

# **Ferrociecze. Propagacja fal ultradźwiękowych w nasyconym ferro-cieczą miękkim magnetycznie materiale porowatym.**

Katarzyna Kazimierska-Drobny,  
Jacek Konop,  
Bartosz Nowak.

Praca napisana pod kierunkiem  
**profesora Józefa Kubika**  
w ramach Kursu Ekspertkiego  
Smart–Technology Expert School  
organizowanego przez  
IPPT – PAN.

## WSTĘP

Ciecze magnetyczne są zawiesinami koloidalnymi, których podstawowe właściwości mechaniczne i magneto-elektryczne zależą od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego. O ile dość dobrze znane są wyniki dotyczące zachowania się samej cieczy, niewiele jest prac informujących o właściwościach nasyconych tymi cieczami niemagnetycznych lub magnetycznych materiałów porowatych.

W ramach projektu zaprojektowano i zbudowano oryginalne stanowisko do badań hydrodynamicznych i akustycznych cieczy magnetycznych oraz nasyconych takimi cieczami materiałów porowatych. Zasadnicze znaczenie miało odpowiednie dobranie parametrów komory pomiarowej, którego budowa umożliwia konieczne do prowadzenia rzetelnych pomiarów próżniowe nasycanie porowatych próbek. Z uwagi na wysoki koszt elektromagnesu z rdzeniem metalowym do testów w zakresie niższego pola zaprojektowano i wykonano cewkę Helmholtza. Testy kalibracyjne tej cewki potwierdziły przestrzenną stałość pola oraz indukcję do około 100mT.

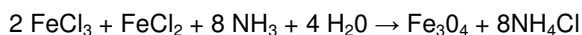
Badania akustyczne pozwoliły wyznaczyć ilościowy wpływ pola magnetycznego na amplitudę i fazę fal przechodzących przez nasycony cieczą magnetyczną materiał porowaty. Ze wzrostem natężenia pola poniżej nasycenia magnetycznego zaobserwowano istotny spadek amplitudy fali. Spadek ten jest szczególnie wyraźny dla niższych częstotliwości fal. Zaobserwowane zmiany prędkości propagacji przy różnych natężeniach są nieznaczne.

Przeprowadzone pomiary hydrodynamiczne (przepływu) pokazały, że wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego istotnie rośnie ciśnienie cieczy przed próbką, przez którą płynie ciecz magnetyczna. Wzrost ten zależy od natężenia, kierunku i historii zmian pola. Jednocześnie wyraźny jest proporcjonalny wzrost ciśnienia w wyniku wzrostu prędkości przepływu. Interpretacja badań przepływu pozwoliła na wyciągnięcie wniosku o zależności lepkości od natężenia i kierunku pola. Opracowane procedury i wykonane układy pomiarowe będą wykorzystywane w dalszych pracach z cieczami i nasyconymi cieczami magnetycznymi materiałami

## 1. WYTWARZANIE CIECZY MAGNETYCZNEJ. BADANIA MAGNETYCZNE

W ramach niniejszej pracy przygotowanie własnej cieczy magnetycznej oparto na procedurze opisanej w czasopiśmie "Chemical Education", Vol. 76, 943 (1999) [1]. Synteza ferro-cząstek bazuje na reakcji łączenia jonów żelaza (II) i żelaza (III) w obecności amoniaku rozpuszczonego w wodzie destylowanej.

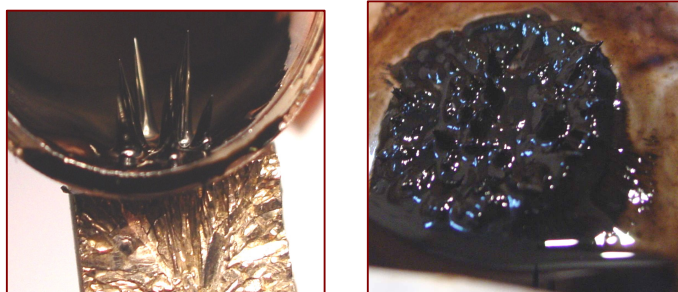
Reakcja chemiczna zachodzi według równania:



gdzie reagentami są:  $\text{FeCl}_3$  – chlorek żelaza trój wartościowego (Fe III);  $\text{FeCl}_2$  – chlorek żelaza dwu wartościowego (Fe II);  $\text{NH}_3$  – amoniak;  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – magnetyt;  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – chlorek amonu

W celu nie dopuszczenia do aglomeracji cząsteczek magnetycznych do roztworu dodaje się surfaktant – w postaci roztworu wodorotlenku cztero–metyloamoniowego –  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$

Syntezę magnetytu rozpoczyna się od dodania 8 ml 1M (jedno – molowego) roztworu chlorku żelazowego –  $\text{FeCl}_3$  i 2 ml 2M (dwa – molowego) roztworu chlorku żelazowego  $\text{FeCl}_2$  do kolbki o pojemności 250 ml, umieszczonej na uruchomionym mieszadle magnetycznym. Następnie do kolbki bardzo wolno (ok. 5 min) miareczkuje się 100 ml 1M roztworu uwodnionego amoniaku. Po zakończeniu miareczkowania wyłącza się mieszadło, usuwa mieszadelko a ciecz pozostawia się do sedimentacji. Po upływie kilkunastu minut odlewa się odcedzoną wodę od substancji pozostałej na dnie, którą dalej przelewa się do plastikowego naczynka umieszczonego na magnesie. W ostatnim etapie dodaje się 2 – 4 ml roztworu 25 % wodorotlenku cztero – metyloamoniowego –  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ . Po wymieszaniu cieczy szklaną bagietką na jej powierzchni powinny pojawić się jeże jak na rys. 1.1, będące potwierdzeniem uzyskania substancji magnetycznej.



**Rys. 1.1.** Zdjęcie tworzących się "jeży" na powierzchni cieczy pod wpływem przyłożonego magnesu

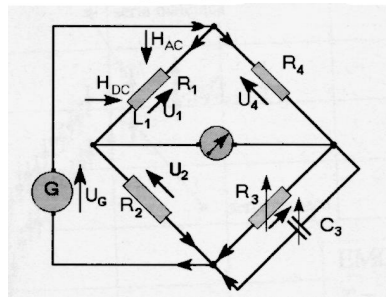
Pomiar właściwości magnetycznych został przeprowadzony wykorzystując aparaturę i metodę opracowaną w Instytucie Akustyki Molekularnej na Uniwersytecie Adama Mickiewicza w Poznaniu [6], wykorzystujący Mostek Maxwella - Wiena do wyznaczenia podatności magnetycznej cieczy magnetycznej przedstawiony na rysunku 1.2.

W pomiarach wykorzystano następujące urządzenia: Teslomierz typ RX 21-Teslometer; Układ sterujący polem magnetycznym z elektromagnesem (o zakresie 500 mT – 1T): Magnet Power Supply typ PZP 8005, Wyprodukowany w Zakładzie Doświadczalno – Produkcyjnym Radiopan PAN.

*W doświadczeniu zmierzono następujące wielkości:*

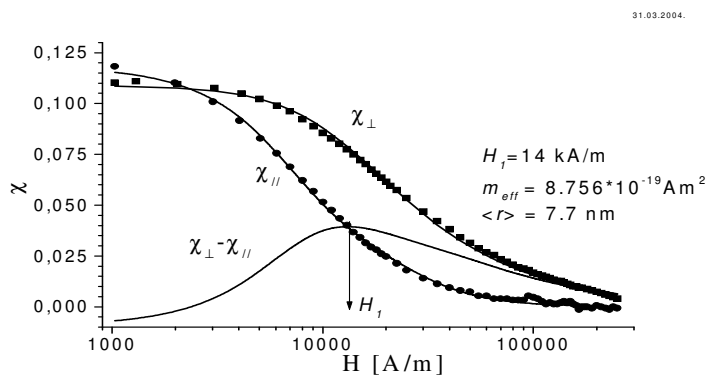
1. Indukcyjność pustej cewki oraz wypełnionej cieczą magnetyczną

2. Dobroć pustej cewki oraz wypełnionej cieczą magnetyczną
3. Indukcję pola w szczelinie bez uruchomienia elektromagnesu
4. Zmianę indukcyjności oraz dobroci cieczy magnetycznej w funkcji natężenia pola magnetycznego w ustawieniu cewki pomiarowej (solenoidu) równoległym lub prostopadłym w stosunku do stałego pola magnetycznego.



**Rys. 1.2** Mostek do wyznaczania podatności magnetycznej ferro –cieczy [6]

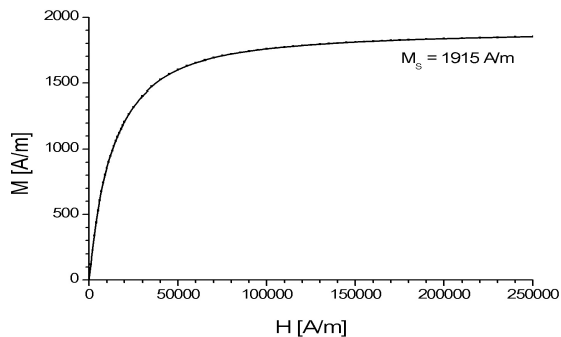
Na podstawie danych pomiarowych wykreślono krzywą Langevina pokazaną na rys. 1.3 oraz krzywą podatności magnetycznej zobrazowaną na rys. 1.4



**Rys. 1.3** Wykres krzywej Langevina

Z krzywej Langevina odczytano wartość natężenia pola magnetycznego dla maksimum funkcji  $f(\xi) = \chi_{\perp}(\xi) - \chi_{\parallel}(\xi)$  wynoszącą  $H_1 = 14 \text{ kA/m}$  a następnie wyliczono moment efektywny cząstki dipolowej, który w tym przypadku wynosi  $m_{\text{eff}} = 8,756 \cdot 10^{-19} \text{ Am}^2$ , oraz średni promień cząstek magnetycznych, który wynosi:  $r = 7,7 \text{ nm}$ .

Znając przebieg krzywej Langevina, wykonano wykres podatności magnetycznej.



**Rys. 1.4** Wykres krzywej namagnesowania



## 2. BADANIA AKUSTYCZNE

Do pomiaru oddziaływania pola magnetycznego na propagację fal ultradźwiękowych wykorzystano metodę impulsową przepuszczania fal podłużnych. Do wytwarzania i detekcji sygnału użyto szerokopasmowych głowic 1MHz i 2MHz, zamontowanych w komorze pomiarowej, generujących i odbierających sygnał impulsowy. Badania przeprowadzono w stałym polu magnetycznym o natężeniu zmiennym skokowo, odpowiadającym indukcji od 0 do 550 mT. Materiały użyte do badań to ciecz ferromagnetyczna wytworzona w Instytucie Mechaniki Środowiska i Informatyki Stosowanej oraz materiał porowaty magnetycznie miękki (rys. 2.1). Materiał ten jest spiekem proszków, który w formie wypraski posiada kształt walca o średnicy  $d = 17$  mm i wysokości  $h = 10$ . Porowatość materiału wynosi ok. 50 procent. Na podstawie badań dyfraktometrycznych ustalono, że jest to układ wielofazowy, gdzie dominującą fazę stanowi żelazo alfa. Inne składniki (Si, WC, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, W<sub>2</sub>C) występują w formie domieszkowej w ilości poniżej 20%.



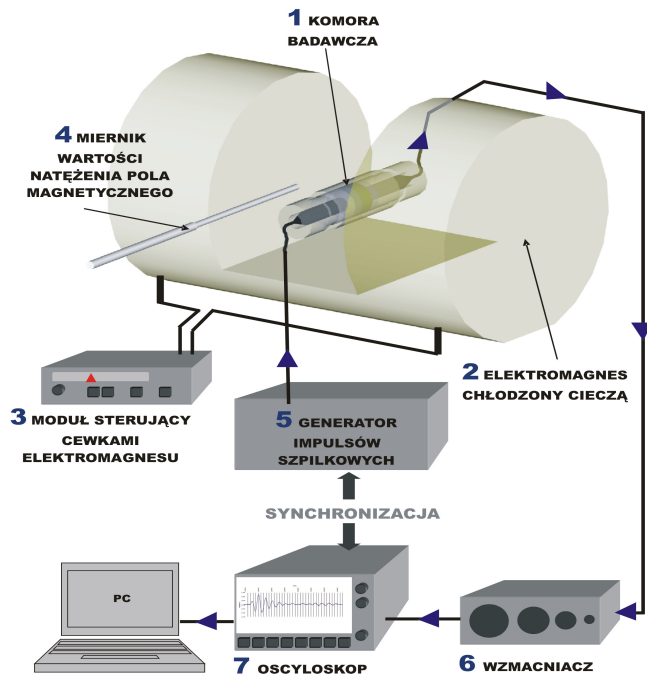
**Rys. 2.1** Materiały do badań

### **Stanowisko pomiarowe**

Do podstawowych elementów stanowiska pomiarowego pokazanego na rys. 2.2 należą: komora badawcza (1), elektromagnes (2), moduł sterujący cewkami elektromagnesu (3), miernik wartości natężenia pola magnetycznego (4), generator fal (5), wzmacniacz sygnału (6), oscyloskop (7) oraz urządzenie rejestrujące. Komora badawcza wykonana na potrzeby niniejszych badań stanowi konstrukcję składaną wykonaną z mosiądzu. Otwory wykonane w obudowie umożliwiają stabilne zamontowanie głowic pomiarowych. Konstrukcja komory umożliwia nasycenie próżniowe cieczą magnetyczną umieszczonych w niej materiałów porowatych

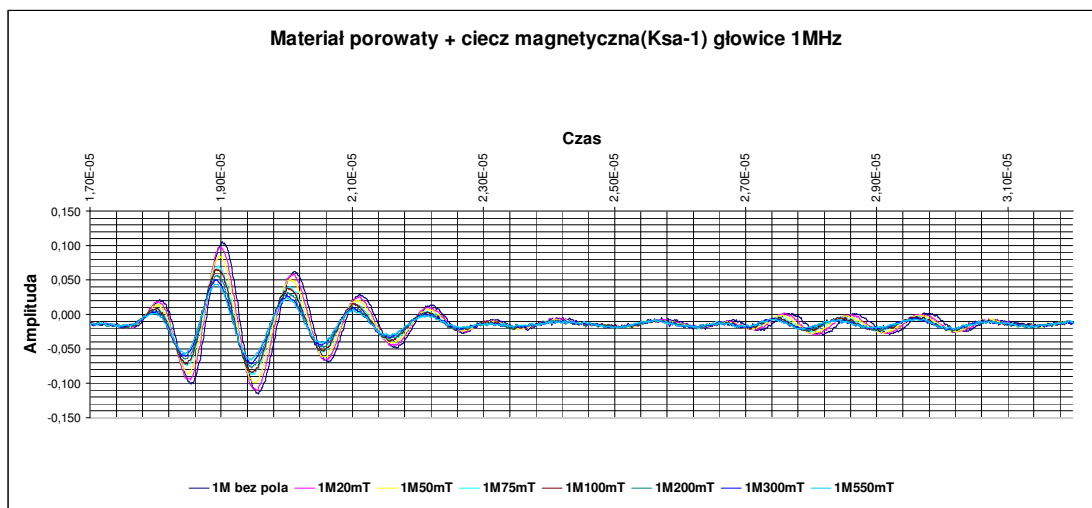
### **Wyniki badań**

W pierwszym etapie badań akustycznych rejestrowano przebieg amplitudowo-czasowy sygnału ultradźwiękowego propagującego się w materiale porowatym nasyconym cieczą magnetyczną dla sygnału generowanego głowicą 1MHz oraz głowicą 2MHz. Badania przeprowadzono w stałym polu magnetycznym o natężeniu zmiennym skokowo, odpowiadającym indukcji 0, 25, 50, 75, 100, 200, 550 mT. Pomiary realizowano najpierw w kierunku narastania pola a następnie w kierunku odwrotnym. W następnym etapie, dla porównania uzyskanych rezultatów badań obserwowano propagację fal ultradźwiękowych w samej cieczy magnetycznej.



**Rys. 2.2** Schemat stanowiska pomiarowego

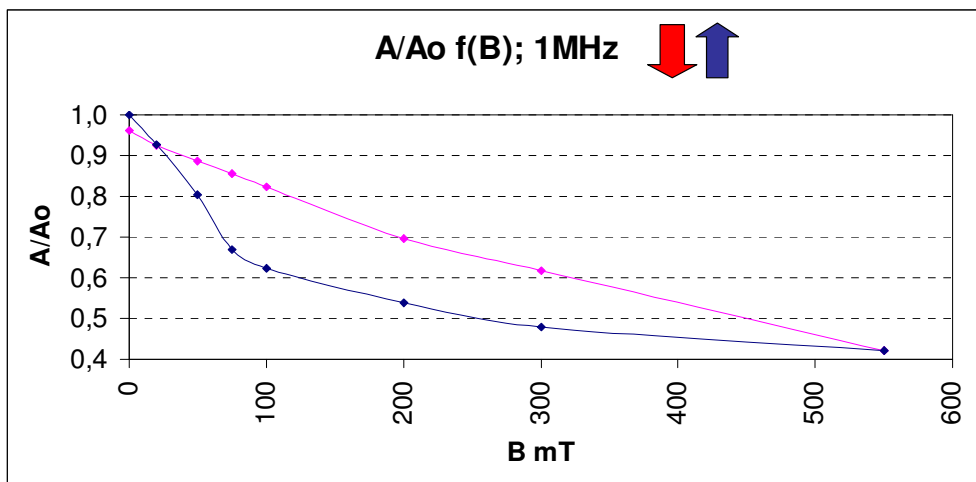
Na wykresie 2.3 przedstawiono przebieg amplitudowo-czasowy sygnału ultradźwiękowego generowanego głowicą 1MHz w magnetycznie miękkim materiale porowatym nasyconym cieczą magnetyczną. Z przebiegu amplitudowo-czasowego wynika, że ze wzrostem wartości indukcji pola magnetycznego następuje znaczne zmniejszenie amplitudy fal przechodzących (do 42% dla głowic 1MHz). Wskazuje to na wzrost współczynnika tłumienia, prawdopodobnie spowodowany „usztynieniem” układu ciecz magnetyczna + porowaty materiał magnetycznie miękki. Dowodem tego jest wzrost prędkości propagacji fali ze wzrostem indukcji pola magnetycznego, oraz związane z tym efektem przesunięcia wierzchołków lokalnych maksimum i minimum przebiegu - szczególnie widoczne dla przebiegu fali odbitej.



**Rys. 2.3** Przebieg amplitudowo-czasowy sygnału ultradźwiękowego w materiale porowatym nasyconym cieczą magnetyczną.

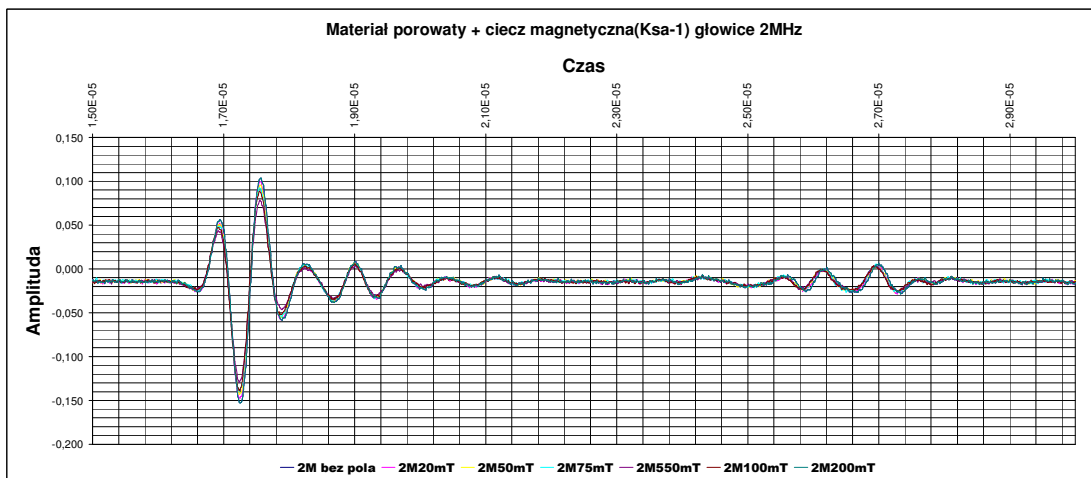
Na rysunku 2.4 przedstawiono względną zmianę amplitudy sygnału ultradźwiękowego w funkcji indukcji pola magnetycznego przy narastającym oraz malejącym natężeniu pola. Jak wynika z przedstawionego

poniżej wykresu, zarówno przy zwiększaniu jak i przy zmniejszaniu indukcji pola magnetycznego występują zasadnicze różnice w charakterze kształtu amplitudy. Przy zwiększaniu indukcji pola magnetycznego na wykresie względnej zmiany amplitudy sygnału ultradźwiękowego wyróżnić można dwie fazy: pierwszą (1) do ~100 mT, charakteryzującą się zdecydowaną zmianą własności ośrodka w którym propagują się fale ultradźwiękowe oraz drugą fazę (2) w zakresie od 100÷550 mT gdzie zmiany zachodzą mniej intensywnie. Zjawisko występowania pierwszej fazy można najprawdopodobniej wiązać ze zjawiskiem formowania się klastrów w cieczy magnetycznej podczas gdy faza druga jest etapem magnetycznego nasycania się zarówno cieczy magnetycznej jak i miękkiego ferromagnetyka. Ponadto druga faza może być etapem ustabilizowania się procesu powstawania klastrów na określonym poziomie, w następstwie czego odnotowuje się spadek intensywności zmian własności mechanicznych ośrodka. Dalsze zmiany własności zachodzą do granicy ok. 550 mT po przekroczeniu której nie odnotowano już żadnych reakcji (tzn. w osiąganym przez stanowisko pomiarowe zakresie indukcji do 1T i zmian w granicach 1%).



Rys. 2.4 Zestawienie zmian amplitudy sygnału spowodowanych zmianą indukcji magnetycznej

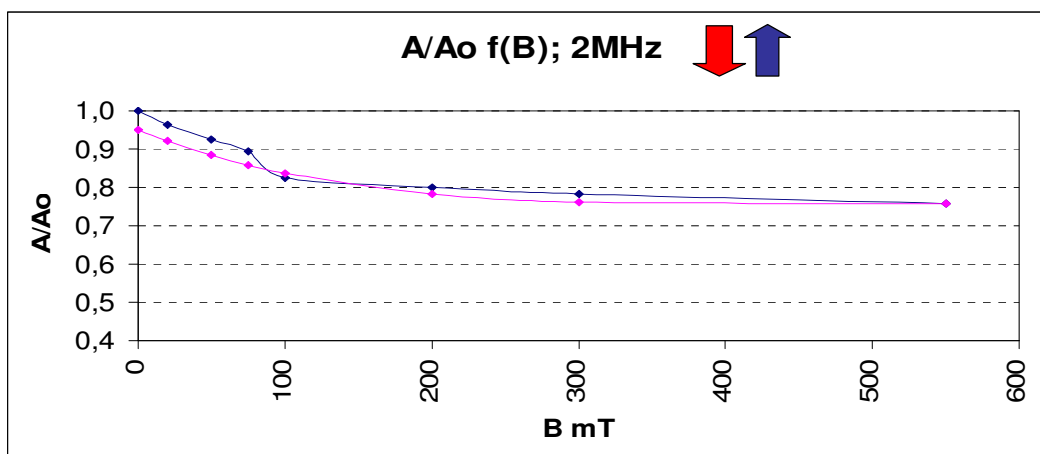
Na rysunku 2.5 przedstawiono przebieg amplitudowo-czasowy oraz wykres względnej zmiany amplitudy sygnału ultradźwiękowego generowanego głowicą 2 MHz.



Rys. 2.5 Przebieg amplitudowo-czasowy sygnału ultradźwiękowego w materiale porowatym nasyconym cieczą magnetyczną.

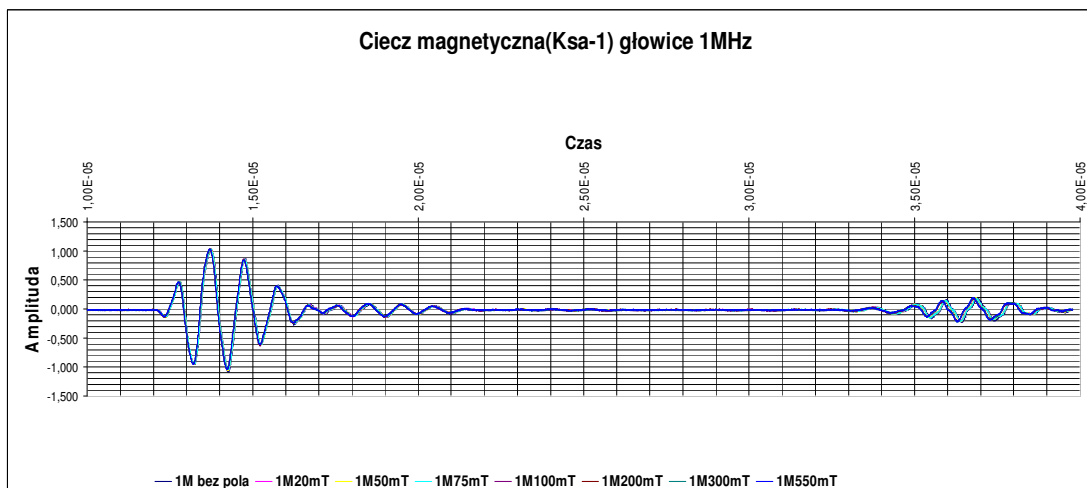
W przypadku badania przeprowadzanego głowicami 2MHz jak dla głowicy 1 MHz warunki przeprowadzania pomiarów były identyczne i jakościowo otrzymano podobne wyniki. Jak wynika z wykresu 2.5 dla głowic 2MHz zanotowano jednak istotnie mniejsze zmiany własności mechanicznych badanego ośrodka (zmiana wartości amplitudy maksymalnie do 76%), w szczególności mniejszy wpływ zmian pola magnetycznego na propagację fal ultradźwiękowych. Wskazują na to także mniejsze (w porównaniu z pomiarem głowicami 1MHz) zmiany prędkości propagacji fali. Stąd wydaje się, że do określania zmian parametrów propagacji fali w badanym ośrodku bardziej „czuła” jest metoda z użyciem głowic 1MHz.

Na wykresach względnej zmiany amplitudy sygnału ultradźwiękowego w funkcji indukcji pola magnetycznego przy narastającym oraz malejącym natężeniu pola magnetycznego (rys 2.6), tak jak w przypadku pomiarów dokonywanych głowicami 1MHz wyróżnić można „etap” do 100 mT w którym zmiana amplitudy przebiega bardziej intensywnie by następnie łagodnie osiągnąć wartość maksymalną. Około 90% zmiany amplitudy przebiega w zakresie zmiany wartości indukcji od 0 do 100 mT przy czym wyraźny wzrost prędkości zmian następuje dla zakresu od 75 do 100 mT. Podobne zachowanie ośrodka odnotowano przy pomiarach głowicami 1MHz.



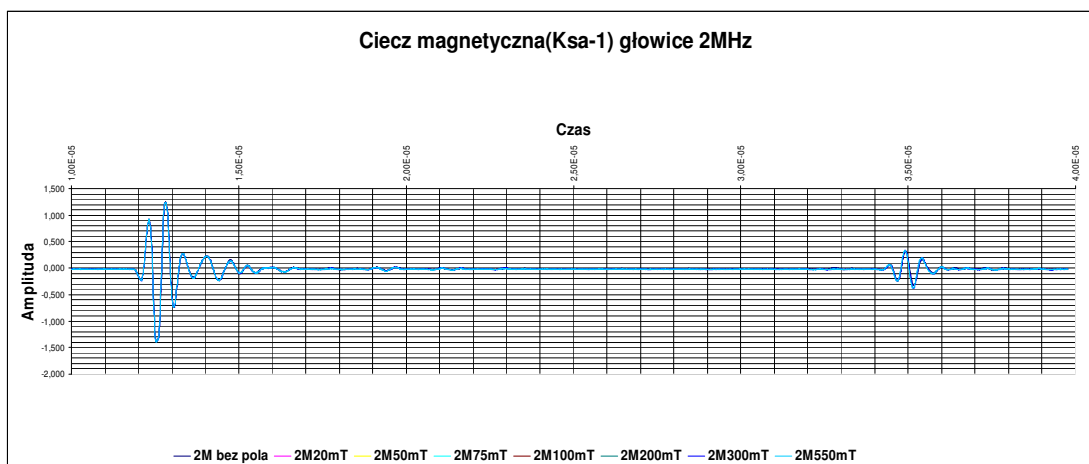
Rys. 2.6 Zestawienie zmian amplitudy sygnału spowodowanych zmianą indukcji magnetycznej

Dla porównania wyników badań realizowanych dla układu ciecz magnetyczna – materiał porowaty, przebadano propagację fal ultradźwiękowych w samej cieczy magnetycznej dla sygnału generowanego głowicą o częstotliwości 1 MHz (rys. 2.7) oraz o częstotliwości 2 MHz (rys. 2.8).



Rys. 2.7 Przebieg amplitudowo-czasowy sygnału ultradźwiękowego w cieczy magnetycznej. Sygnał generowany głowicą 1MHz

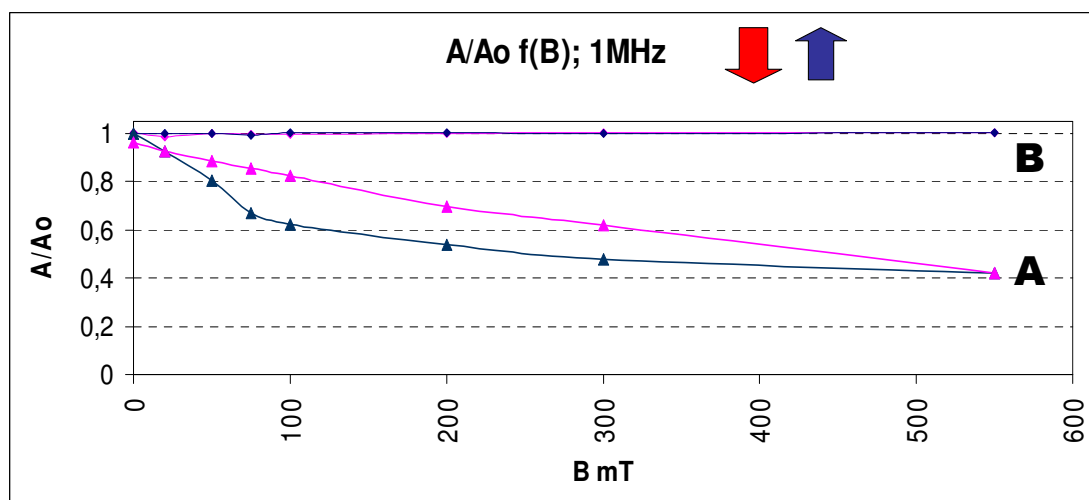




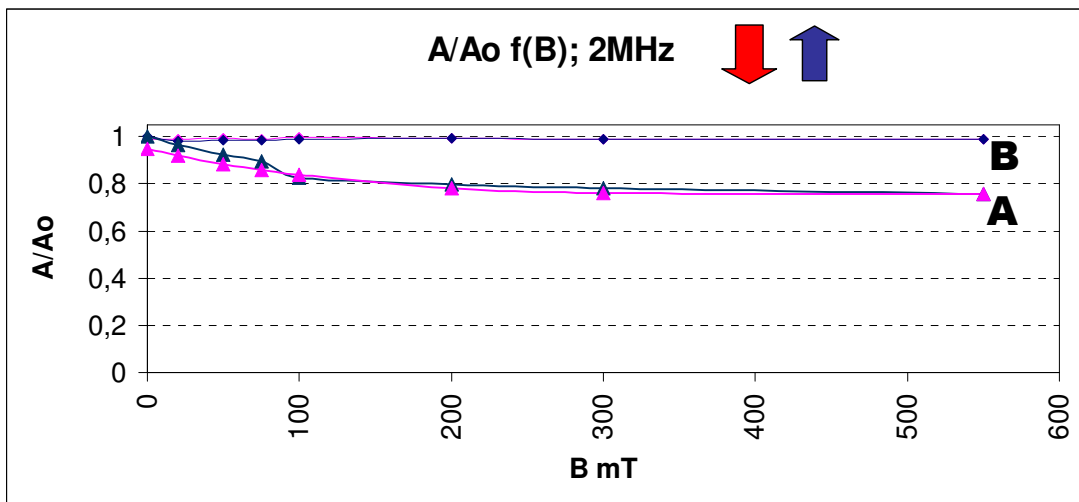
**Rys. 2.8** Przebieg amplitudowo-czasowy sygnału ultradźwiękowego w cieczy magnetycznej. Sygnał generowany głowicą 2 MHz

W stosunku do pomiarów wykonywanych dla porowatego spieku magnetycznie miękkiego nasyconego cieczą magnetyczną obserwowane zmiany amplitudy są nieznaczne. Rejestrowane zmiany zachodzą w granicach 0,4%. Charakterystyczny jest wzrost prędkości propagacji fali ultradźwiękowej ze wzrostem indukcji. Zmianę prędkości w podobnym zakresie zarejestrowano także dla układu ciecz + materiał porowaty. Wynika z tego, że największy wpływ na zmianę prędkości propagujących się fal mają zmiany własności cieczy magnetycznej.

Na rysunku 2.9 oraz 2.10 przedstawiono kolejno względną zmianę amplitudy w funkcji indukcji magnetycznej przy narastającym i malejącym natężeniu pola magnetycznego przy zastosowaniu głowicy 1 MHz i 2 MHz przy czym dla porównania poniższy wykres zostały zestawione w odniesieniu do wyników propagacji fali w układzie materiał porowaty-ciecz magnetyczna.



**Rys. 2.9** Zestawienie zmian amplitudy sygnału spowodowanych zmianą indukcji magnetycznej dla:  
**A** - układu ciecz magnetyczna + materiał porowaty  
**B** - cieczy magnetycznej  
 Pomiar dokonywany głowicami 1MHz.



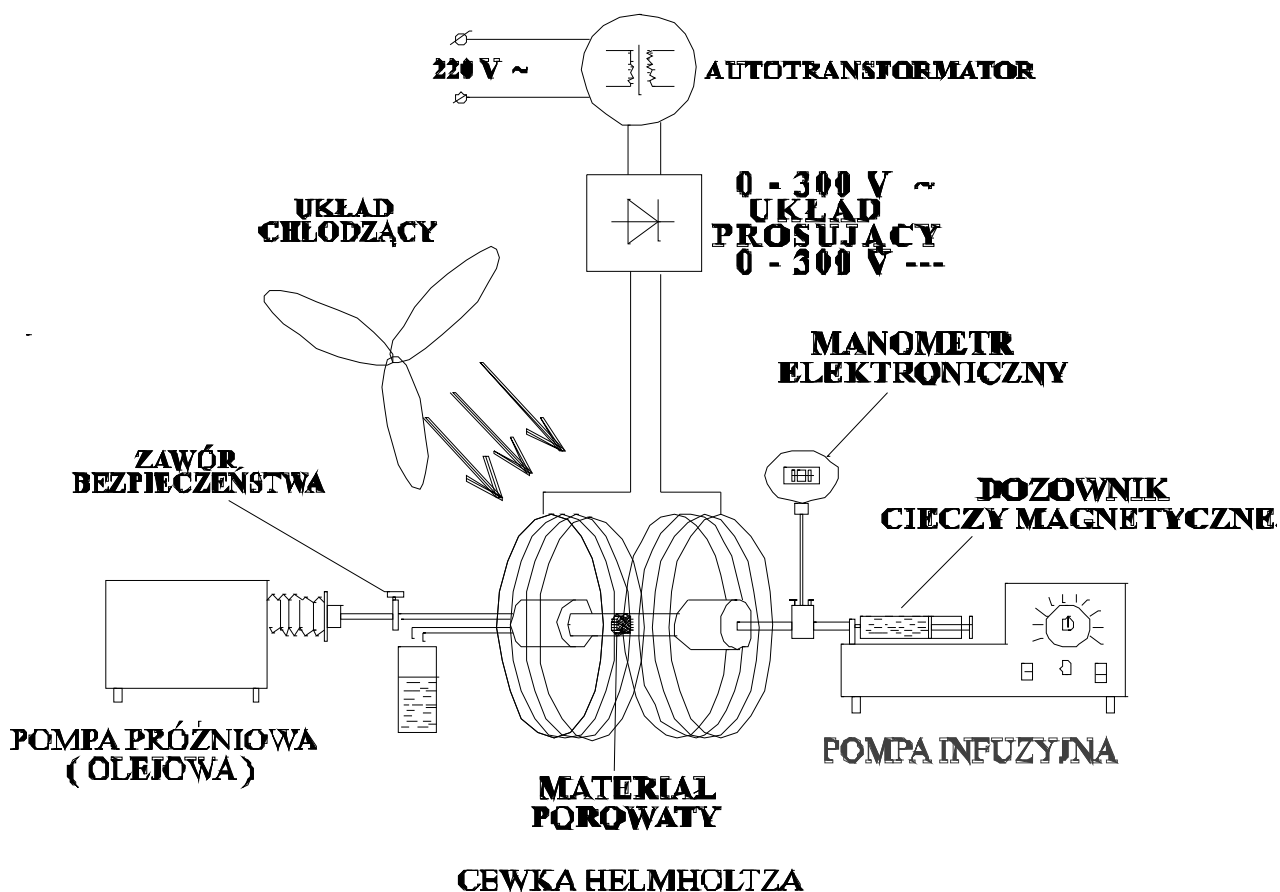
**Rys. 2.10** Zestawienie zmian amplitudy sygnału spowodowanych zmianą indukcji magnetycznej dla:  
**A** - układu ciecz magnetyczna + materiał porowaty  
**B** - cieczy magnetycznej  
 Pomiar dokonywany głowicami 2MHz.

Zarówno w przypadku badań głowicami 1 MHz jak i 2 MHz zarejestrowane zmiany amplitudy przechodzących fal ultradźwiękowych w samej cieczy magnetycznej mają charakter marginalny w porównaniu ze zmianami rejestrowanymi dla układu ciecz + materiał porowaty. Ze względu na niedoskonałości układu pomiarowego trudna jest interpretacja przebiegu zmian w cieczy. Po wyeliminowaniu elementów mogących mieć wpływ na rejestrowane zmiany (niedoskonałości stanowiska pomiarowego) zostaną przeprowadzone badania w ilości pozwalającej na statystyczne ujęcie wyników co być może pozwoli na obiektywną interpretację zmian zobrazowanych na powyższych rysunkach.

### 3. BADANIA HYDRODYNAMICZNE

Do pomiaru oddziaływania pola magnetycznego na zachowanie cieczy magnetycznej podczas przepływu przez niemagnetyczny materiał wykorzystano metodę badania przepuszczalności ze stałym wydatkiem cieczy. Badana próbka materiału porowatego została wykonana przez spiekanie szklanych kulek o kontrolowanej na drodze przesiewania średnicy (metoda przygotowania próbek została wcześniej opracowana w IMSiS).

Próbkę umieszczono w głowicy o kształcie cylindrycznym, w której istnieje możliwość wytworzenia próżni celem nasycenia materiału porowatego cieczą magnetyczną. Układ z próbką umieszczono wewnątrz cewki Helmholtz'a wytwarzającej jednorodne stałe pole magnetyczne - Rys. 3.1.



Rys. 3.1 Układ pomiarowy do badań cieczy magnetycznej w materiale porowatym

Dozowanie cieczy magnetycznej (przygotowanej w IMSiS) przepływającej przez materiał porowaty dokonano za pomocą pompy infuzyjnej o stałym wydatku (Harvard Apparatus). Dla określenia wpływu pola na zachowanie się cieczy rejestrowano spadek ciśnienia przed próbką.

#### Wyniki badań

W celu określenia wpływu kontrolowanych czynników takich jak: wielkość pola magnetycznego, jego kierunek i sekwencja zmian oraz wpływ prędkości przepływu na zmiany ciśnienia cieczy przepływającej poprzez próbkę został przeprowadzony następujący cykl pomiarów:

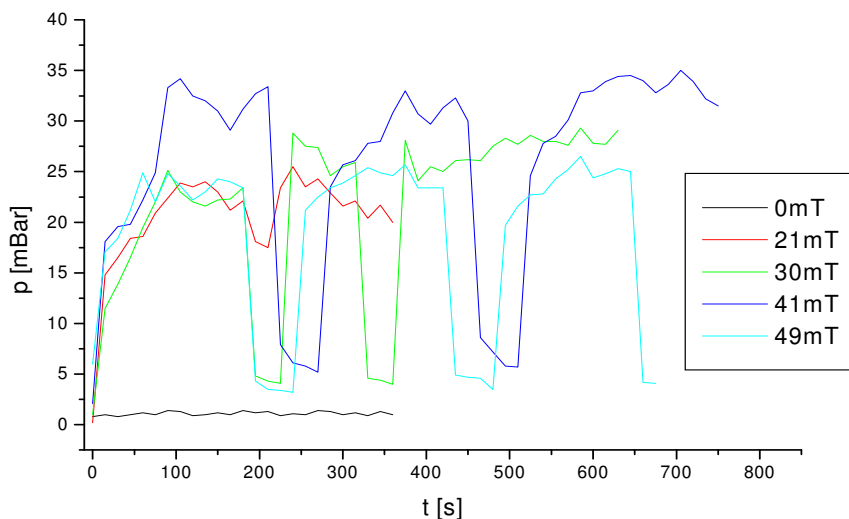
- Przepływ zorientowany w podłużnym polu magnetycznym,

- pomiar zmian ciśnienia cieczy przy różnych natężeniach pola,
- pomiar zmiany ciśnienia przy wybranych sekwencjach zmian natężenia pola,
- pomiar ciśnienia przy różnej prędkości dozowanej cieczy,
- Przepływ zorientowany w poprzecznym polu magnetycznym,
  - pomiar ciśnienia przy różnej prędkości dozowanej cieczy
  - pomiar zmiany ciśnienia przy zmianie natężenia pola.

Wyniki pomiarów i ich dyskusję zamieszczono poniżej.

## 1. Przepływ zorientowany w podłużnym polu magnetycznym

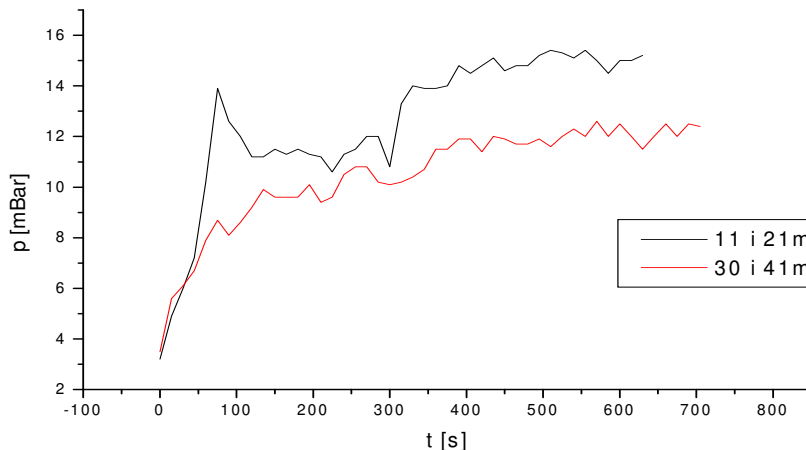
### 1.1. Pomiar zmian ciśnienia cieczy przy różnych natężeniach pola, Rys. 3.2.



**Rys. 3.2** Przebiegi zmian ciśnienia przed próbka w podłużnym polu dla różnego natężenia

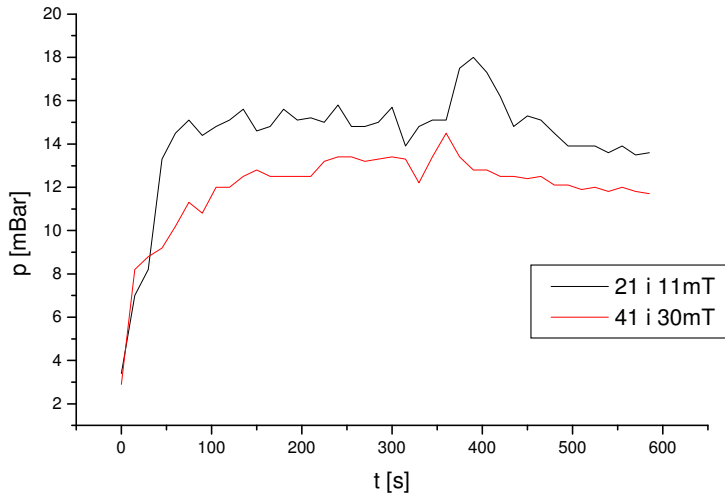
Wyraźne spadki ciśnienia podczas przepływu są spowodowane celowym odłączeniem przyłożonego pola w celu uzyskania powtarzalności pomiaru. Każdy z pomiarów dla danego pola był przeprowadzony niezależnie ale przy tej samej objętości dozowanej cieczy (zakres 5)

### 1.2 pomiar zmiany ciśnienia przy zmianie natężenia pola, Rys. 3.3.



**Rys. 3.3** Przebiegi zmian ciśnienia przed próbka w podłużnym polu dla różnych sekwencji natężenia pola

Na wykresie pokazanym na Rys.3.3 zestawiono dwie oddzielne serie pomiarowe w trakcie których nastąpił wzrost natężenia pola po upływie 5min – linia czarna i 6min – linia czerwona.

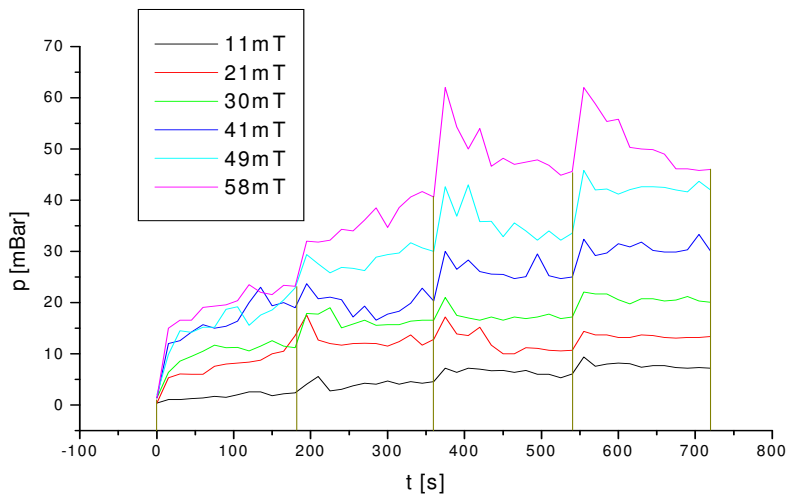


**Rys. 3.4** Przebiegi zmian ciśnienia przed próbka w podłużnym polu dla różnego natężenia

Z kolei dla porównania na Rys. 3.4 zestawiono dwie oddzielne serie pomiarowe, w trakcie których nastąpiło zmniejszenie natężenia pola po upływie 6min – linia czarna i 6min – linia czerwona. Wszystkie powyższe pomiary zostały wykonane dla stałej objętości dozowania  $V = 0.014 \text{ cm}^3/\text{s}$  ( Zakres 5 pompy infuzyjnej).

### 1.3 Pomiar zmian ciśnienia pod wpływem zmiany ilości dozowanej cieczy

Wykres pokazany na Rys. 3.5 przedstawia zestawienie wyników dla sześciu natężeń pola magnetycznego. Każda z serii pomiarowych została przeprowadzona niezależnie lecz przyjmując te same przedziały czasowe dla poszczególnych prędkości przepływu. Co trzy minuty następowała zmiana zakresu dozowania z mniejszej objętości na większą. Każda z serii pomiarowych rozpoczynała się z ZAKRESU 7 czyli dla  $V = 0,0028 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

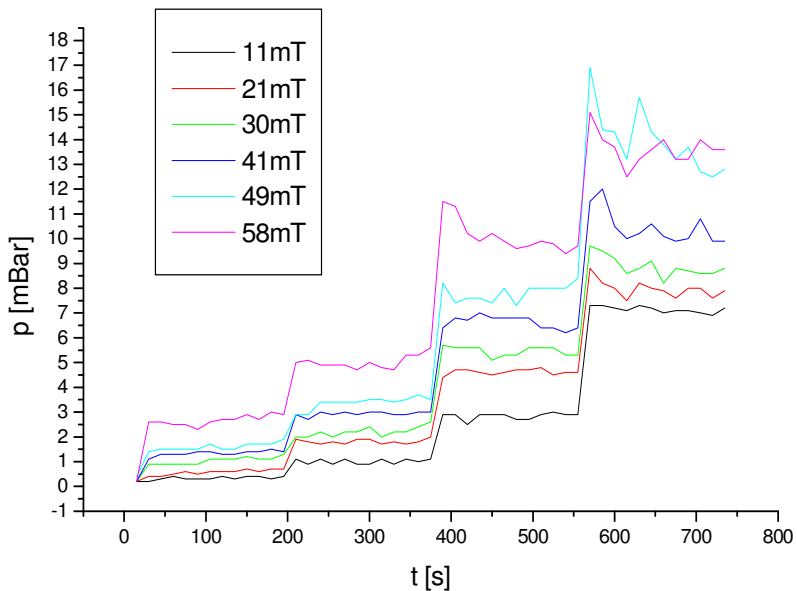


**Rys. 3.5** Przebiegi zmian w podłużnym polu dla różnych prędkości przepływu i natężenia pola

## 2. Przepływ zorientowany w poprzecznym polu magnetycznym

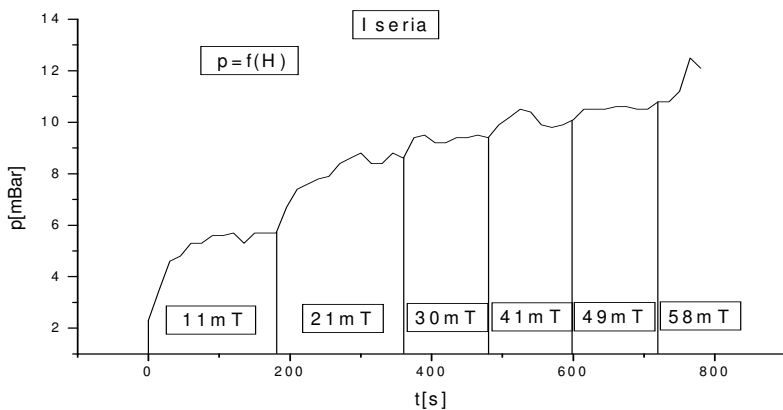
### 2.1 Pomiar zmian ciśnienia pod wpływem zmiany ilości dozowanej cieczy

Na Rys. 3.6 przedstawiono zestawienie wyników pomiaru ciśnienia dla sześciu natężeń pola magnetycznego zorientowanego poprzecznie do kierunku przepływu. Wartości natężenia pola magnetycznego i prędkości przepływu są identyczne jak w serii prowadzonej dla przypadku równoległego pola z kierunkiem przepływu.

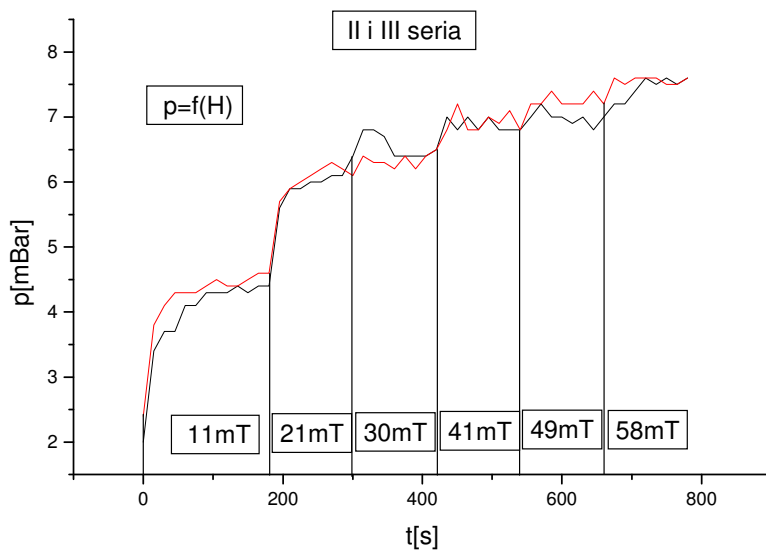


**Rys. 3.6** Przebiegi zmian ciśnienia w poprzecznym polu dla różnych prędkości przepływu i natężenia pola

### 2.2 Pomiar zmian ciśnienia pod wpływem zmiany natężenia pola magnetycznego, Rys.3.7 i 3.8.



**Rys. 3.7** Przebiegi zmian ciśnienia przed próbką w poprzecznym polu dla różnego natężenia pola, seria I



**Rys.3.8** Przebiegi zmian ciśnienia przed próbką w poprzecznym polu dla różnego natężenia pola, seria II i III

Pomiar przedstawione na Rys. 3.7 i 3.8 wykonano dla stałego wydatku dozowanej cieczy (5 zakres). Różnica przyrostów ciśnień pomiędzy serią I a powtarzającymi się seriami II oraz III jest prawdopodobnie spowodowana różnym stanem samej cieczy w pierwszej serii (brak jej wymieszania). Seria II i III wykazuje regularny wzrost ciśnienia rzędu 0.5 mili Bara przy zmianie pola magnetycznego powyżej 21mT. Powtarzalność otrzymanych wyników potwierdza niewielkie przyrosty ciśnienia w poprzecznym polu magnetycznym w stosunku do pola podłużnego.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

- Zaobserwowano znaczny wzrost tłumienia sygnału ultradźwiękowego w materiale porowatym nasyconym cieczą magnetyczną w stosunku do sygnału w samej cieczy magnetycznej.
- Największe zmiany amplitudy odnotowano dla fali generowanej głowicą 1MHz.
- Zaobserwowano różny charakter zmian amplitudy w zależności od kierunku zmian indukcji magnetycznej.
- Zarejestrowano wzrost prędkości propagacji fali ze wzrostem indukcji pola magnetycznego.
- Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie metodyki prowadzenia badań ilościowych dotyczących pomiaru parametrów fal ultradźwiękowych propagowanych w materiałach porowatych nasyconych cieczą magnetyczną.
- Badany „układ materiałów” – ciecz magnetyczna + materiał porowaty magnetycznie miękki stanowi bardzo ciekawy obiekt badań. Z powyższych wstępnych badań wynika, że istnieje możliwość sterowania zmianami własności takiego ośrodka.
- Natężenie pola magnetycznego ma istotny wpływ na ciśnienie cieczy mierzone przed próbką nasyconą cieczą magnetyczną
- Sekwencja zmian natężenia pola w czasie wpływa na ewolucję zmian ciśnienia cieczy.
- Prędkość przepływu cieczy przez próbkę istotnie wpływa na poziom ciśnienia cieczy.
- Przy zmianie kierunku pola magnetycznego z podłużnego na poprzeczne, przy tych samych natężeniach tego pola, obserwuje się wyraźny spadek przyrostów ciśnienia.
- Przyjmując ważność prawa Darcy i zakładając, że jedyną wielkością materiałową w tym prawie, zależną od natężenia pola jest lepkość, obserwowane zmiany ciśnienia cieczy przed badaną próbką można przełożyć na zmiany lepkości dynamicznej cieczy.
- Zaobserwowane różnice ciśnień przy zmianie kierunku pola względem kierunku przepływu cieczy dowodzą różny wpływ natężenia pola na lepkość w zależności od relacji kierunku i gradientu prędkości przepływu (dotyczy to gradientów na poziomie mikroskopowym – w objętości porów). Oznacza to zależność sił stycznych między warstwami płynu poruszającymi się względem siebie w objętości porów od kierunku pola magnetycznego.

Obecnie zespół badawczy po analizie uzyskanych wyników i zdobytych w trakcie badań doświadczeniach przygotowuje szerszy program badań nad materiałami porowatymi, magnetycznie niebojętymi, nasyconymi cieczami magnetycznymi.

#### ***Bibliografia***

- [1] Enzel P, Adelman N., Beckman K.J., Cambell D.J.: Preparation of an Aqueous-Based Ferrofluids. Chemical Education Vol. 76, 943 (1999).
- [2] Gerard Antonie van Ewijk: Phase behaviour of mixtures of magnetic colloids and non adsorbing polymer. Praca doktorska.
- [3] Hornowski T. Propagacja fal ultradźwiękowych w mieszaninach krytycznych i cieczach magnetycznych. Wydawnictwo Naukowe UAM. Poznań,
- [4] Ławwniczak A, Milecki A.: Ciecze elektro i magnetoreologiczne oraz ich zastosowanie w technice. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1999.
- [5] Rosensweig R. E.: Ferrohydrodynamics. Dover Edition. 1997.
- [6] Skumiel A. Wpływ pola magnetycznego na akustyczne właściwości cieczy magnetycznej. Wydawnictwo Naukowe UAM. Poznań, 1999.