



**Systemy Pomiarowe i Komputerowe Stanisław Żwan**

Projekt: „Innowacyjne urządzenie do wykonywania testów wydajnościowych naftowych otworów wiertniczych” w ramach Działania 1.1.1 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego

**R\_1/3/2017 – Raport z numerycznych prac obliczeniowych zmiany pojemności w funkcji zmiany stopnia zapelnienia.**

## **Raport z numerycznych prac obliczeniowych zmiany pojemności w funkcji zmiany stopnia zapelnienia.**

Do pomiarów zawartości fazy stosowane są różne metody pomiarowe: metody radiacyjne (wykorzystujące tłumienie wiązki promieniowania przechodzącej przez czynnik), metody optyczne, (najczęściej lokalne, w których pomiar polega na wyznaczeniu ilości światła przechodzącego przez światłowód w przypadku różnych właściwości optycznych otaczającego ośrodka) metody elektryczne wykorzystujące różne właściwości elektryczne (przewodność lub przenikalność elektryczną dwóch różnych faz.

Z pośród metod elektrycznych znana jest metoda admitacyjna wykorzystująca zmiany konduktancji lub pojemności elektrycznej między parą równoległych przewodów elektrycznych rozciągniętych w poprzek kanału [1]. Jej wadą jest przede wszystkim inwazyjność - ingerencja w przepływ. Metoda jest stosunkowo czuła. Kolejna metoda elektryczną jest metoda pojemnościowa z elektrodami umieszczonymi na zewnątrz kanału również przeznaczone są do wyznaczania zawartości faz. Metoda pojemnościowa wymaga skalowania, struktura przepływu może mieć również wpływ na dokładność pomiaru [2-6]. Istnieje oczywiście metoda ciśnieniowa pomiaru zawartości fazy, która wydaje się być najmniej czułą w przypadku przepływów o wysokim stężeniu fazy gazowej ale jest bardziej czuła niż metody optyczne w przepływach o niskich stężeniach fazy gazowej. Rozwijana jest również metoda radiacyjna oparte na pomiarze ekstynkcji promieniowania X lub promieniowania  $\gamma$ , umożliwiającą zmierzenie zawartości fazy gazów, jednak koszty związane z implementacją jej w rzeczywistych warunkach przemysłowych są dużo większe niż w przypadku metod opartych na wykorzystaniu zjawisk elektrycznych.

W ramach projektu rozwijana jest metoda pomiaru zawartości faz w przepływie dwufazowym ciecz – gaz z wykorzystaniem pomiaru pojemności. Pojemnościowa sonda pomiarowa składa się z dwóch elektrod zamontowanych na zewnątrz dielektrycznego odcinka rury, odcinek taki może być umieszczony w odcinku wylotowym lub wlotowym do separatora. Zmiany pojemności elektrycznej między elektrodami spowodowane przez różnicę przenikalności elektrycznej dwóch czynników: cieczy i gazu (ewentualnie par cieczy) znajdujących się między okładkami mierzone są poprzez zaproponowany układ elektroniczny. Pomiar zawartości faz polega na pomierzeniu zmian pojemności elektrycznej kondensatora utworzonego przez te elektrody, spowodowanych przez zmiany stosunku fazy ciekłej do fazy gazowej. Metoda nie zaburza przepływu i umożliwia pomiar objętościowej zawartości faz.

W przedstawionym poniżej opracowaniu przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych rozkładu potencjału pola elektrycznego i wielkości pojemności w obszarze międzyelektrodowym w przypadku

jednolitego wypełnienia rury pomiarowej cieczą i gazem w zależności od parametrów geometrycznych układu. Uzyskane wyniki numeryczne zostały wykorzystane w badaniach eksperymentalnych przeprowadzonych na rzeczywistym płynie złożowym pobranym z rzeczywistych otworów.

