak dopuszczone do użytku przez centrum certyfikujące dla straży pożarnej w Polsce – CNBOP z Józefowa (Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej). Spełnia bowiem wszystkie wymagania stawiane przez normy tego typu układom.

3.2. Regulacja zmiennobrotowa

Na skutek zmian prędkości obrotowej pompy z n_1 na n_2 można uzyskać proporcjonalną zmianę parametrów pracy pompy z Q_1, H_1 na Q_2, H_2 . Wynika to z podobieństwa przepływów przez pompy, których geometria jest podobna. Zmiana sprawności hydraulicznej i objętościowej pompy powoduje, że zmiany parametrów nie są liniowe, lecz w praktyce często nieliniowości te można pominąć, zakładając:

$$\frac{Q_2}{Q_1} \cong \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

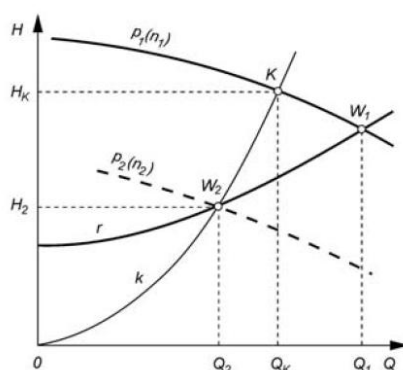
$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (5)$$

Całkowitą sprawność pompy pomija się z zasady, gdy analizowane zmiany prędkości obrotowej nie przekraczają 15%. W przypadku większych zmian prędkości należy uwzględnić zmianę sprawności z η_1 na η_2 , przyjmując na przykład:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (6)$$

Z powyższych zależności wynika, że podczas zmiany prędkości obrotowej przy zachowanym podobieństwie przepływów punkty pracy pompy (Q , H) przesuwają się po parabolach podobieństwa.

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^2 \quad (7)$$



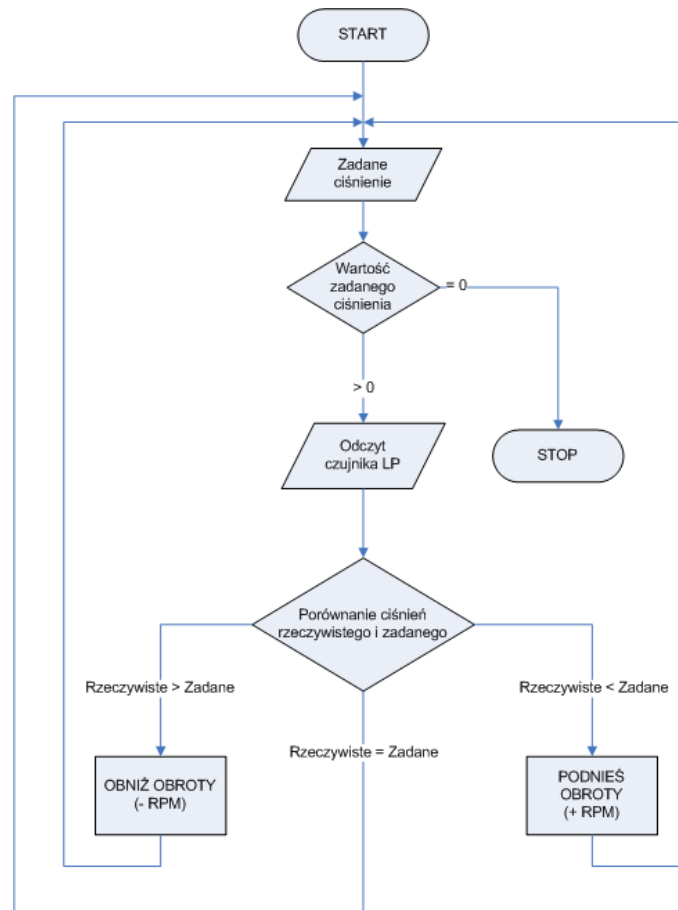
Rys. 8. Punkt pracy pompy przy regulacji zmiennoobrotowej
Źródło: [2]

Na rys. 8. przedstawiono charakterystyki $H(Q)$ i $\eta(Q)$ dla różnych wartości n/n_n . Widać dobrze, że wraz ze zmniejszaniem wartości obrotów przesuwa się w lewo wierzchołek charakterystyki sprawności i jednocześnie obniża się wartość η_{max} .

Podobnie jak w przypadku regulacji dławieniowej, tak i dla regulacji zmiennoobrotowej autor opracował własny algorytm sterowania. Z dostępnych informacji wynika, że rozwiązanie to jest jedynym tego typu rozwiązaniem zrealizowanym w Polsce na podwoziu marki Iveco i działającym w oparciu o sieć CAN podwozia samochodu. Komunikacja poprzez sieć CAN umożliwiła efektywne sterowanie obrotami silnika podwozia, a co za tym idzie – obrotami wału przystawki napędzającej autopompę.

