

Article citation info:

Jarosław Goszczak, Bartosz Radzymiński, Andrzej Werner, Zbigniew Pawelski. PWM-controlled hydraulic solenoid valves for motor vehicles. The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji. 2017; 75(1); 23-38; <http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL75.ART2>

PWM-controlled hydraulic solenoid valves for motor vehicles

Elektrozawory hydrauliczne sterowane sygnałem PWM stosowane w pojazdach samochodowych

Jarosław Goszczak¹, Bartosz Radzymiński²,
Andrzej Werner³, Zbigniew Pawelski⁴

Politechnika Łódzka

Abstract

Paper presents the characteristics of two hydraulic electro-valves applied in automotive industry, produced by different manufacturers. Such electro-valves are controlled by PWM signal (Pulse With Modulation) and are used to control oil pressure in automatic gearboxes. Paper includes some basic information about PWM signal with its application. In the subsequent chapter, there will be given information about tested valves, acquired by an individual elaboration, including design and the fundamentals of operation.

In the followings sections, test bench is described and test results are presented. The temperature turned out as a very important factor which should be taken into account. In case of PWM controlling, for different temperatures some uncertainties of output pressure are possible. To avoid this undesirable phenomenon new control signal is proposed.

¹ Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź; e-mail: jaroslaw.goszczak@p.lodz.pl

² Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź; e-mail: bartosz.radzaminski@p.lodz.pl

³ Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź; e-mail: andrzej.werner@guest.p.lodz.pl

⁴ Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź; e-mail: zbigniew.pawelski@p.lodz.pl

Different characteristics of electro-valves are included: output pressure as the function of steering signal, the value of force exerted by the slider, responsiveness to a step function of request, regulation possibilities and internal leakages. What is more, occurrence of hysteresis phenomenon is checked.

Based on test results a number of conclusions are formulated with some practical pieces of information for the engineers of mechanical systems which contain elements controlled by PWM signal.

Streszczenie

Artykuł niniejszy zawiera charakterystykę elektrozaworów hydraulicznych stosowanych w pojazdach samochodowych, pochodzących od dwóch producentów, których zmienną sterującą jest sygnał PWM (ang. Pulse With Modulation). Służą one do regulacji ciśnienia w obwodzie elektrohydraulicznym automatycznej skrzyni biegów pojazdów samochodowych. W artykule omówiono po krótku istotę sygnału PWM oraz jego zastosowanie. Scharakteryzowano badane elektrozawory, wraz z podaniem własnej analizy konstrukcyjnej oraz zasady ich działania. Porównano dwa różne rozwiązania zwracając uwagę na istotne, funkcjonalne różnice między nimi oraz zauważone niedoskonałości tychże rozwiązań.

W dalszej części artykułu omówiono stanowisko pomiarowe oraz wyniki badań, w których zwrócono uwagę na istotny wpływ temperatury na niejednoznaczność osiągniętych ciśnień w przypadku sterowania przy pomocy sygnału PWM- zaproponowano inną zmienną sterującą, a następnie przedstawiono wyniki badań dla różnych wartości temperatury oleju.

Zawarto charakterystyki: wytwarzanego ciśnienia w funkcji sygnału sterującego, sprawdzając występowanie zjawiska histerezy, siły wywieranej przez trzpień elektrozaworu, czasu reakcji na skok jednostkowy o amplitudzie pełnego przesterowania, możliwości regulacyjnych oraz przecieków własnych elektrozaworu.

Sformułowano szereg wniosków, nasuwających się po przeprowadzeniu badań, będących praktycznymi i istotnymi wskazówkami dla konstruktorów układów mechanicznych w których zastosowanie znajdują elektrozawory sterowane sygnałem PWM lub inne elementy, których zmienną sterującą jest sygnał PWM.

Keywords: PWM signal, electro-valve steering, temperature influence

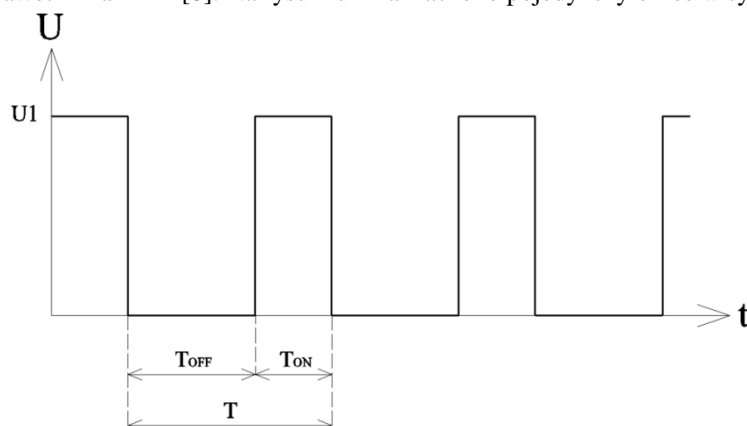
Słowa kluczowe: sygnał PWM, elektrozawór sterowany sygnałem PWM, wpływ temperatury na pracę elektrozaworu

1. Wstęp

Powszechnie stosowane elektrozawory należy podzielić na: elektrozawory typu otwarty/zamknięty (dwupozycyjne), oraz elektrozawory umożliwiające dowolne otwarcie między pełnym zamknięciem i pełnym otwarciem. Elektromagnes zaworu o ciągłej (bezstopniowej) zmianie otwarcia musi być zasilany prądem o zmieniającym się natężeniu. Powszechnym rozwiązaniem stało się zastosowanie sygnału typu PWM (ang. Pulse With Modulation).

Sygnal PWM jest to sygnał prądowy lub napięciowy, o stałej amplitudzie i częstotliwości, natomiast o regulowanym wypełnieniu- więcej o podstawach tego typu sygnału można znaleźć w [2]. Jest on powszechnie stosowany w motoryzacji [3], oraz w sterowaniu silnikami elektrycznymi [1],[9],[10]. Obecnie można znaleźć wiele odmian tego typu sygnału [4], gdyż wciąż poszukuje się metod, mających na celu uzyskanie najmniejszych strat energetycznych i optymalnego wykorzystania pamięci mikrokontrolerów [5], [6].

Częstotliwość sygnału jest tak duża, że daje efekt regulacji płynnej- osiągnęte częstotliwości to nawet kilka MHz [8]. Na rysunku 1 zaznaczono pojedynczy okres w sygnale PWM.