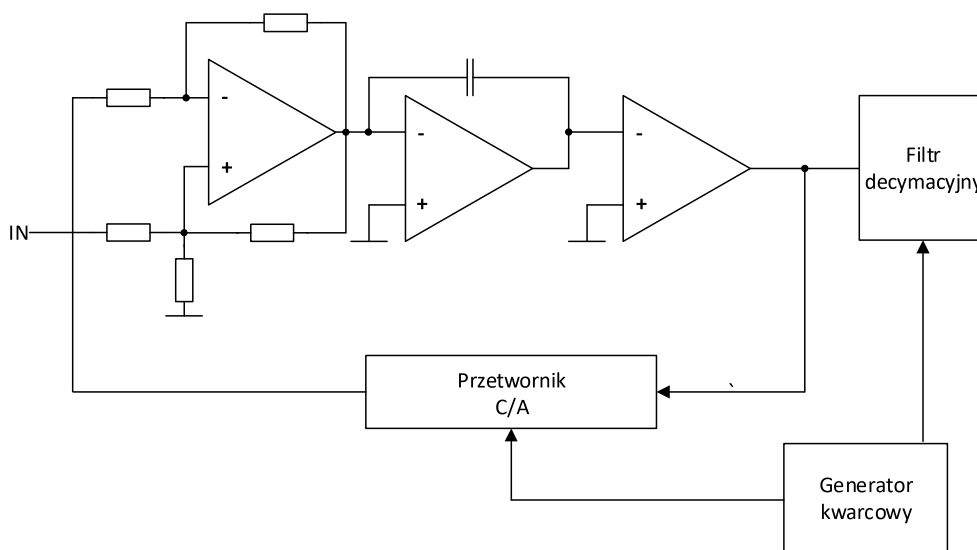
### Budowa czujnika pomiaru pojemności

Schemat układu pomiarowego.

Docelowy (przeznaczony do implementacji w warunkach przemysłowych) pomiar pojemności zbudowano w oparciu o przetwornik analogowo-cyfrowy typu Delta-Sigma. Na Rys.1 przedstawiono schemat blokowy przetwornika analogowo-cyfrowego Delta-Sigma.

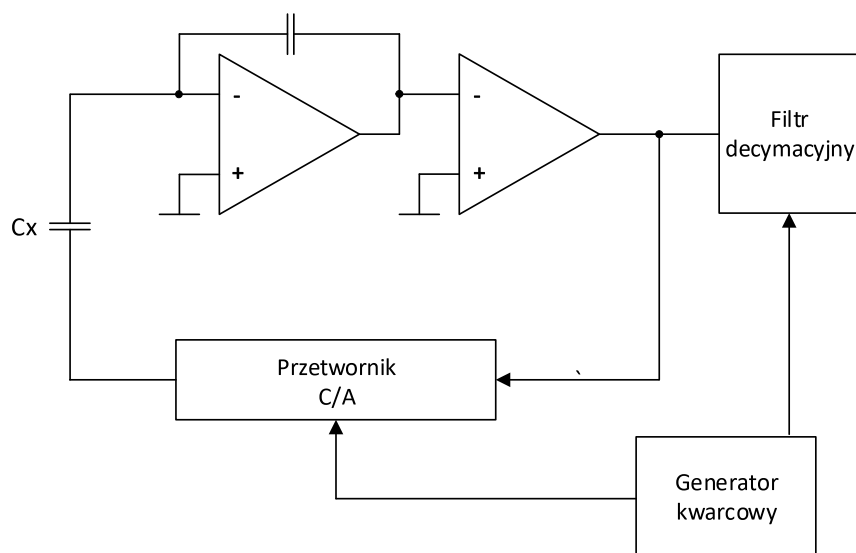
Od sygnału wejściowego przetwornika odejmowany jest przetworzony na wartość analogową jednobitowy sygnał wyjściowy przetwornika. Tak wytworzony sygnał podlega całkowaniu i następnie konwertowany jest na ciąg zer i jedynek przez komparator. Sygnał zer i jedynek jest synchroniczny z sygnałem zegara. W miarę wzrostu poziomu sygnału wejściowego proporcjonalnie wzrasta ilość jedynek w sygnale wyjściowym przetwornika.

Tak powstały sygnał cyfrowy jest prawidłową reprezentacją sygnału wejściowego, jednakże niewygodną w użyciu. Dlatego za pomocą filtra decymacyjnego następuje przetworzenie sygnału cyfrowego na bardziej użyteczną postać charakteryzującą się mniejszą częstotliwością i większą ilością bitów.



Rys. 1. Przetwornik Delta-Sigma, schemat blokowy.

Okazuje się, że przetwornik Delta-Sigma po niewielkiej modyfikacji może posłużyć do skonstruowania przetwornika pojemność-cyfra. Na Rys. 2 przedstawiono schemat blokowy przetwornika po modyfikacji. W takim układzie otrzymujemy układ całkujący, którego wzmacnienie, a więc również sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do wartości mierzonej pojemności  $C_x$ . Działanie pozostałej części przetwornika pozostaje bez zmian.



Rys. 2. Przetwornik pojemność-cyfra Delta-Sigma, schemat blokowy

Istnieją gotowe układy pracujące według przedstawionej zasady. Dobrym przykładem może być układ AD7745 produkcji Analog Devices. Na Rys. 3 przedstawiono schemat blokowy układu AD7745. Układ ten pozwala na pomiar zarówno napięcia, jak i pojemności, dodatkowo umożliwia pomiar temperatury. Podczas pomiaru napięcia układ za pomocą przełączników umieszczonych w bloku MUX jest konfigurowany do schematu będącego odpowiednikiem schematu pokazanego na Rys. 1. Podobnie jest podczas pomiaru temperatury, jest to możliwe dzięki temu, że blok TEMP SENSOR wytwarza napięcie proporcjonalne do temperatury. Podczas pomiaru pojemności układ konfigurowany jest do schematu będącego odpowiednikiem Rys. 2. Układ przetwornika charakteryzuje się rozdzielczością 24 bity podczas pomiaru napięcia i pojemności, oraz 12 bitów podczas pomiaru temperatury i może pracować z częstotliwością próbkowania od 9,1 do 90,9Hz dla pomiaru pojemności, od 8,2 do 49,8Hz dla pomiaru napięcia i temperatury.

Efektywna rozdzielczość przetwornika dla pomiaru pojemności jest mniejsza od 24 bitów ze względu na szum i wynosi od 17,6 bitów przy częstotliwości próbkowania 90,9Hz do 20,9 bitów przy częstotliwości próbkowania 9,1Hz. Dla pomiaru napięcia efektywna rozdzielczość przetwornika również nie osiąga 24 bitów i wynosi od 17,6 do 19,5 bitów przy użyciu wewnętrznego źródła

napięcia odniesienia, oraz od 18,3 do 21,1 bitów przy użyciu zewnętrznego źródła napięcia odniesienia o napięciu 2,5V. Podczas pomiaru temperatury efektywna rozdzielczość przetwornika jest stała i wynosi 12 bitów.

Zarówno konfiguracja układu przetwornika, jak i odczytanie wyników przetwarzania odbywa się za pomocą cyfrowego interfejsu komunikacyjnego I<sup>2</sup>C pracującego z częstotliwością do 400kHz.

Przedstawione poniżej wybrane wyniki obliczeń numerycznych posłużyło do odpowiedniego doboru kształtu elektrod pomiarowych, wielkości i rozmieszczenia jakie zostanie wykorzystane w dalszych pracach.

### **Pomiar zawartości fazy – zasada**

Powierzchniowa zawartość fazy gazowej mierzona w przekroju poprzecznym definiowana jako stosunek powierzchni zajętej przez fazę gazową do całkowitej powierzchni przekroju kanału:

$$\alpha^{(2)} = \frac{S_{void}}{S} \quad (1)$$

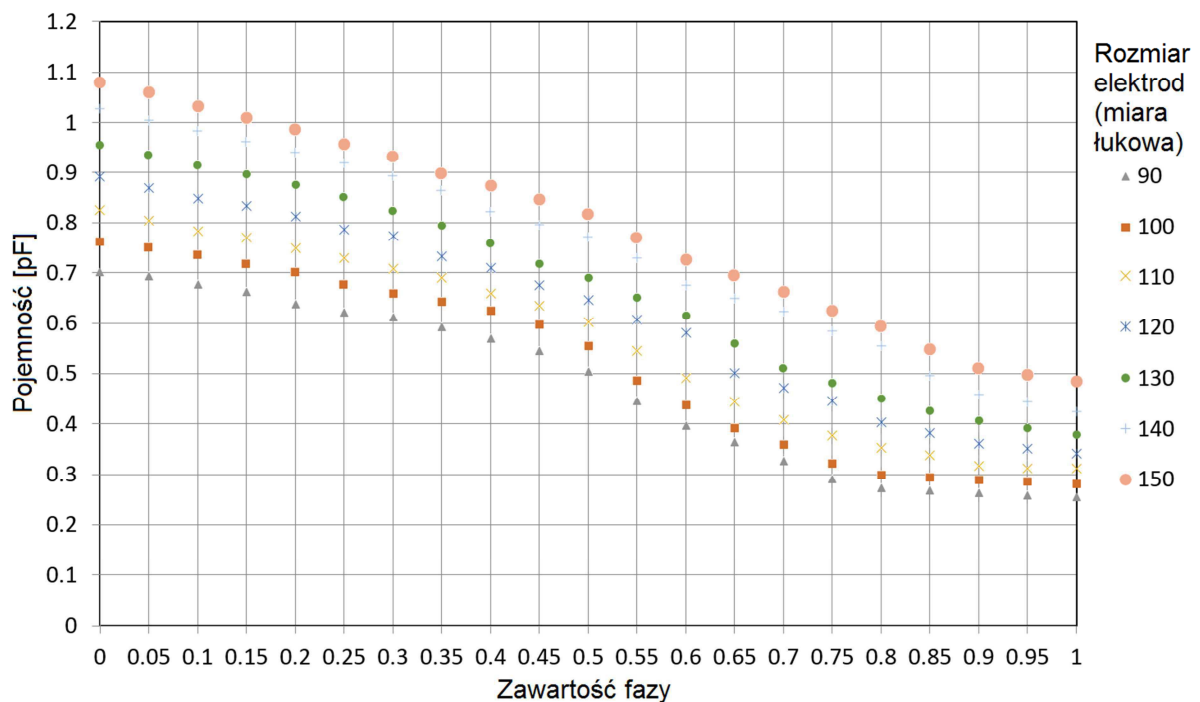
objętościowa zawartość fazy gazowej mierzona w lokalnym segmencie objętościowa zawartość fazy gazowej mierzona w lokalnym segmencie całkowitej objętości segmentu kanału:

$$\alpha^{(3)} = \frac{V_{void}}{V} \quad (2)$$

Przeprowadzono obliczenia numeryczne zmian pojemności badanego układu w zależności od takich parametrów jak szerokość elektrod, zmiana substancji wypełniającej (parametrów fizykochemicznych w szczególności przenikalności elektrycznej), wpływu stopnia zapełnienia, wpływu kąta rozwarcia elektrod pomiarowych. Otrzymane wyniki zostały wykorzystane przy projektowaniu elementów systemu pomiarowego jaki został wytworzony w ramach projektu i przebadany eksperymentalnie. Ze względu na zmiany wartości przenikalności elektrycznej w związku z rzeczywistym składem (specyfika otworu) płynu złożowego w niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki dla kilku arbitralnie zdefiniowanych przenikalności elektrycznych płynu złożowego. Ze względu na bardzo dużą ilość otrzymanych wyników numerycznych w niniejszym opracowaniu załączono tylko niektóre. Oczywiście wszystkie wyniki zostały wykorzystane w procesie projektowania i mogą być w każdej chwili dostarczone w formie zbiorczej. Obliczenia przeprowadzone dla geometrii 3D za pomocą programu FlexPde do rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych metodą najmniejszych elementów skończonych. Rozwiązano równanie Laplace przy stałej wartości potencjału zadanego na powierzchniach elektrod. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla rzeczywistych wymiarów

geometrycznych badanego układu w trzech wymiarach. Układ składał się z odcinka rury z PMMA ( $\epsilon_r=3.4$ ), na zewnątrz której osadzono dwie elektrody w postaci symetrycznych fragmentów pierścienia o wysokości 10mm o długości łuku określonej przez kąt zmieniający się od  $90^\circ$  do  $150^\circ$ . Szerokość szczeliny wynosiła odpowiednio od  $90^\circ$  do  $30^\circ$  (25mm do 8.4mm). Na zewnątrz elektrod umieszczono powietrze ( $\epsilon_r=1$ ), a rura wypełniona była w zależności od rozpatrywanego przypadku wodą ( $\epsilon_r=80$ ), powietrzem lub co stosunkowo najbardziej interesujące cieczą mającą cechy (parametry elektryczne) płynu złożowego.

Poniżej przedstawiono w zależności pojemności obszaru międzyelektrodowego (łącznie z elektrodami) w zależności od stopnia wypełnienia powietrzem i długości elektrod (miara łukowa- kąt). Założone, że medium wypełniającym będzie woda.

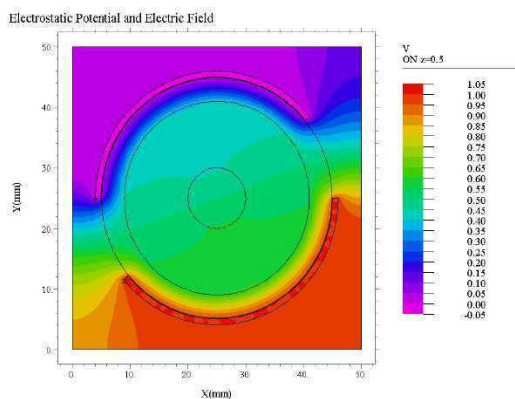


Rys.3. Zależność pojemności obszaru międzyelektrodowego od stopnia zawartości fazy dla powietrza i wody. Dla różnych rozmiarów elektrod – rozmiar przedstawiony w postaci miary łukowej.

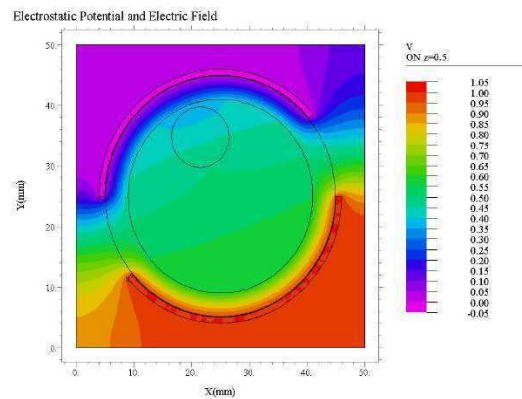
Bazując na wynikach obliczeń numerycznych pojemności układu elektrod (z uwzględnieniem przestrzeni pomiędzy) przedstawiono na rys. 3 zależność pojemności od stopnia zapełnienia i długości elektrod. Długość przedstawiono z wykorzystaniem miary łukowej. Zawartość faz, w szczególności gazowej wyznaczono z zależności  $D_p^2/D_k^2$  gdzie  $D_p$  jest średnica walca powietrznego

(parowego)  $D_k$  jest średnicą wewnętrzną kanału z PMMA. Poza obszarem pomiarowym, ograniczonym elektrodami założono, że medium otaczającym jest powietrze. Szczelina pomiędzy elektrodami została, czyli długość elektrod została opisana za pomocą miary łukowej - kąta. Szczelina międzyelektrodowa jest określona w mierze łukowej jako różnica pomiędzy kątem  $180^\circ$  a kątem elektrod.

Przedstawione na rys.3 charakterystyki zmiany pojemności w funkcji stopnia wypełnienia dla różnych wielkości szczelin między elektrodami co do kształtu są prawie tożsame. Zmiana kąta ułożenia elektrod, czyli ich długości (szerokość szczeliny międzyelektrodowej) powoduje jak widać przesunięcie zakresu zmian pojemności. Należy zauważyć, że w prowadzonych badaniach wykorzystywana jest zmiana pojemności w stosunku do pozycji wyjściowej. Biorąc to pod uwagę widzimy, że wpływ szczeliny jest niewielki, ale należy zaznaczyć, że dotyczy to przypadku gdy obszar fazy gazowej jest umieszczony centralnie. W obliczeniach numerycznych przeanalizowano również sytuację, gdy obszar fazy gazowej nie znajduje się centralnie ale jest przesunięty w kierunku szczeliny. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych oszacowano ewentualny błąd wynikający z niecentrycznego ułożenia przepływu fazy gazowej na maksymalnie 3%. Na rysunku poniżej przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń uwzględniające przesunięcie części fazy gazowej od pozycji centralnej.



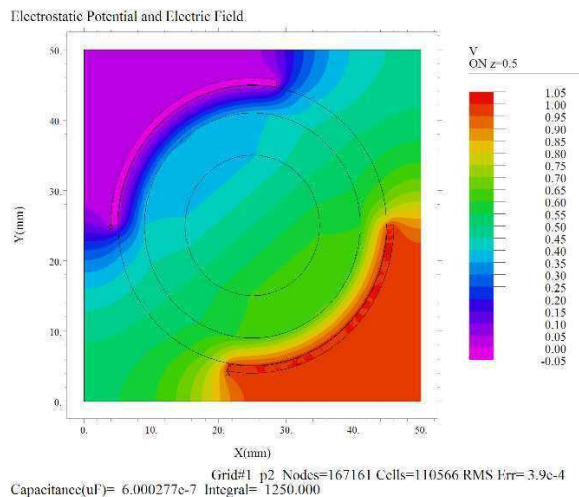
Rys.4a. Medium woda, cylinder wypełniony powietrzem o średnicy 10mm, kąt rozwarcia elektrod 140 stopni, materiał obudowy PMMA



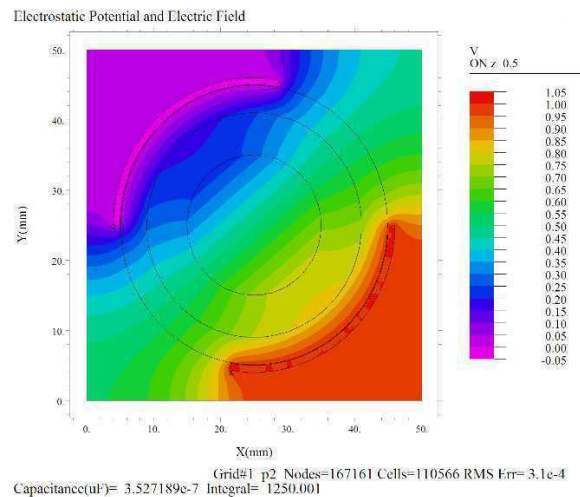
Rys.4b. Medium woda, cylinder wypełniony powietrzem o średnicy 10mm, kąt rozwarcia elektrod 140 stopni, materiał obudowy PMMA

Na rysunkach poniżej przedstawiono obliczenia rozkładu potencjału pomiędzy elektrodami systemu i obliczenia pojemności dla zadanych parametrów geometrycznych. Przedstawione wyniki obliczeń

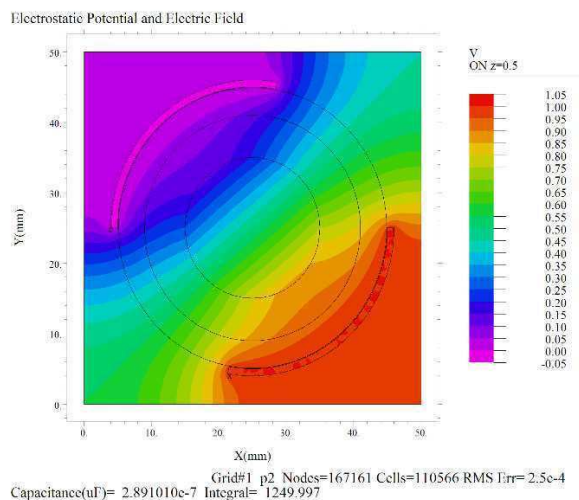
pokazują wpływ przenikalności elektrycznej medium (ciekłego) na pomierzony potencjał. Widzimy że dla wody ( $\epsilon_r = 80$ ) wartość zmierzonej pojemności jest stosunkowo wysoka, wraz ze spadkiem wartości przenikalności ta wartość spada, co przy stałym odniesieniu dla układu wypełnionego powietrzem wpływa na pewne obniżenie dokładności pomiarowej (rozdzielczości). Należy zaznaczyć, że wartość przenikalności elektrycznej dla płynów złożowych wykazuje silne różnice, tak jak i ich skład chemiczny. W ramach projektu zostanie przeprowadzona seria pomiarów parametrów elektrycznych dla różnych płynów złożowych. Pewnej wiedzy w tym zakresie może dostarczyć praca [7].



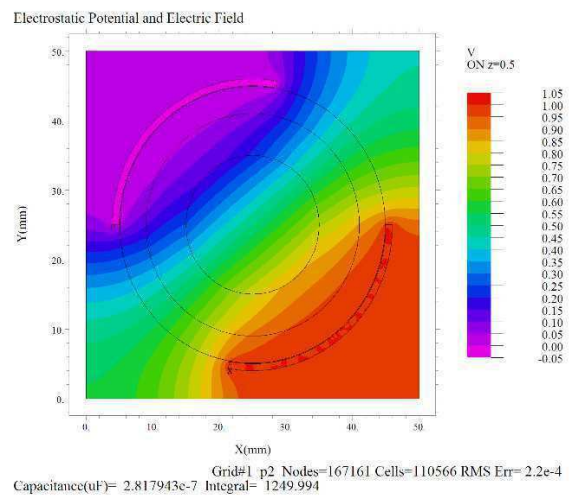
Rys.5a. Kąt elektrod  $90^\circ$ , wypełnienie: ciecz ( $\epsilon_r = 80$ ), wewnętrzny cylinder z powietrzem o średnicy 20mm



Rys.5b. Kąt elektrod  $90^\circ$ , wypełnienie: ciecz ( $\epsilon_r = 20$ ), wewnętrzny cylinder z powietrzem o średnicy 20mm



Rys.5c. Kąt elektrod  $90^\circ$ , wypełnienie: ciecz ( $\epsilon_r = 10$ ), wewnętrzny cylinder z powietrzem o średnicy 20mm



Rys. 5d. Kąt elektrod  $90^\circ$ , wypełnienie: ciecz ( $\epsilon_r = 2$ ), wewnętrzny cylinder z powietrzem o średnicy 20mm



Nadmieniamy, że przeprowadzone powyżej symulacje zostały wykonane również dla innych wielkości elektrod – takich samych jak wykonano obliczenia przedstawione na rys.3.

### **Podsumowanie**

W niniejszym opracowaniu przedstawiono tylko niewielką część wyników obliczeń w zakresie symulacji numerycznych wpływu parametrów elektrycznych na pracę opracowywanego systemu pomiarowego. Jakimi dysponuje przedsiębiorstwo Tercja. Otrzymane wyniki posłużyły do zaprojektowania, w ocenie autorów, w sposób optymalny układu pomiarowego. Zostanie on poddany badaniom eksperymentalnym podczas realizacji niniejszego projektu. Szczególnie ważne jest uzyskanie odpowiedniej dokładności przy jak najmniejszym koszcie wytworzenia. Nadmieniamy, że w raporcie przedstawiono tylko niewielką część wykonanych symulacji, bardziej pokazano ich zakres merytoryczny.

### **Literatura**

1. Durkiewicz B.: Metoda admitancyjna pomiaru zawartości faz w przepływie dwufazowym. Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, Warszawa- Jabłonna 1986
2. Huang S.M., Green R.G., Płaskowski A.B., Beck M.S.: Conductivity effects on capacitance measurements of two- component fluids using the charge transfer method. J. Phys. E: Sci. Instrum. 721 (1988), 539-48
3. Huang S.M., Fielden J., Green R.G., Beck M.S.: A new capacitance transducer for industrial applications. J. Phys. E: Sci. Instrum. 721 (1988), 251-6
4. Huang S.M., Stott A.L., Green R.G., Beck M.S.: Electronic transducers for industrial measurement of low value capacitances. J. Phys. E: Sci. Instrum. 721 (1988), 242-50
5. Stott A.L., Green R.G., Seraji K.: Comparison of the use of internal and external electrodes for the measurement of the capacitance and conductance of fluids in pipes. J. Phys. E: Sci. Instrum. 718 (1985), 587-92
6. Huang S.M., Płaskowski A., Beck M.S.: Tomografia procesowa: metoda pojemnościowa otrzymywania obrazu przepływu. Pomiary, Automatyka, Kontrola 735 (1989) No 1, 6-8
7. Macioszek Ł. Dielektrometria olejów napędowych, Materiały X Konferencji Naukowej SP 2014