Na schemacie z rys. 9. przedstawiony został opracowany algorytm realizujący podstawowe zadanie regulacyjne dla autopompy pożarniczej. Całość algorytmu wykonywana jest przez kilka urządzeń elektronicznych zamontowanych na pojeździe i współpracujących ze sobą:

- sterownik PLC, którego zadaniem jest realizacja procesu regulacyjnego,
- interfejs sieci CAN podwozia, odbierający sygnały sterujące obrotami silnika wysokoprężnego,
- czujnik ciśnienia niskiego (LP) na rurażu, zamontowany na wyjściu z pompy.



Rys. 9. Algorytm regulacji zmiennoobrotowej
 Źródło: opracowanie własne

Praktyczna realizacja algorytmu może być przedstawiona za pomocą kodu sterownika PLC, który ze względów tajemnicy handlowej został znacznie uproszczony.

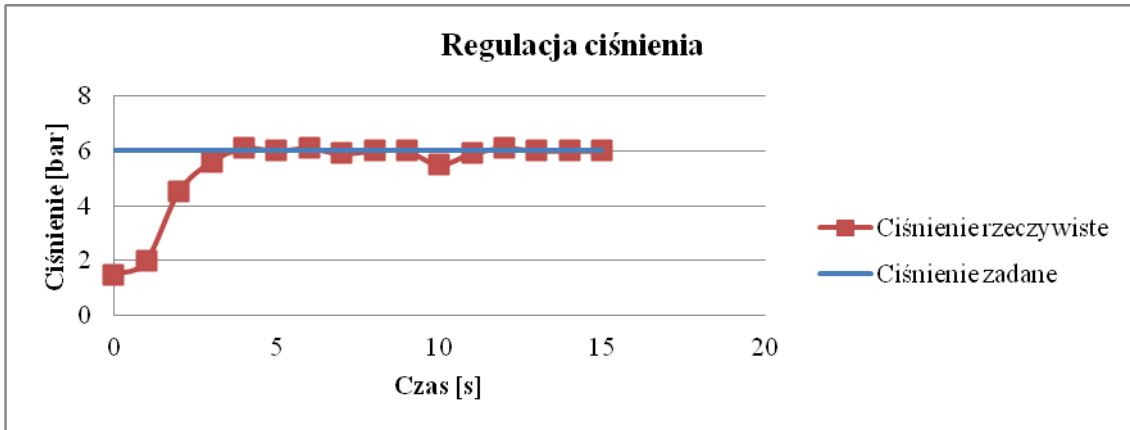
```

LP_zad := czytaj_LP z panelu LCD;
if (LP_zad > 0) then {
  LP_rzecz := czytaj_LP z czujnika;
  if (LP_zad > LP_rzecz) then {
    wyślij +RPM do podwozia;}
  if (LP_zad < LP_rzecz) then {
    wyślij -RPM do podwozia;}
}
  
```

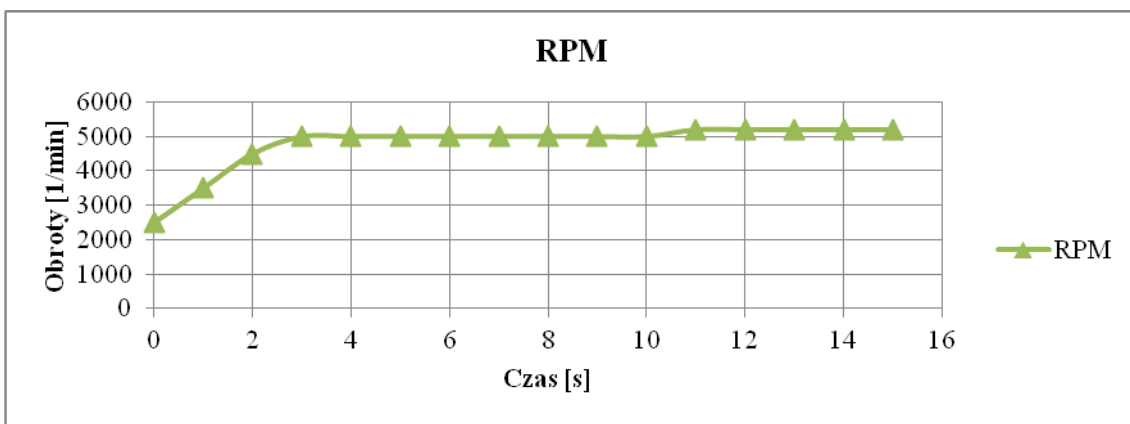
Przedstawiony algorytm sterowania pozwala na uzyskanie zadowalających wyników przy warunku zachowania odpowiednich interwałów czasowych w całym procesie regulacyjnym. Pamiętać należy o elementach, których synchronizacja jest kluczowa dla pracy układu:

- komunikacja PLC <-> czujnik realizowana najczęściej przy zastosowaniu sygnału prądowego 4–20 mA posiadającego określoną rozdzielczość i częstotliwość narzuconą przez czujnik,
- komunikacja PLC <-> podwozie – transmisja po linii CAN w standardzie SAE J1939, która jest znormalizowana i musi być zsynchronizowana z innymi ramkami informacyjnymi i sterującymi,
- cykl pracy sterownika PLC.