Rys. 1. Sygnal PWM z zaznaczonym okresem T , czasem stanu wysokiego (zasilania) T_{ON} oraz czasem stanu niskiego T_{OFF} [12]

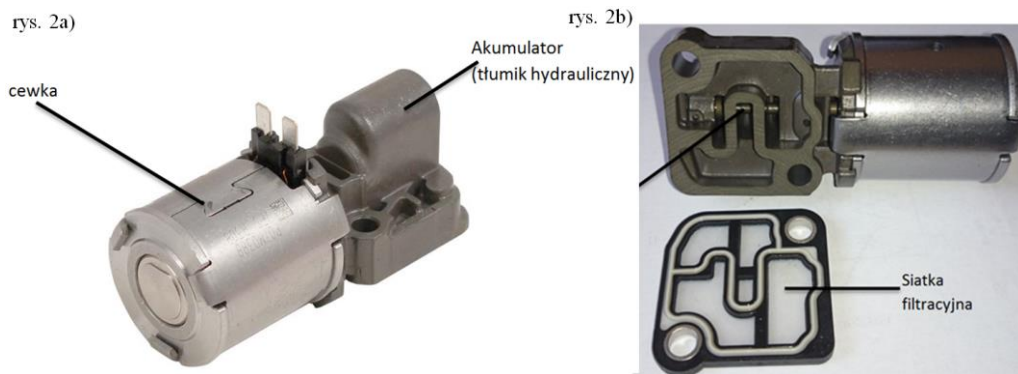
Wypełnienie sygnału definiowane jest jako stosunek czasu stanu wysokiego do całego okresu sygnału, czyli:

$$K_w = \frac{T_{ON}}{T} \cdot 100\% . \quad (1)$$

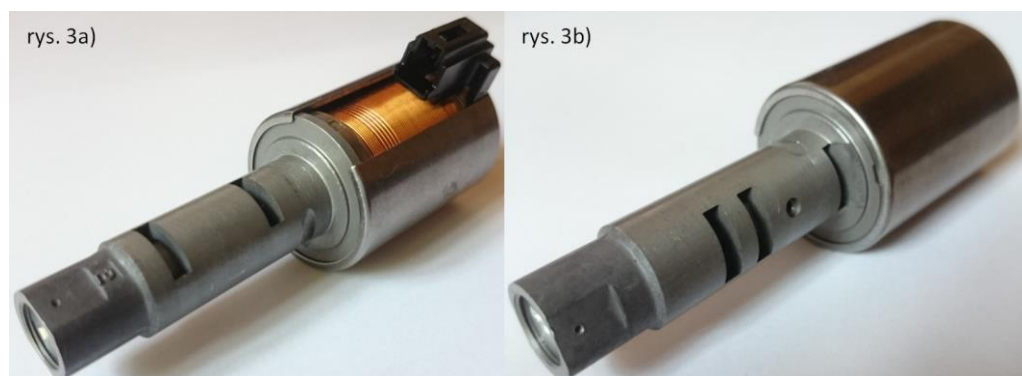
Zdjęcia analizowanych elektrozaworów, których praca daje efekty bezstopniowej zmiany otwarcia przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Składają się one z cewki elektrycznej, wewnątrz której znajduje się trzpień. Trzpień ten w zależności od podawanego sygnału PWM jest wypychany przez pole magnetyczne elektromagnesu przesuwając suwak elektrozaworu. Ten z kolei w zależności od swojego położenia łączy odpowiednie komory w rozdzielaczu hydraulicznym.

Na rysunku 2 przedstawiono ogólnie dostępny elektrozawór, przystosowany do pracy z częstotliwością sygnału PWM 300Hz oznaczony w niniejszym artykule jako rozwiązanie/elektrozawór I. Na rysunku 3 ukazano natomiast elektrozawór innego producenta w wersji N/H (oznaczenie to zostanie objaśnione w dalszej części artykułu), oznaczonej jako rozwiązanie II.

Oba typy elektrozaworów znajdują powszechne zastosowanie w samochodach osobowych, więc ich napięcie zasilania wynosi 12V.



Rys. 2. Widok elektrozaworu I- 2a) [14].



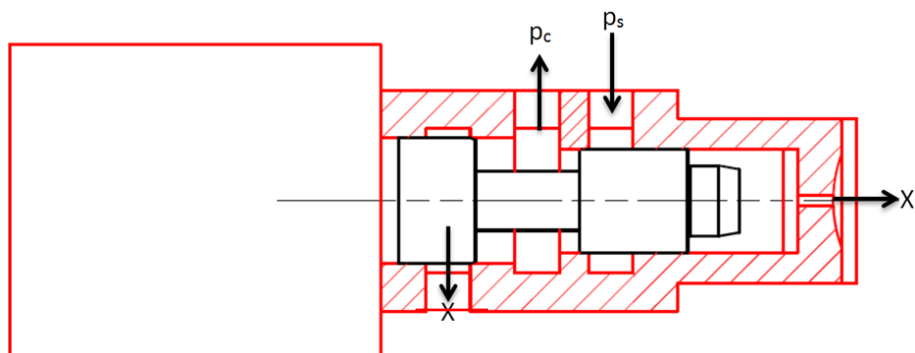
Rys. 3. Widok elektrozaworu II od góry (a), oraz od dołu (b)

2. Zasada działania elektrozaworu

Elektrozawór ma za zadanie regulować ciśnienie oleju na swym wyjściu w zależności od zadawanego sygnału PWM, którego wartość określa wypełnienie okresu w jakim dostarczany jest do elektromagnesu prąd. Przepływający prąd przekłada się bezpośrednio na siłę elektromagnesu z jaką jest wypychany trzpień.

Ruch trzpienia przenosi się na suwak rozdzielacza hydraulicznego, jak przedstawia rysunek 4. Zaprezentowano na nim najprostszą konstrukcję, opracowaną przez autorów w celu przybliżenia zasady pracy takiego typu elektrozaworu. Rysunek ten umożliwia również porównanie tejże propozycji z nieco bardziej skomplikowaną budową elektrozaworu II i ze znacznie bardziej złożoną konstrukcją elektrozaworu I.

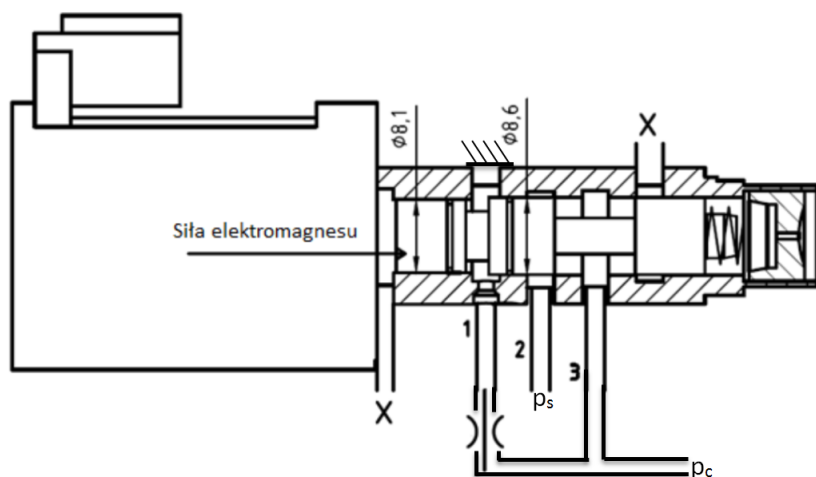
Komora ciśnienia wyjściowego p_c na skutek ruchu suwaka może być łączona bądź z zasilaniem p_s i wtedy p_c rośnie, bądź z upustem oleju do ciśnienia atmosferycznego X i wtedy p_c maleje. Wartość p_c może się więc zmieniać między ciśnieniem atmosferycznym a ciśnieniem zasilania. Ruch suwaka powodowany jest niezrównoważeniem siły od elektromagnesu i siły sprężenia zwrotnego, proporcjonalnej do ciśnienia p_c , a wynikającej z różnicy czynnego pola suwaka po obu stronach komory p_c .



Rys. 4. Schemat przedstawiający konstrukcję elektrozworu, wystarczającą do spełnienia założonych funkcji

Na rysunku 4 przedstawiono położenie neutralne elektrozworu, tzn. pozycja suwaka jest taka, że nie następuje ani wzrost ciśnienia p_c , ani jego obniżanie. Występuje równowaga sił pochodzących od elektromagnesu (przekazywana przez trzpień na suwak) i siły wypadkowej, będącej skutkiem działania ciśnienia p_c na wspomniane dwie powierzchnie tłoczka.

Jeżeli nastąpi wzrost siły pochodzącej od elektromagnesu, zostanie otwarty kanał dopuszczający ciśnienie p_s . Jeżeli natomiast zostanie zadana mniejsza siła na elektromagnesie, otworzy się kanał upustu oleju, aż do osiągnięcia równowagi sił, co spowoduje ponowne jego przymknięcie. Rysunek nr 5 prezentuje natomiast schemat elektrozworu oznaczonego numerem II.



Rys. 5. Schemat przedstawiający konstrukcję elektrozworu II

W elektrozworze tym na suwak działają trzy siły: od sprężyny skierowana w lewo i dwie siły pchające w prawo – siła elektromagnesu oraz siła sprężenia zwrotnego, powstająca przez parcie ciśnienia wyjściowego p_c na dwie położone naprzeciw siebie powierzchnie – jedną o średnicy 8,6 mm i drugą o średnicy 8,1 mm. Na rysunku 5 przedstawiono położenie neutralne elektrozworu.

Siła pochodząca od sprężyny jest praktycznie stała (bo przesunięcia suwaka są bardzo małe). Wzrost siły wywieranej przez elektromagnes, która jest funkcją zadanego sygnału PWM (a dokładniej natężenia prądu przepływającego przez cewkę) i temperatury, pcha suwak w prawo i otwiera okno upustu i w ten sposób zmniejsza ciśnienie p_c . Nowy stan równowagi osiągany jest przy zwiększonej, zadanej wartości sygnału PWM i zmniejszonym ciśnieniu.

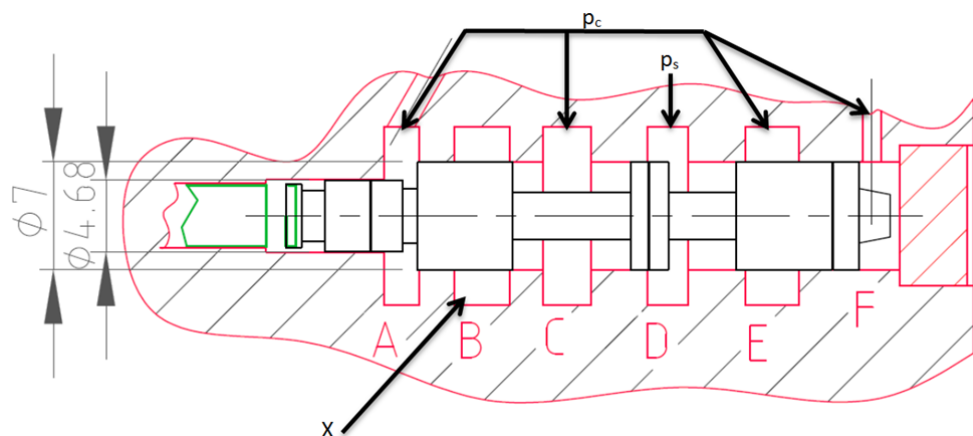
Oznacza to, że ciśnienie na wyjściu jest normalnie wysokie (bez zadawania sygnału PWM i podawania tym samym prądu na cewkę elektrozaworu), o czym świadczą właśnie oznaczenia N/H (ang. Normal High) na obudowie. Elektrozawór ten przystosowany jest do pracy pod ciśnieniem zasilania wynoszącym 20 bar. Tak więc zakres ciśnień wyjściowych p_c waha się pomiędzy wartością 20 bar (przy zadanym sygnale PWM wynoszącym 0%) pomniejszoną o straty ciśnienia w kanałach samego elektrozaworu, a ciśnieniem atmosferycznym. Elektrozawór ten występuje również w wersji N/L (ang. Normal Low) [13].

Schemat elektrozaworu oznaczonej numerem I (rysunek 6) jest znacznie bardziej skomplikowany. Na suwak działają siły pochodzące od: elektromagnesu przenoszone przez trzpień oraz siły wypadkowej sprężenia zwrotnego ujemnego od ciśnienia regulowanego p_c . Ciśnienie p_c oddziałuje na powierzchnię wynikającą z średnicy maksymalnej suwaka ($\Phi 7$ mm) w komorze F, oraz na powierzchnię wynikającą z średnicy maksymalnej suwaka zmniejszoną o powierzchnię czoła suwaka (o średnicy $\Phi 4,68$ mm) w komorze A- stanowi to łącznie sprężenie zwrotne ujemne równe oddziaływaniu ciśnienia p_c na powierzchnię wynikającą z średnicy $\Phi 4,68$ mm ($0,172$ cm²). Trzpień elektromagnesu nie jest mechanicznie związany z suwakiem i aby zapewnić ich wspólny ruch, wewnątrz elektromagnesu znajduje się sprężynka dopychająca czoło trzpienia do czoła suwaka.

Komorą C jest komorą wypracowywania ciśnienia p_c , natomiast komory A, E i F są komorami służącymi do sprężenia zwrotnego.

W położeniu neutralnym nie ma przepływu między komorami D (zasilanie p_s) i E (p_c), ani między B (upust do zbiornika) i C (p_c) i w ten sposób ciśnienie p_c nie zmienia się. Jednakże nawet małe przesunięcie (ale większe niż strefa martwa) w prawo powoduje otwarcie przejścia między komorami D i E i jako skutek wzrost ciśnienia p_c , oraz odwrotnie – przesunięcie w lewo otwiera spust (między komorami C i B) powodując zmniejszenie ciśnienia p_c . Przesunięcie suwaka dokonuje się poprzez zmianę zadanego sygnału PWM.

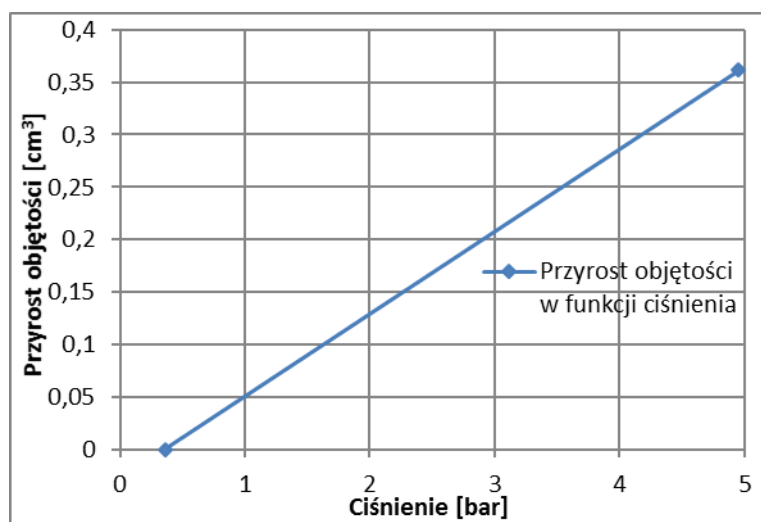
Ruch trzpienia w kierunku wysuwania jest mechanicznie ograniczony i w badanym egzemplarzu dochodziło do sytuacji „odklejania” tłoczka od suwaka i występowania sytuacji nieokreślonego jednoznacznie położenia suwaka. Następstwem było zjawisko pozostawienia ciśnienia p_c około 0,5 bar mimo całkowitego zdjęcia sygnału elektrycznego.



Rys. 6. Względne położenie suwaka i cylindra elektrozaworu I

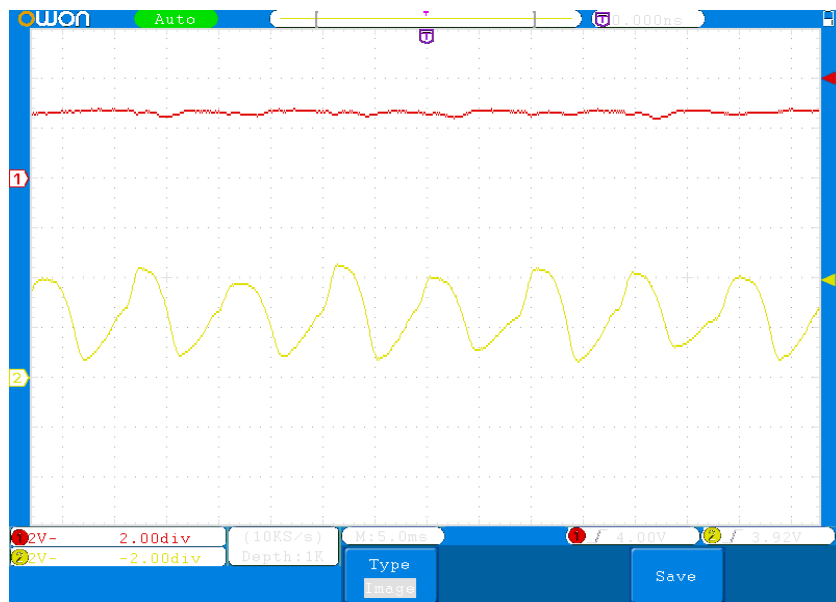
Zauważona cecha nie jest jedyną wadą omawianego rozwiązania. Podczas badań stwierdzono tendencję elektrozaworu do samowzbudzenia. Prawdopodobnie producent zdając sobie sprawę z tej cechy, wprowadził akumulator energii widoczny na rysunku 2a, składający się z cylinderka, tłoczka i sprężyny. Ciśnienie wyjściowe p_c oddziałuje na dolną powierzchnię tłoczka, ściskając sprężynę. Wbudowany akumulator energii ma za zadanie spowolnienie zmian ciśnienia p_c , stabilizując działanie zaworu.

Dokonano pomiarów średnicy tłoczka znajdującego się wewnątrz cylindra akumulatora i sztywności jego sprężyny. Wiedząc, na ile ta sprężyna jest ściśnięta w położeniach skrajnych (ograniczenia mechaniczne), możliwe było wyznaczenie charakterystyki akumulatora, co pokazano na rysunku 7. Akumulator działa wyłącznie w zakresie 0,36 do 4,95 bar i powyżej tej ostatniej wartości nie odgrywa żadnej roli w zachowaniu dynamicznym elektrozaworu.



Rys. 7. Charakterystyka zintegrowanego akumulatora elektrozaworu I

Mimo zastosowania akumulatora, elektrozawór w pewnych warunkach wzbudzał się. Przebieg sygnału wzbudzonego elektrozaworu pokazuje rysunek 8. Czerwona linia przedstawia sygnał elektryczny z przetwornika ciśnienia p_s umieszczonego na zasilaniu elektrozaworu. Linia żółta to sygnał elektryczny z przetwornika na wyjściu (p_c). Zadawany sygnał PWM był niezmienny.



Rys. 8. Zrzut z ekranu oscyloskopu przedstawiający zjawisko wzbudzenia elektrozaworu

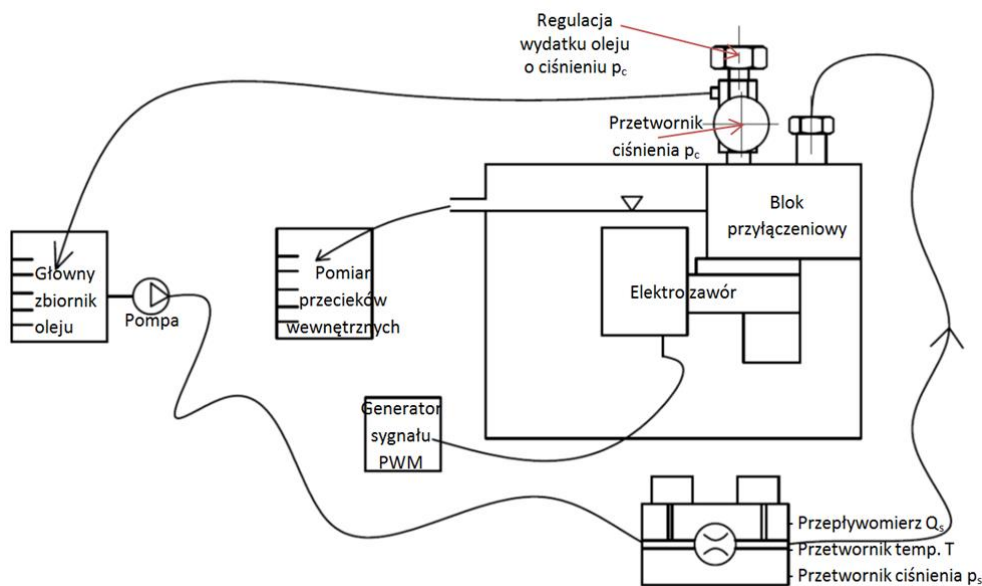
3. Stanowisko pomiarowe

Rysunek 9 przedstawia ogólny schemat stanowiska badawczego. Pompa wporowa o stałej objętości jednostkowej generuje wydatek oleju Q_s o temperaturze t i ciśnieniu p_s . Po przejściu przez blok przyłączeniowy olej trafia do elektrozaworu. W zależności od zadawanego sygnału PWM wytwarzane jest ciśnienie wyjściowe (kontrolne) p_c .

W trakcie badań mierzono wartość przecieków własnych elektrozaworu. Poprzez przecieki wewnętrzne należy rozumieć wydatek oleju wydobywającego się z elektrozaworu w pozycji neutralnej, czyli bez zamierzonego upuszczania oleju. Wynikają one głównie z luzu między suwakiem a cylindrem. Zależą one przede wszystkim od temperatury oleju i ciśnienia wyjściowego.

Zawór na wyjściu oleju o ciśnieniu p_c symuluje pobór oleju przez odbiorniki. Wydajność oleju wyjściowego może być mierzona przepływomierzem umieszczonym w linii zasilania, po uwzględnieniu przecieków. Główny zbiornik oleju posiada wbudowany system podgrzewania oleju.

Do elektrozaworu podawany jest sygnał PWM z generatora. Wpięto układ umożliwiający pomiar natężenia prądu. W linię zasilania elektrozaworu w olej wmontowano przepływomierz, przetworniki ciśnienia oraz temperatury, których sygnały były rejestrowane.



Rys. 9. Schemat przedstawiający budowę stanowiska pomiarowego

4. Wyniki pomiarów

4.1. Charakterystyka ciśnienia p_c wytworzonego przez elektrozawór w funkcji sygnału sterującego PWM

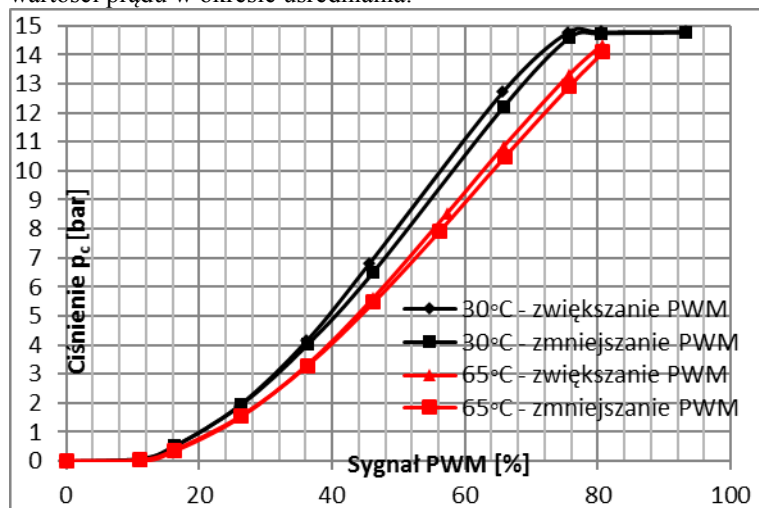
Wykres na rysunku 10 przedstawia krzywe regulowanego ciśnienia p_c w funkcji sygnału zadawanego PWM dla dwóch temperatur, dla elektrozaworu I. Ciśnienie zasilania p_s wynosiło 15 bar. Rozbieżność poszczególnych krzywych przy zwiększaniu i zmniejszaniu sygnału jest bardzo mała. Ogólnie można przyjąć, iż nie obserwuje się znaczącego zjawiska histerezy dla elektrozaworu (podobnie w przypadku elektrozaworu II) dla danej temperatury.

Rozbieżność jest znacząca między krzywymi dla różnych temperatur. Jest to spowodowane tym, iż siła cewki jest proporcjonalna do prądu średniego przepływającego przez cewkę, a nie bezpośrednio do wartości sygnału PWM. Prąd z kolei zależy od oporności cewki, która jest zmienna w zależności od temperatury. Według przeprowadzonych pomiarów rezystancja cewki w temperaturze 18 °C wynosi 4,7 Ω , natomiast w temperaturze 90 °C wynosi 6,3 Ω . Warto zauważyć, iż temperatury tej nie można utożsamiać z temperaturą oleju, gdyż cewka pod wpływem przepływającego przez nią prądu nagrzewa się (czasem nawet do około 90 °C).

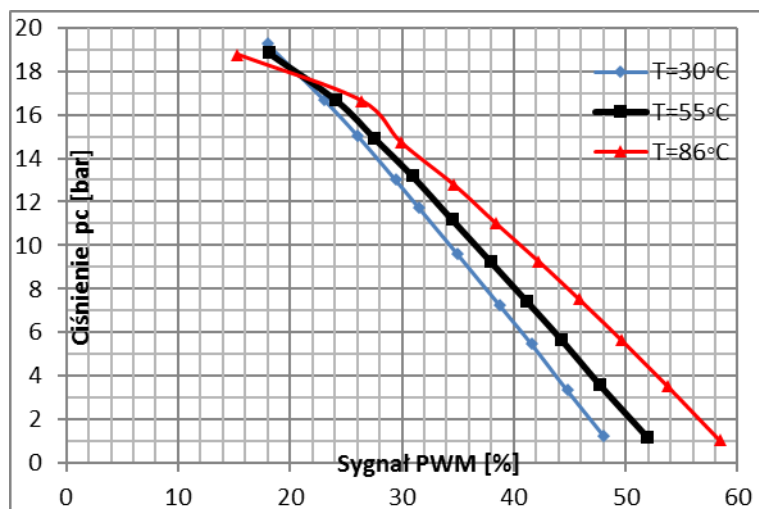
Podobne obserwacje dotyczą elektrozaworu II, którego charakterystyki przedstawia rysunek 11. Wyniki wyraźnie różnią się między sobą, w funkcji temperatury. W przypadku tego elektrozaworu rezystancja w temperaturze pokojowej (20 °C) wynosi 5,2 Ω , natomiast w temperaturze 110 °C osiąga wartość 7,2 Ω -do takiej temperatury nagrzewa się ten

elektrozawór przy wartości PWM wynoszącej 100% bez przepływającego przez niego i odbierającego ciepło oleju.

Opierając się na przedstawionych wynikach badań, ukazujących brak jednoznaczności co do wartości otrzymanego ciśnienia na wyjściu elektrozaworu przy różnych temperaturach zdecydowanie lepszą, pewniejszą i niezależną od temperatury zmienną sterującą jest prąd średni przepływający przez elektrozawór. Charakterystyki ciśnienia p_c w funkcji prądu średniego przedstawia rysunek 12. Jako prąd średni przyjęto średnią arytmetyczną z przebiegu wartości prądu w okresie uśredniania.



Rys. 10. Wykres ciśnienia p_c elektrozaworu I w funkcji sygnału PWM dla różnych temperatur

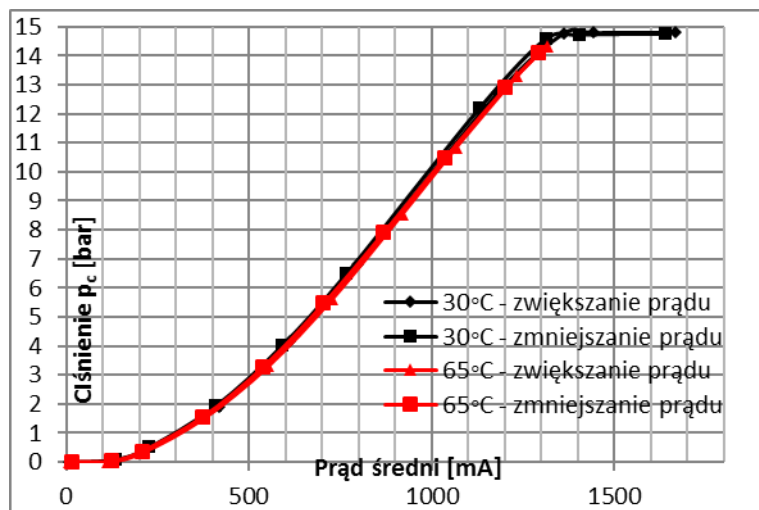


Rys. 11. Wykres ciśnienia p_c elektrozaworu II w funkcji sygnału PWM dla różnych temperatur

4.2. Charakterystyka ciśnienia p_c wytwarzanego przez elektrozawór w funkcji prądu średniego

Jeśli przyjmuje się jako zmienną niezależną (na osi odciętych) prąd średni, charakterystyki wykonane dla różnych temperatur nakładają się – rysunek 12. Przyjęcie do opisu tej osi prądu średniego, a nie wartości PWM, uwzględnia nie tylko zakłócenie pochodzące od temperatury, ale również od zmian w napięciu zasilania cewki.

Potwierdzenie tej zależności, można również odnaleźć na rysunku 13, przedstawiającym siłę elektromagnesu przy różnych temperaturach.



Rys. 12. Wykres ciśnienia p_c w funkcji prądu średniego dla różnych temperatur

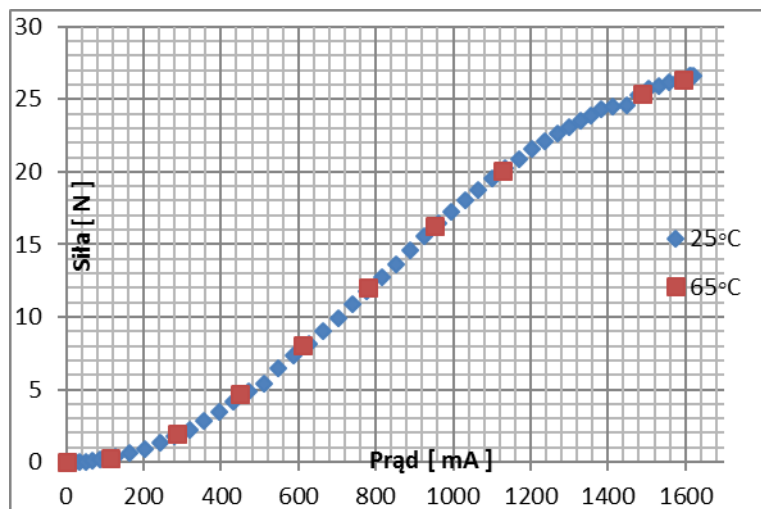
4.3. Siła elektromagnesu

Przeprowadzono testy w celu poznania siły generowanej przez elektromagnes dla elektrozaworu I. Próby przeprowadzono w temperaturze około 25°C oraz 65°C. Wyniki przedstawia rysunek 13. Ciekawym spostrzeżeniem jest brak wpływu temperatury na siłę generowaną przez cewkę, podczas gdy operuje się prądem średnim a nie sygnałem PWM- brak zauważalnej zmiany indukcyjności cewki.

Należy również zauważyć, że wykres nie ma charakteru prostoliniowego, szczególnie dla małych wartości prądu (wypełnienia). Trzeba pamiętać, że cewka ma nie tylko rezystancję, ale również reaktancję. To powoduje, że kształt krzywej jest zakłócony dla małych wartości prądu średniego (sygnału PWM), przez duży udział stanów przejściowych w stosunku do małego wypełnienia sygnału. Jednakże siłownik lub sprzęgło sterowane elektrozaworem często jest wyposażone w sprężynę zwrotną i w celu ruszenia z miejsca trzeba, by ciśnienie p_c osiągnęło wartość znacząco większą od zera- wtedy kształt krzywej dla mniejszych wartości nie odgrywa żadnej roli.

Właśnie z tego powodu (występowania sprężyny w samym elektrozaworze), podobne zjawisko zakrzywienia krzywych dla małych wartości PWM nie występuje w istotny sposób

w elektrozaworze II, co można zaobserwować na charakterystykach ciśnienia wyjściowego w funkcji zadawanego sygnału PWM, rys. 11.

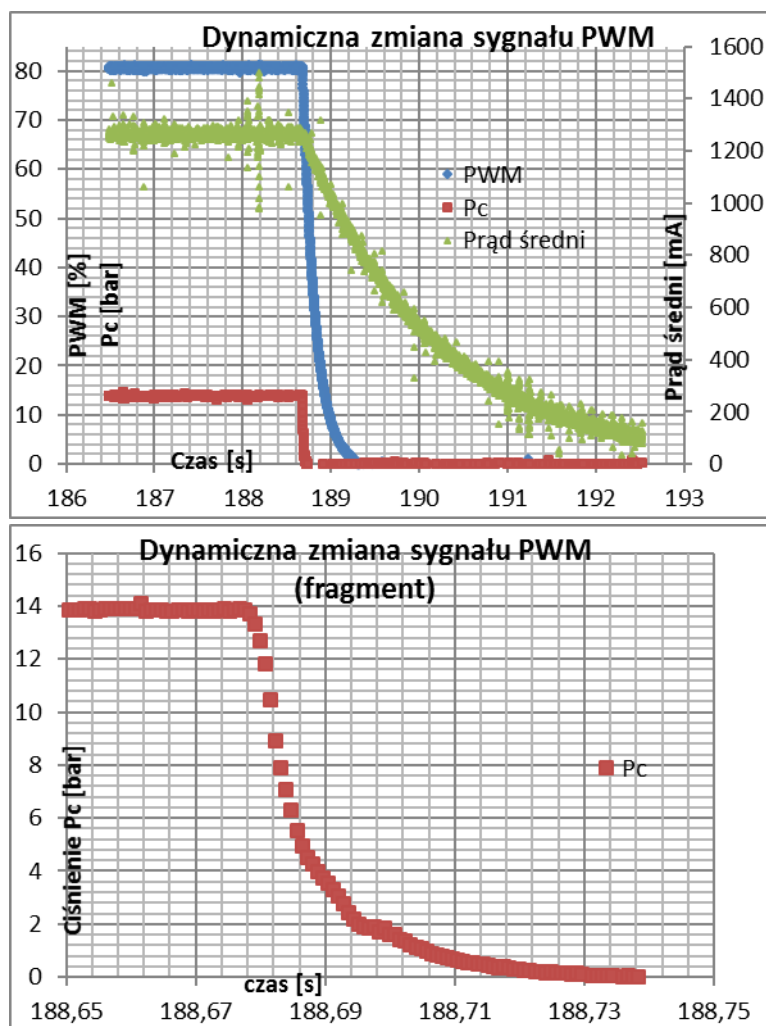


Rys. 13. Siła elektromagnesu w funkcji prądu średniego dla różnych temperatur dla elektrozaworu I

4.4. Czas reakcji elektrozaworu

W trakcie badań przeprowadzono testy dynamiczne. Reakcję elektrozaworu na zmianę sygnału sterującego w postaci skoku jednostkowego dla konstrukcji I prezentują wykresy na rysunku 14 (wykres dolny przedstawia powiększony fragment wykresu górnego). Na osi głównej należy odczytywać wartości sygnału PWM [%] oraz p_c [bar], a na osi pomocniczej prąd średni [mA]. Na osi odciętych podano czas w kolejnych sekundach.

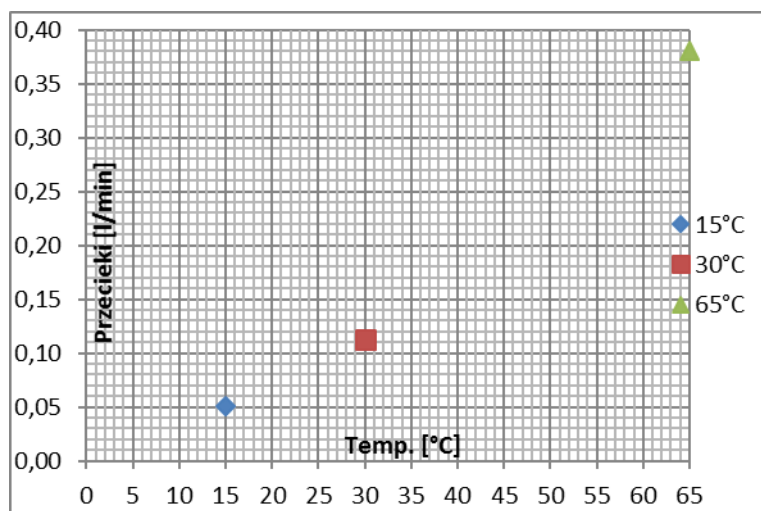
Zastosowany na stanowisku generator PWM pozwala wykonać skokową zmianę sygnału już w następnym okresie po wprowadzeniu zmiany zadawania, czyli po 0,003(3)s, gdy częstotliwość sygnału wynosi 300Hz (rys. 14). Pierwsze załamanie krzywej PWM(t) odpowiada skokowej zmianie PWM. To, że na wykresie przebieg PWM(t) przypomina wykładniczy, wynika z zastosowania analogowego miernika PWM, z konieczności uśredniającego ten skokowo zmienny sygnał (odpowiedź elektrozaworu, czyli ciśnienie p_c na wykresie zmienia się szybciej niż sygnał zadający PWM, co w rzeczywistości nie ma miejsca). Analogiczne zjawisko dotyczy wartości prądu średniego, uśrednianej ze stałą czasową wynoszącą około 1s.



Rys. 14. Wykresy gwałtownej zmiany zadawanego sygnału sterującego w elektrozaworze I

4.5. Przecieki w elektrozaworze

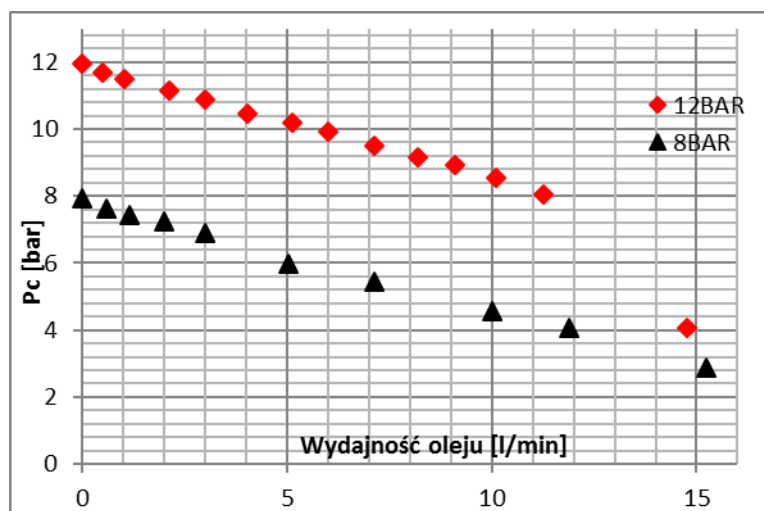
Wykres 15 przedstawia pomiary przecieków wewnętrznych w elektrozaworze I przy zasilaniu go ciśnieniem $p_s=15\text{bar}$ i przy ciśnieniu $p_c=0$, po uśrednieniu z kilku pomiarów. Widoczny jest znaczny wzrost przecieków wraz ze wzrostem temperatury oleju –z powodu zmniejszającej się jego lepkości.



Rys. 15. Zależność przecieków wewnętrznych w elektrozaworze I w różnych temperaturach

4.6. Możliwości regulacyjne elektrozaworu

Na rysunku nr 16 przedstawiono dwie serie pomiarowe dla elektrozaworu I. Przy ciśnieniu zasilania p_s wynoszącym 15 bar wysterowano ciśnienia kontrolne p_c na wartości 8 bar oraz 12 bar. Następnie stopniowo otwierano zawór zwiększając wydajność oleju, jak przedstawia to wykres 16. Należy zauważyć, iż dla ciśnienia $p_c=8$ bar punkty układają się w przybliżeniu w linii prostej. Nachylenie tej prostej wynika ze stałej sprężyny w elektromagnesie (zwiększanie ugięcia sprężyny, aby bardziej otworzyć kanał zasilający olejem o ciśnieniu p_s odbywa się kosztem spadku ciśnienia, co jest widoczne na wykresie jako pochylenie prostych utworzonych z punktów). Punkty dla ciśnienia p_c wynoszącego 12 bar, również układają się w linię prostą (poza ostatnim), obrazując zakres regulacji elektrozaworu. Ostatni punkt pomiarowy (tzn. o największej wydajności oleju) wyraźnie wskazuje na zakrzywienie wcześniejszej prostej. Jest to spowodowane faktem, iż kanał zasilania ciśnieniem oleju p_s został już całkowicie otwarty i dalszy przebieg charakterystyki nie zależy już od możliwości regulacyjnych zaworu (gdyż te się skończyły), lecz od oporów przepływu przez elektrozwór.



Rys. 16. Wykres ciśnienia p_c w funkcji wydajności oleju dla dwóch wartości ciśnienia p_s , ukazujący możliwości regulacyjne elektrozaworu I

4.7. Inne spostrzeżenia i uwagi

Po przeanalizowaniu zasady działania elektrozaworów dwóch różnych producentów, nasuwają się pewne wątpliwości odnośnie konstrukcji elektrozaworu oznaczonego jako rozwiązanie I. Wydaje się być zasadne przeniesienie w nim sprężyny z lewej strony suwaka (z trzpienia elektromagnesu), na prawo od suwaka. W ten sposób sprężyna zapewniałaby stały kontakt suwaka z trzpieniem elektromagnesu. W omawianym elektrozaworze brak tej sprężyny dopuszcza sytuację, gdy trzpień jest cofnięty, a suwak nie, co nie zapewnia stałego kontaktu trzpień-suwak, gdyż jedynym powodem dla którego przesuwają się on w lewo jest siła wywierana od ciśnienia sprężenia zwrotnego w komorze F (rysunek 6). W trakcie badań zauważono zjawisko polegające na tym, iż podczas powolnego zmniejszania wartości sygnału PWM (a więc ciśnienia p_c) utrzymywało się pewne ciśnienie resztkowe, które nie było w stanie dalej cofnąć suwaka. Zastosowanie sprężyny po prawej stronie od suwaka dopychałoby go w lewo, zapewniając stały kontakt z trzpieniem elektromagnesu.

5. Wnioski

Na podstawie wykonanych badań zaproponowano zmianę w konstrukcji zaworu I polegającą na zastosowaniu sprężyny zapewniającej kontakt trzpienia cewki elektromagnesu z suwakiem, a tym samym jednoznaczność jego położenia w każdym przypadku.

Ponadto na podstawie zaprezentowanych wyników badań elektrozaworu I można wysnuć następujące wnioski dotyczące ogółu tego typu elektrozaworów, ze względu na uniwersalność prawidłowości fizycznych:

- korzystniejszym jest dla powtarzalności sterowania w różnych temperaturach operowanie wartością prądu średniego, a nie wartością sygnału PWM. Należy zwrócić uwagę, iż przy zapewnieniu stałej temperatury oleju, cewka nagrzewa się pod wpływem przepływającego przez nią prądu, co powoduje zmianę rezystancji uzwojenia

- czas przesterowania tego typu elektrozaworów jest bardzo krótki i w typowych zastosowaniach w branży motoryzacyjnej może zostać pominięty
- przecieki własne elektrozaworu zależą w sposób znaczny od temperatury oleju a ich wartość jest niepomijalnie duża.

Literatura:

- [1] Agnihotri P, Kaabouch N, Salehfar H, Wen-Chen HU. FPGA-based combined PWM-PFM technique to control DC-DC converters. North American Power Symposium (NAPS), 2010 IEEE Conference .Sept. 2010, ISSN:978-1-4244-8046-3. pp.1-6.
- [2] Barr M. Pulse Width Modulation. Embedded Systems Programming, September 2001, pp. 103-104.
- [3] BOSCH. Elektroniczne sterowanie skrzynką biegów ESG. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2005.
- [4] Boumâarafa A, Mohamadib T, Messaic N. Improving of the Generation Method of Repeated PWM Based on the Signals Combinations Applied to a PV Pumping system. Energy Procedia 74, 2015, ss. 320 – 330.
- [5] Carmela Di Piazza M, Pucci M. Techniques for efficiency improvement in PWM motor drives. Electric Power Systems Research, Volume 136, July 2016. pp. 270–280.
- [6] Gaballah, M, El-Bardini M. Low cost digital signal generation for driving space vector PWM inverter. Ain Shams Engineering Journal, Volume 4, Issue 4, December 2013, pp. 763–774.
- [7] Goszczak J, Radzymiński B, Werner A, Pawelski Z. Badania samochodowego elektrozaworu sterowanego sygnałem PWM, Logistyka, nr 3/2015, s.1562–1572.
- [8] Koutroulis E, Dollas A, Kalaitzakis K. High-frequency pulse width modulation implementation using FPGA and CPLD ICs. Journal of Systems Architecture 52 (2006). pp. 332–344.
- [9] Muntean N, Gavris M, Cornea O. Dual input hybrid DC-DC converters. EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON), 2011 IEEE: Conference. 27-29 April 2011, ISSN 978-1-4244-7486-8. pp. 1-4.
- [10] Nouman Z, Klima B, Knobloch J. Generating PWM Signals With Variable Duty From 0% to 100% Based FPGA SPARTAN3AN. ElevtroRevue. VOL. 4, NO.4, DECEMBER 2013.
- [11] Taghizadeh M, Ghaffari A, Najafi F. Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications. Mecanique 337, 2009, pp. 131–140.
- [12] Available from: <http://www.mikrokontrolery.org/artykuly/elektronika/130-pwm-modulacja-szerokoci-impulsu> [cited 2016 Nov 2]
- [13] Available from: [http://www.nidectosok.co.jp/english/products/car_parts/products_lineup.html#\\$3](http://www.nidectosok.co.jp/english/products/car_parts/products_lineup.html#$3) [cited 2016 Nov 2]
- [14] Strona internetowa firmy Sonnax - dostawcy cewek elektrycznych do elektrozaworów. <http://www.sonnax.com/parts/3497>