Na wykresach z rys. 10. i 11. przedstawiono wyniki uzyskane podczas testów jednego z dwudziestu samochodów, które mają zaimplementowany omawiany algorytm.



Rys. 10. Działanie algorytmu regulacji zmiennoobrotowej dla ciśnienia roboczego 6 bar
Źródło: opracowanie własne



Rys. 11. Przebieg wartości obrotów silnika podwozia
Źródło: opracowanie własne

Oba wykresy przedstawiają ten sam, testowy cykl pracy autopompy. Na początku została zadana wartość ciśnienia 6 bar, którą układ osiągnął już po 4 s. Widać, że praca jest stabilna, natomiast pewne zaburzenie pojawia się w 9 s. W tym momencie zostały otwarte dwie wysokoprzekrojowe nasady, które znacząco wpłynęły na pracę układu. Ciśnienie w układzie spadło na czas ok. 1 s o wartość ok. 0,5 bara, po czym wróciło na poprzedni poziom. Drugi wykres ukazuje, jak podczas testu, pod wpływem działania regulatora, zmieniały się obroty silnika pojazdu. W momencie otwarcia nasad obroty zostały nieznacznie podniesione, bez zbędnych przeregulowań. W tym układzie występuje stosunkowo niewielka inercja, wszystkie czujniki podają wartości w czasie rzeczywistym, dzięki czemu można uniknąć znaczących przeregulowań.

Opisany powyżej sposób regulacji również zyskał pozytywną opinię centrum certyfikującego CNBOP i został dopuszczony do użytkowania.

PODSUMOWANIE

Automatyczna regulacja parametrów pracy autopompy to zagadnienie stosunkowo nowe. Realizacja tego zadania poprzez połączenie systemu sterowania z siecią CAN podwozia pozwala na pełne wykorzystanie możliwości, jakie obecnie dają silniki wysokoprężne montowane w samochodach ciężarowych. Zmiana obrotów silnika nawet o kilka tysięcy obr./min następuje w sekund bardzo krótkim czasie, co pozwala uzyskanie regulacji odpowiadającej na szybkozmienne wymagania związane z warunkami użytkowania. Płaskie

charakterystyki obecnie produkowanych pomp także sprzyjają coraz sprawniejszemu sterowaniu układem.

Przedstawione w artykule algorytmy opierające się o regulację dławieniową oraz zmiennoobrotową są rozwiązaniami najnowszymi, opracowanymi przez autora w 2012 roku. Zastosowane w kilkudziesięciu pojazdach spełniają zadania regulacyjne podczas codziennej eksploatacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Jędral W., *Pompy wirowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
2. Jędral W., *Efektywność energetyczna pomp i instalacji pompowych*. KAPE, Warszawa 2007.
3. Czerwienko D., *Pojazdy pożarnicze wczoraj i dziś – rozwój technologii*. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 2012, nr 3.
4. Dongfeng Motor Corporation, *Creating a CAN Bus communication platform based on the SAE J1939 protocol and NI PXI*. www.ni.com.
5. *Przystawki odbioru mocy i pompy hydrauliczne. Zastosowanie, Instrukcja dotycząca użytkowania*. Volvo, 2005.
6. MAN *Napędy dodatkowe*, MAN Nutzfahrzeuge S.A., München 2008.
7. Rosenbauer *R600 Autopompa normalnociśnieniowa*.
8. Norma PN-EN 1846-2:2009 – Samochody pożarnicze – Część 2: Wymagania ogólne – Bezpieczeństwo i parametry.
9. Norma PN-EN 1846-3+A1:2008 – Samochody pożarnicze – Część 3: Wyposażenie zamontowane na stałe – Bezpieczeństwo i parametry.
10. Norma PN-EN ISO 13849-1:2008 – Bezpieczeństwo maszyn – Elementy systemów sterowania związane z bezpieczeństwem – Część 1: Ogólne zasady projektowania.

LOW AND HIGH PRESSURE AUTOMATION CONTROL SYSTEMS IN FIRE FIGHTING VEHICLES

Abstract

Paper discussed basics of automatic pressure systems for fire pumps on fire fighting vehicles. Also described innovative practical solutions of efficient pressure control using two methods – throttling with throttle valve and second – variable speed of power shaft.

Autorzy:

mgr inż. **Marcin Honkisz** – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej
dr hab. inż. **Andrzej Maczyński**, prof. ATH – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej