

Michał Penkowski

dr n. med. Michał Penkowski
Katedra i Zakład Fizyki i Biofizyki
Uniwersytet Medyczny w Gdańsku
80-211 Gdańsk, ul. Dębinki 1
tel. 58 349 14 80
mipen1@wp.pl

**ZASTOSOWANIE IMPEDANCJI ELEKTRYCZNEJ W ZAKRESIE
NISKICH CZĘSTOTLIWOŚCI DO DETEKcji OBIEKTÓW
ZANURZONYCH**

Przedstawiono wyniki wstępnych prac doświadczalnych mających na celu wykrycie i różnicowanie obiektów zanurzonych w środowisku wodnym. Do detekcji wykorzystano pomiar impedancji elektrycznej w zakresie niskich częstotliwości. Wyniki pracy wskazują, że możliwe jest odróżnienie organizmów żywych (ryby) od przedmiotów martwych (kamienie, pęcherzyki) w sposób pewny. Metoda tego typu nie była dotąd stosowana a jej wyniki wskazują, że może być ona przydatna w sytuacji, gdy inne metody (hydroakustyczna, optyczna) nie są w stanie udzielić istotnych informacji o obiekcie zanurzone.

Słowa kluczowe: impedancja elektryczna, dyspersja impedancji, detekcja, obiekty zanurzone.

**APPLICATION OF LOW FREQUENCY ELECTRICAL IMPEDANCE
FOR DETECTION OF SUBMERGED OBJECTS**

Results of preliminary experiments with the detection and recognition of objects submerged in water are presented. Measurements of the electrical impedance in low frequency range were used. Results of experiments confirmed that living organism like fish can be reliably recognized from other objects (stones, bubbles, etc.). The presented method was not applied for the detection of submerged objects up till now and seems to be interesting alternative, and can give reliable results when other methods (hydroacoustic, optical) are unable to give usable information.

Key words: electrical impedance, impedance dispersion, detection, submerged objects.

Применение электрического импеданса на низких частотах до обнаружения подводных объектов

результаты предварительных экспериментальных работ по обнаружению и разграничению объектов погруженных в воду. Для обнаружения используется межэлектродное электрическое сопротивление (импеданс) на низких частотах. Наши результаты показывают, что можно провести различие между живыми организмами (рыбы) от неживых объектов (камней, пузырьки) со всей определенностью.

Метод такого типа ранее не использовали и результаты показывают, что это может быть полезно в ситуациях, когда другие методы (гидро-акустических, оптических) не в состоянии представить соответствующую информацию об объекте под водой.

Ключевые слова: *Электрический импеданс (комплексное сопротивление), дисперсия сопротивления, обнаружение, подводные объекты.*

WSTĘP

Wykrywanie obiektów w wodzie i określanie ich cech jest jedną z podstawowych aktywności człowieka. Obecnie, najczęściej wykorzystywane są metody optyczne, hydroakustyczne i magnetyczne. Każda z nich posiada istotne ograniczenia. W przypadku metody optycznej absorpcja i rozpraszanie światła w wodzie, głównie na zawiesinach, ogranicza zasięg metody do odległości dobrej widoczności. W akwenach śródlądowych o dużym stężeniu zawiesin metoda w praktyce traci swoją przydatność. Istotnie większym zasięgiem charakteryzują się metody hydroakustyczne. Rozdzielczość metody jest wprost proporcjonalna do częstotliwości. Zasięg detekcji jest tym większy, im częstotliwość niższa. Ograniczeniem metody jest obecność obiektów o impedancji akustycznej, mocno różniącej się od impedancji akustycznej wody. W takiej sytuacji mamy do czynienia z całkowitym odbiciem na granicy dwóch ośrodków i mocnym rozproszeniem sygnału, gdy wielkość przedmiotu jest porównywalna z długością fali. Najczęstszym przypadkiem tego typu jest obecność dużej ilości pęcherzyków gazowych w środowisku wodnym. Gdy dodatkowo w płytkiej wodzie mamy do czynienia z odbiciem fali od powierzchni akwenu, detekcja obiektów zanurzonych staje się praktycznie niemożliwa [2].

Zastosowanie metody magnetycznej ograniczone jest do obiektów ferromagnetycznych, głównie pochodzenia antropogenicznego.

Przedstawione ograniczenia były przyczyną poszukiwania innej metody. Problem pojawił się podczas prób oceny populacji ryb migrujących w Ameryce Północnej. Dotychczas liczebność populacji oceniano metodą wizualną w obszarach estuariów dużych rzek. Metody hydroakustyczne nie miały zastosowania z powodu rozległości akwenu i płytkiej wody z dużą ilością rozproszonych zawiesin i pęcherzyków powietrza. Spływ zawiesin był też przyczyną ograniczeń metody optycznej.

Zaproponowano zastosowanie pomiaru parametrów elektrycznych środowiska i określenie zakresu ich zmian spowodowanych obecnością obiektów zanurzonych. Zastosowanie metod stałoprądowych skazane jest z góry na niepowodzenie ze względu na znaczącą przewodność środowiska. Przepływ prądu stałego powoduje elektrolizę zmieniającą warunki pomiaru, w wyniku zjawiska polaryzacji elektrodowej. Pomiaru przy prądzie zmiennym ograniczone są do zakresu niskich częstotliwości, ponieważ wraz ze wzrostem częstotliwości maleje głębokość wnikania prądu, w wyniku zjawiska naskórkowości. Dolny zakres częstotliwości stosowanych wyznacza szybkość zmian spowodowanych ruchem obiektu obserwowanego. Dla ryb, których czas przebywania w miejscu detekcji może być rzędu setnych części sekundy, wynika ograniczenie na najniższe częstotliwości pomiarowe rzędu setek Hz.

Zaletą pomiaru impedancji w zakresie niskich częstotliwości jest relatywnie prosty układ pomiarowy a szczególnie sam czujnik, którym jest zestaw elektrod. Charakter pomiaru nie narzuca specjalnych wymagań na parametry elektrod i dlatego można je wykonać prosto i tanio. Jest to istotnym czynnikiem w przypadku, gdy elektrody są narażone na erozję w wyniku ruchu rumoszu dennego lub podlegają degradacji wskutek oddziaływania substancji rozpuszczonych w wodzie.

MATERIAŁY I METODY

Pomiary impedancji [1] przeprowadzono za pomocą analizatora impedancji Solartron 1260A, wyposażonego w dodatkowy interfejs impedancyjny 1294A. Środowiskiem pomiarowym był prostopadłościenny zbiornik szklany o wymiarach: długość 42 cm, szerokość 20 cm, głębokość 25 cm. Zbiornik był napełniony odstałą wodą wodociągową o ustabilizowanej temperaturze.

INTRODUCTION

The detection of objects submerged in water and determining their features constitute one of the basic human activities. Currently, the most commonly applied methods include optical, hydroacoustic and magnetic methods. Still, there are significant limitations to each of them.

In the case of the optical method, light absorption and diffusion in water, mainly in suspensions, limits its scope to a distance of good visibility. This method is practically inapplicable in inland bodies of water with high concentration of suspensions.

Hydroacoustic methods are characterised by having a much greater scope. Their resolution is directly proportional to frequency, meaning that the lower the frequency is, the greater becomes the detection scope. The limitation to the method lies in the presence of objects with an acoustic impedance very different from the acoustic impedance of water. In such a situation we deal with a full reflection on the border of the two areas and a high diffusion of the signal, when the size of an object is comparable to the length of the wave. The most common case involves the presence of a large number of gas bubbles in the water environment. When it is additionally accompanied by wave reflection from the water surface, the detection of submerged objects becomes practically impossible [2].

The application of the magnetic method is limited to ferromagnetic objects, mainly of anthropogenic origin.

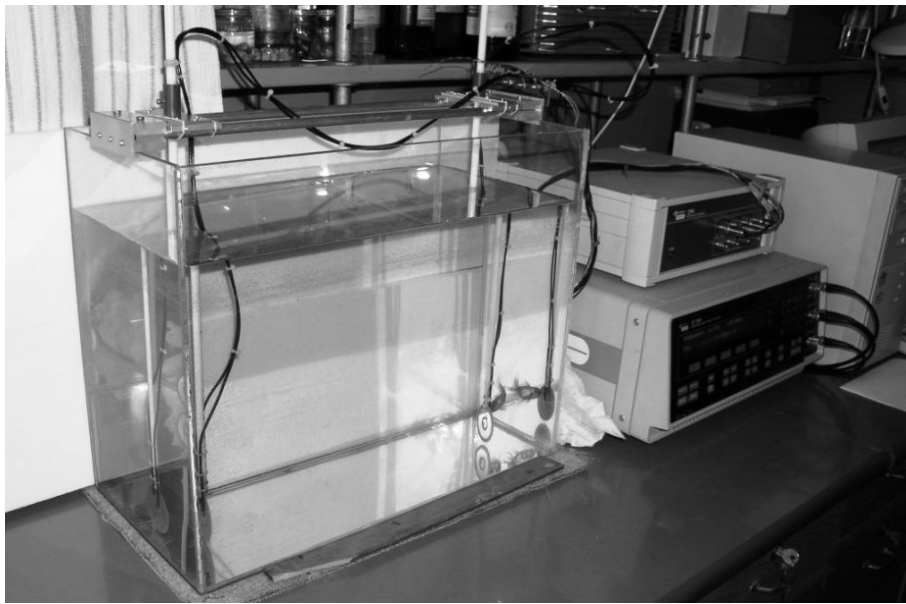
The said limitations constituted the reason for seeking another method. The problem occurred during the attempts to evaluate population sizes of migrating fish in North America. Until now, population sizes were determined by using visual method in the areas of estuaries of large rivers. Hydroacoustic methods were not applicable there due to the vastness of the area in question and shallow water with a large quantity of diffused suspensions and air bubbles. The flow of suspensions constituted another limitation for the optical method.

It was proposed to apply measurement of the electrical parameters of the environment and determine the scope of their variation resulting from the presence of submerged objects. Application of direct current methods was bound to be unsuccessful due to a high conductivity of the environment. The flow of the direct current induces electrolysis distorting measurement results due to the phenomenon of electrode polarization. Measurements conducted with the use of alternating current, on the other hand, were limited to a low frequency range, since a frequency increase caused a decrease in the depth of current permeation as a result of the skin effect. A lower frequency range determines the rapidity of changes caused by movement of an observed object. In the case of fish, whose stay time in the detection zone may be as short as a hundredth part of a second, this involves a limitation to the lowest measurement frequencies of hundreds of Hz.

An advantage of an impedance measurement within a low frequency range is the use of a relatively simple measuring system, and, particularly, of the detector itself which is comprised only of a set of electrodes. The nature of the measurement does not impose any special requirements on electrode parameters, thus it may be performed in an easy and cheap way. This is a significant factor in a situation when the electrodes are exposed to erosion due to movement of the bottom rubble or are subjected to degradation due to the substances dissolved in water.

Elektrody pomiarowe umieszczono na teflonowych prętach w uchwytach umożliwiających precyzyjną regulację ich położenia w pionie. Uchwyty umieszczone były na sankach przesuwających się po równoległych szynach umieszczonych na wierzchu zbiornika. Zmieniając położenie sanek, możliwa była ciągła regulacja odstępów elektrod. Obie elektrody posiadały niezależną regulację głębokości zanurzenia, kąta wokół osi pionowej i położenia w stosunku do osi zbiornika.

Elektrody pomiarowe wykonano jako płaskie na podłożu z laminatu szklanego. Ponieważ Solartron 1260A umożliwia pomiar metodą czteroelektrodową, zdecydowano się na zastosowanie tej metody i rozdzielono elektrody prądowe od napięciowych. Elektrodamy prądowymi miały formę pierścieni o zewnętrznej średnicy 40 mm i wewnętrznej 18 mm. Koncentrycznie i koplarnie umieszczono elektrody napięciowe o średnicy 12 mm. Elektrody prądowe i napięciowe podłączono za pomocą kabla koncentrycznego o izolacji teflonowej i złącz BNC do interfejsu impedancyjnego. Ekran kabli podłączone były do ekranu interfejsu.



Rys. 1.1. Układ pomiarowy. Z lewej: zbiornik z elektrodami, z prawej: analizator impedancji (na dole) i interfejs impedancyjny (na górze). W pobliżu elektrody widoczna ryba będąca obiektem doświadczeń. Elektrody w układzie współosiowym.

MATERIALS AND METHODS

The impedance measurements [1] were carried out with the use of impedance analyser Solartron 1260A, equipped with an additional impedance interface 1294A. The measurement environment was a cuboidal glass container of the following dimensions: length – 42 cm, width – 20 cm, depth – 25 cm. The container was filled with settled water from the water supply system, with stabilized temperature. Measurement electrodes were placed on Teflon-coated rods fixed in handles enabling the placement of them in a vertical position. The handles were placed on a sled moving on parallel rails, located at the top of the container. By changing the position of the sled it was possible to maintain constant regulation of a distance between the electrodes. Both electrodes had independently regulated immersion depths, angles around the vertical axis and the position in relation to the container's axis.

The electrodes had a flat form and were made on the basis of glass laminate. As Solartron 1260A enables carrying out measurements with the use of a four-electrode method, it was decided to apply this method. This involved separating current electrodes from voltage electrodes. The current electrodes had the form of rings with an external diameter of 40 mm and an internal diameter of 18 mm. The voltage electrodes, with the diameter of 12 mm, were positioned concentrically and coplanarly. Both types of electrodes were connected to the impedance interface with the use of a concentric cable with a Teflon-coated insulation and BNC joints. The cable screens were connected to an interface screen.

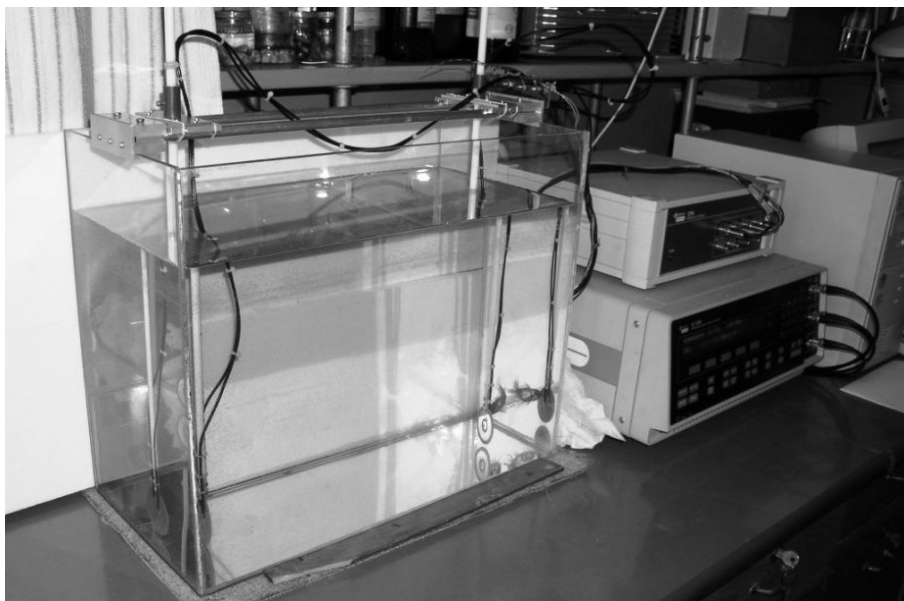


Fig. 1.1. Measuring system. On the left: container with electrodes, on the right: impedance analyser (at the bottom) and impedance interface (at the top). Near an electrode, a visible fish being an object of the experiment. Electrodes arranged in a coaxial system.



Rys. 1.2. Układ pomiarowy. Elektrody w układzie koplanarnym (umieszczone w jednej płaszczyźnie).

Objektami obserwowanymi były: ryba akwariowa (*carassius auratus*), rośliny wodne z rodziny rdestnicowatych (*Potamogeton crispus*), pęcherzyki powietrza wytwarzane za pomocą pompki powietrznej, palce eksperymentatora.

WYNIKI

W pierwszej serii pomiarowej pomierzono impedancję środowiska wodnego bez obecności obiektów zanurzonych. Oddzielnie wyznaczono składowe impedancji rzeczywistą i urojoną. Pomiarów wykonano dla zakresu częstotliwości od 1 Hz do 100kHz. Odstęp elektrod był równy 39 cm, zaś głębokość 13 cm. Elektrody były ustawione na osi zbiornika powierzchniami aktywnymi do siebie. W dalszej części pracy taka konfiguracja elektrod będzie nazywana współosiową. Amplituda sygnału pomiarowego była równa 1V, temperatura 24°C.

Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 2 (składowa rzeczywista) i rys. 3 (składowa urojona). Wyraźnie zauważalna mała zmienność składowej urojonej w zakresie częstotliwości obejmującym pięć dekad. Zmiany składowej rzeczywistej nie przekraczają 3% wielkości mierzonej. Wartość składowej urojonej zbliżona jest do zera i osiąga kilka omów w zakresie wysokich częstotliwości.



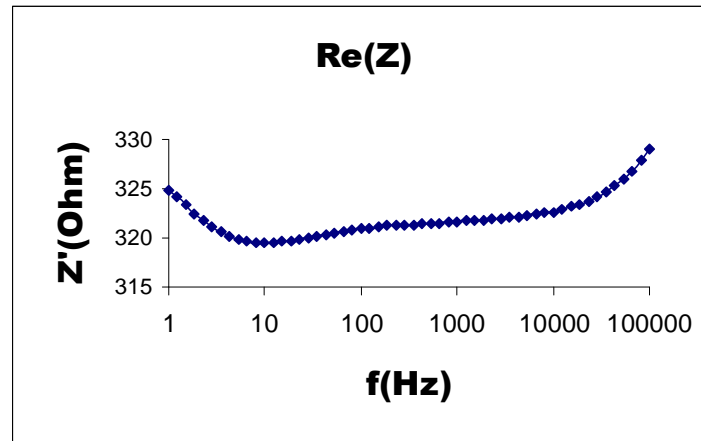
Fig. 1.2. Measuring system. Electrodes in a coplanar system (placed on one plane).

The observed objects included: an aquarium fish (*carassius auratus*), water plants from the family of pondweeds (*potamogeton crispus*), air bubbles produced with an air pump, experimenter's fingers.

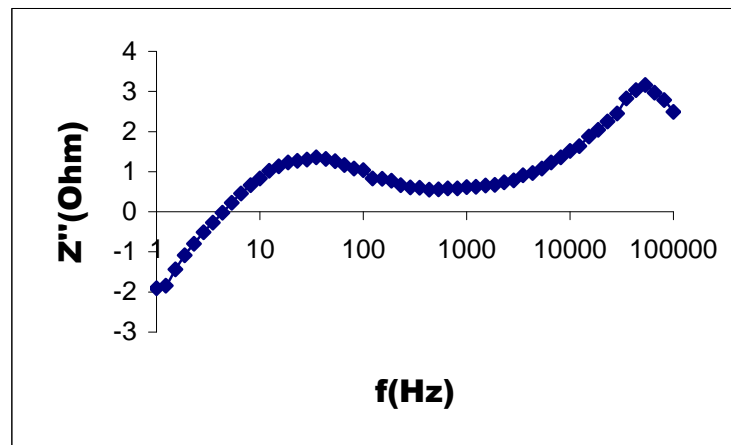
RESULTS

The first series of experiments involved measuring water environment impedance in the absence of any submerged objects. The real and imaginary impedance components were determined separately. The measurements were conducted for the frequency range from 1 Hz to 100kHz. The distance between the electrodes was 39 cm, and their depth 13 cm. The electrodes were placed on the container's axis, with active surfaces turned towards each other. From now on, such an electrode configuration will be referred to as a coaxial configuration. The amplitude of the measurement signal was equal to 1V, and the temperature to 24°C.

The results of measurements were presented in fig. 2 (real component) and fig. 3 (imaginary component). What is clearly noticeable is a small variability of the imaginary component in the frequency range encompassing five decades. Variations of the real component do not exceed 3% of the measured quantity. The value of the imaginary component is close to zero and reaches several ohms in a high frequency range.



Rys. 2. Składowa rzeczywista impedancji wody od częstotliwości 100Hz do 10kHz wartość składowej rzeczywistej praktycznie stała. Niewielki wzrost w zakresie wysokich częstotliwości prawdopodobnie spowodowany wpływem pasożytniczej indukcji kabli doprowadzających.



Rys. 3. Składowa rzeczywista impedancji wody. Zmiana w zakresie od -2 omy do 3 omów. Niewielka zmienność w zakresie od 100 Hz do 10kHz.

W celu określenia wpływu głębokości zanurzenia elektrod na wynik pomiarów, wykonano pomiary takie jak w punkcie poprzedzającym (patrz rys.1 i rys.2) w funkcji głębokości elektrod. Głębokość zanurzenia rozumiana jest jako odległość od powierzchni wody do środka elektrody. Dla głębokości większych od 5 cm nie stwierdzono wpływu głębokości zanurzenia elektrod na wyniki pomiarów.

Istotnym czynnikiem ograniczającym rozdzielczość metody jest obecność szumów i fluktuacji zarówno w aparaturze pomiarowej jak i w parametrach elektrycznych obiektu mierzonego. W celu określenia zdolności rozdzielczej metody wykonano pomiary przy konfiguracji współosiowej, odległości elektrod równej 39 cm i głębokości 13 cm dla częstotliwości 1kHz i amplitudy sygnału pomiarowego równego 1 V. Wyniki dla składowej rzeczywistej przedstawiono na rys. 4.

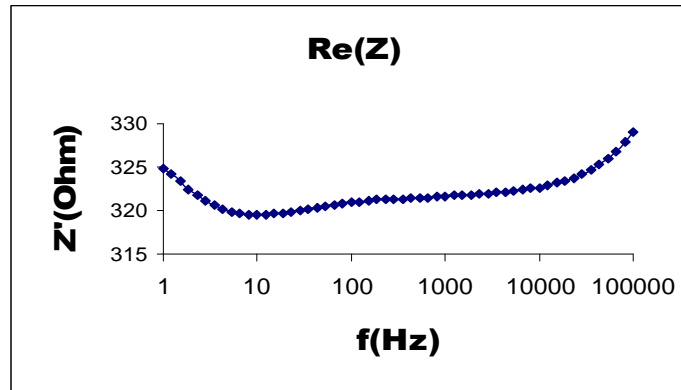


Fig. 2. Real component of water impedance. The value of the real component practically remains unchanged with the frequency range from 100Hz to 10kHz. A slight increase in high frequency range was most probably caused by a parasitic induction on feed cables.

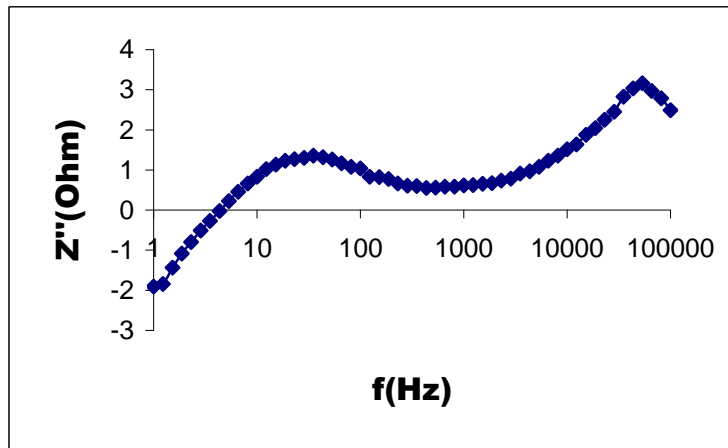
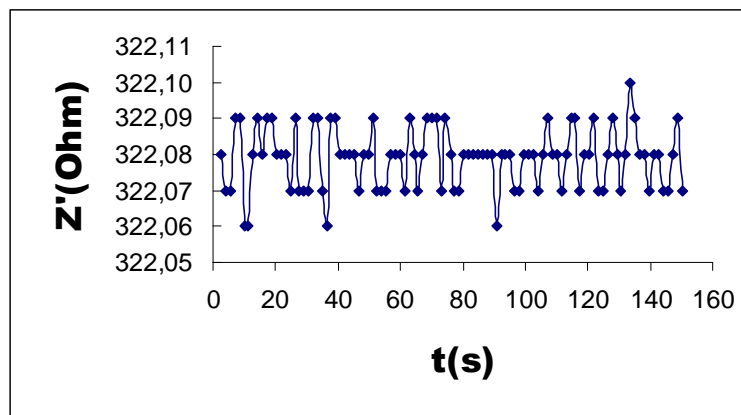


Fig. 3. Imaginary component of water impedance. Variation from -2 ohms to 3 ohms. A slight variability in the range from 100 Hz to 10kHz.

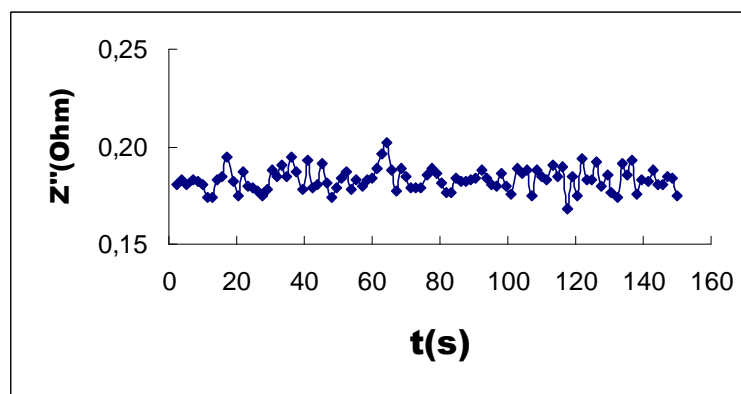
In order to determine the impact of the immersion depth of the electrodes on measurement results, similar measurements to those specified in the previous section (see fig. 1 and fig. 2) were carried out in the function of depth. The immersion depth is understood as the distance measured from water surface to the central part of an electrode. It was concluded that electrode immersion depths exceeding 5 cm had no impact on measurement results.

An important factor limiting the method's resolution is the presence of noise and fluctuations both in the measuring apparatus and caused by electrical parameters of a measured object. In order to assess the method's measuring capacity, measurements in a coaxial configuration were conducted, with the distance between the electrodes equal to 39 cm and their depth of 13 cm, in the frequency of 1kHz and the measuring signal amplitude of 1 V. The results for the real component are presented in fig. 4.



Rys. 4. Składowa rzeczywista impedancji wody dla częstotliwości 1kHz. Zmienność w czasie.

Wartość składowej rzeczywistej impedancji w czasie 150 sekund nie wykazuje systematycznych zmian. Zwraca uwagę dyskretna struktura wartości mierzonych z krokiem 0,01 oma spowodowana ograniczeniem rozdzielczości analizatora impedancji. Fluktuacje wartości mierzonej są rzędu najmniej znaczącego bitu pomiarowego (LSB), czyli na poziomie 10^{-4} wielkości mierzonej.



Rys. 5. Składowa urojona impedancji wody dla częstotliwości 1 kHz. Zmienność w czasie.

Składowa urojona impedancji w czasie 150 sekund nie wykazuje zauważalnych zmian systematycznych. Wartość fluktuuje z amplitudą około 0,03 oma. Wpływ rozdzielczości analizatora impedancji niezauważalny.

Identyczne pomiary wykonano dla częstotliwości 10kHz. Wyniki przedstawiono na rys. 6 i rys. 7. Zmienność wyników jest nieco większa niż dla 1kHz. Nie występuje systematyczna zmiana wartości średniej dla żadnej ze składowych.

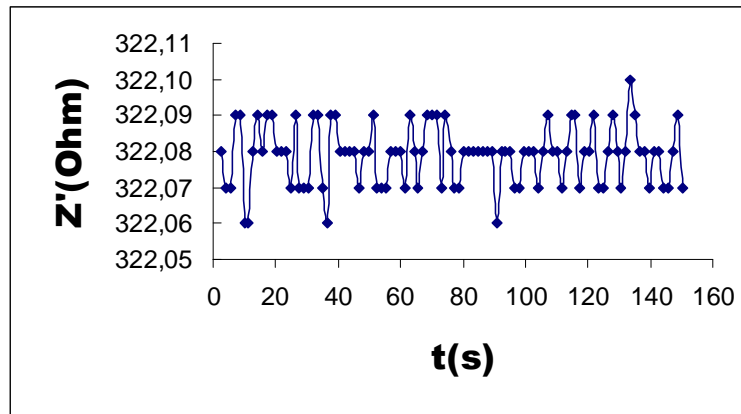


Fig. 4. Real component of water impedance for the frequency of 1kHz. Variability in time.

The value of the real component of water impedance in the time of 150 seconds does not reveal any systematic changes. What is noticeable is a discrete structure of the measured values with the step of 0.01 ohm caused by limited resolution of an impedance analyser. Fluctuations of the measured value are in the ranks of the least significant measurement bit (LSB), i.e. at the level of 10^{-4} of the measured value.

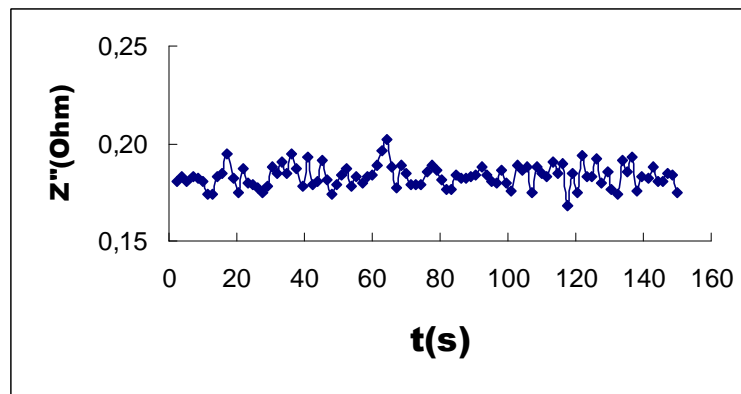
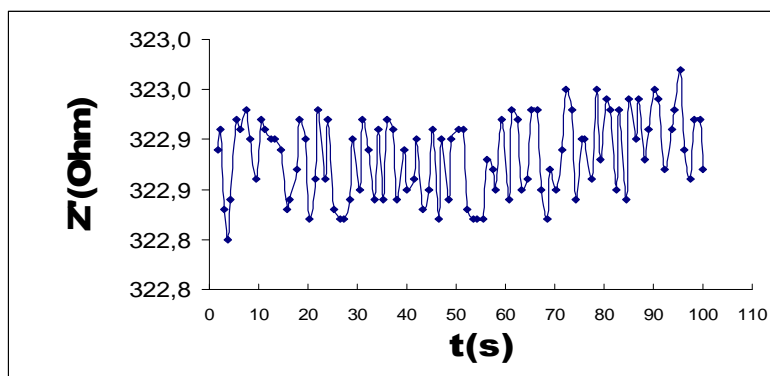


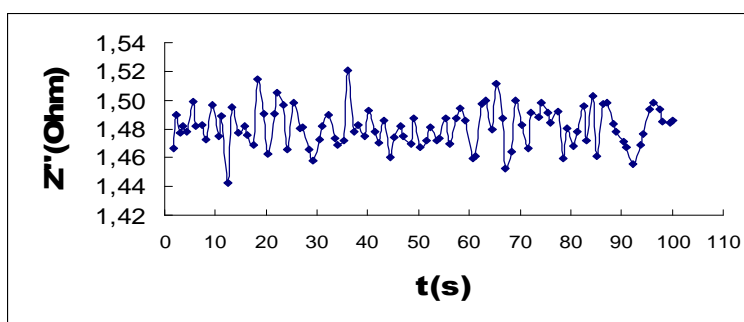
Fig. 5. Imaginary component of water impedance for the frequency of 1 kHz. Variability in time.

The imaginary component of water impedance in the time of 150 seconds does not reveal any observable systematic changes. The value fluctuates at the amplitude of ca. 0.03 ohm. The impact on the resolution of the impedance analyser is imperceptible.

Identical measurements were carried out for the frequency of 10kHz. The results are presented in fig. 6 and fig. 7. Result variability is slightly higher as compared with the frequency of 1kHz. No systematic changes of the mean value are observable for either component.

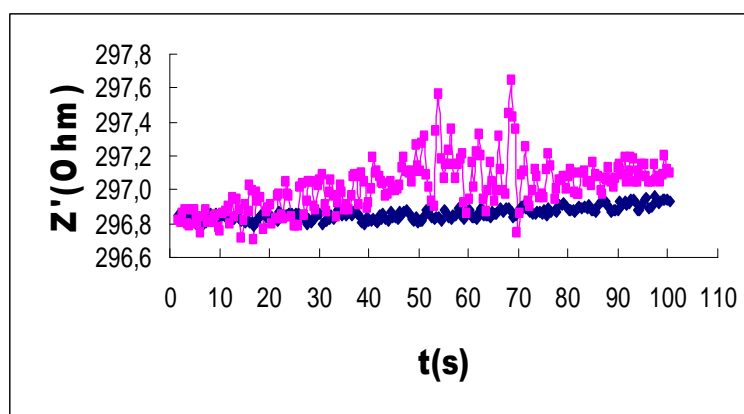


Rys. 6. Składowa rzeczywista impedancji wody dla częstotliwości 10kHz. Zmienność w czasie.



Rys. 7. Składowa urojona impedancji wody dla częstotliwości 10kHz. Zmienność w czasie.

W celu określenia wpływu obecności pęcherzyków powietrza w obszarze pomiarowym na wartość impedancji, na dnie zbiornika umieszczono dren polietylenowy, którego wylot położony był w połowie odległości pomiędzy elektrodami. Dren zasilany był pompką powietrzną o wydajności przepływu około 0,1 l/s. Odległość elektrod 39 cm, głębokość 12 cm, elektrody w układzie współosiowym. Częstotliwość sygnału pomiarowego 9kHz, amplituda 1V. Wyniki przedstawiono na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Składowa rzeczywista impedancji wody dla częstotliwości 9kHz. Romby – sygnał w nieobecności pęcherzyków w przestrzeni pomiarowej. Kwadraty – Przepływ powietrza z dna ku powierzchni.

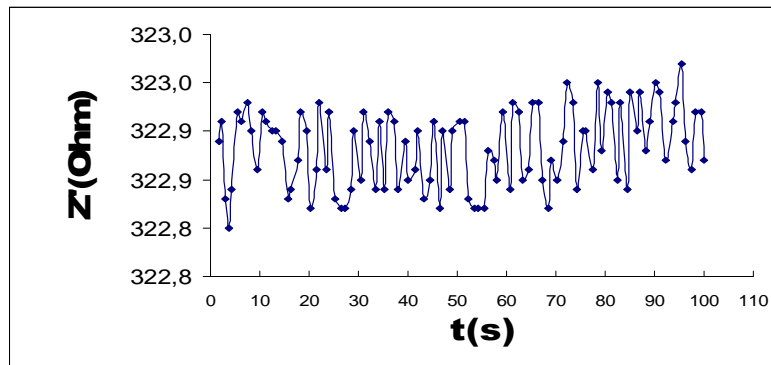


Fig. 6. Real component of water impedance for the frequency of 10kHz. Variability in time.

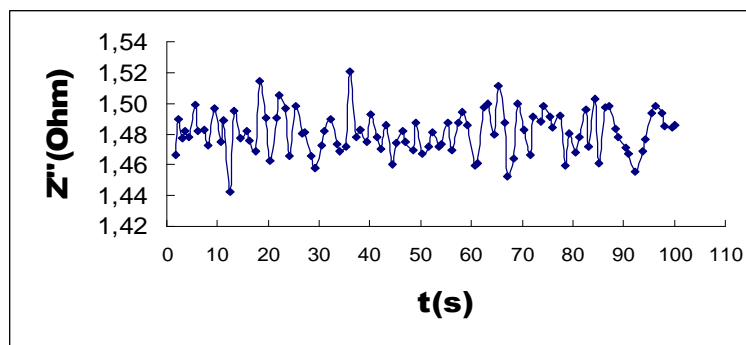


Fig. 7. Imaginary component of water impedance for the frequency of 10kHz. Variability in time.

In order to determine the impact of air bubbles present within the measurement zone on the impedance value, a polyethylene drain was placed at the bottom of the container with the exhaust part located half way between the electrodes. The drain was fed with an air pump with the flow capacity of approximately 0.1 l/s. The distance between the electrodes: 39 cm, depth: 12 cm, the electrodes positioned in coaxial configuration. Measuring signal frequency: 9kHz, amplitude 1V. The results are presented in fig. 8 and 9.

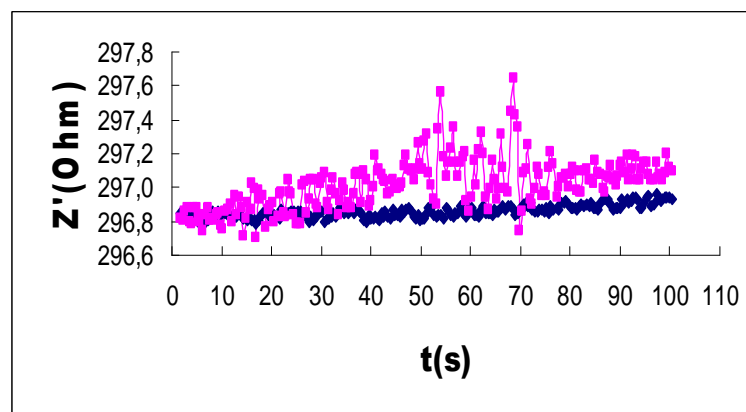
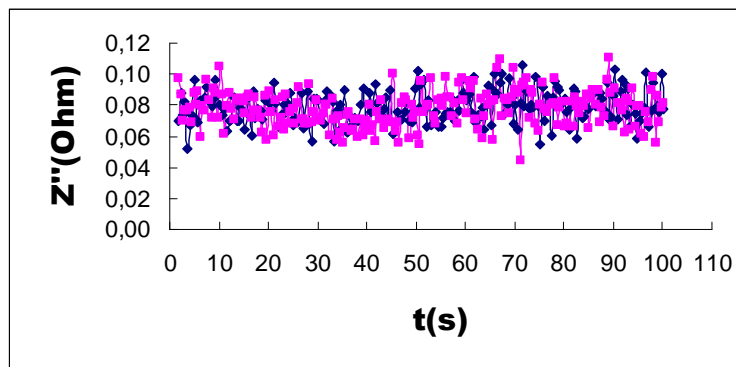


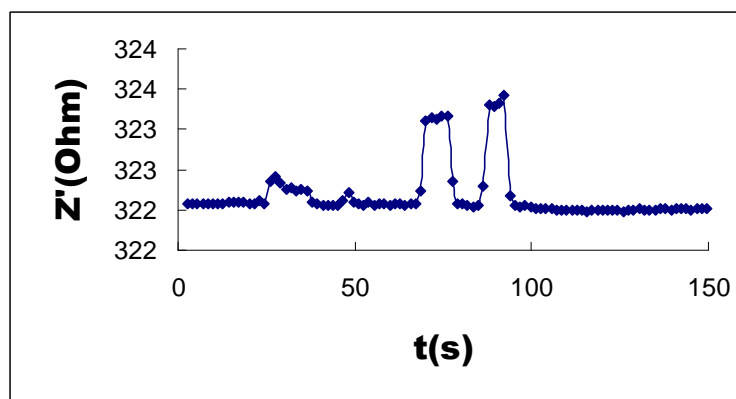
Fig. 8. Real component of water impedance for the frequency of 9kHz. Rhombi – signal in the absence of air bubbles within the measurement area. Squares – air flow directed from the bottom to water surface.



Rys. 9. Składowa urojona impedancji wody dla częstotliwości 9kHz. Romby – sygnał w nieobecności pęcherzyków w przestrzeni pomiarowej. Kwadraty – Przepływ powietrza z dna ku powierzchni.

Wyraźnie widoczne fluktuacje sygnału składowej rzeczywistej spowodowane są przepływem powietrza przez obszar pomiaru. Brak wpływu przepływu powietrza na wartość składowej urojonej, która pozostaje niezmienna w granicach błędów pomiarowych.

Pierwszym obserwowanym obiektem pochodzenia biologicznego były palce dłoni wprowadzane w obszar międzyelektrodowy. Układ elektrod współosiowy, odległość elektrod 39 cm, głębokość 13 cm, częstotliwość sygnału pomiarowego 1kHz, amplituda 1V. W określonych momentach zanurzano jeden, dwa lub trzy palce. Wyniki przedstawione na rys 10 i 11.



Rys. 10. Składowa rzeczywista impedancji dla częstotliwości 1kHz w funkcji czasu. Zanurzenie pojedynczego palca w okolicy 25s i 43s. Dwa palce zanurzono w okolicy 70s. Trzy palce dla 86 s. Zmiana impedancji dla jednego palca widoczna wyraźnie, ale nieproporcjonalnie mniejsza od pozostałych.

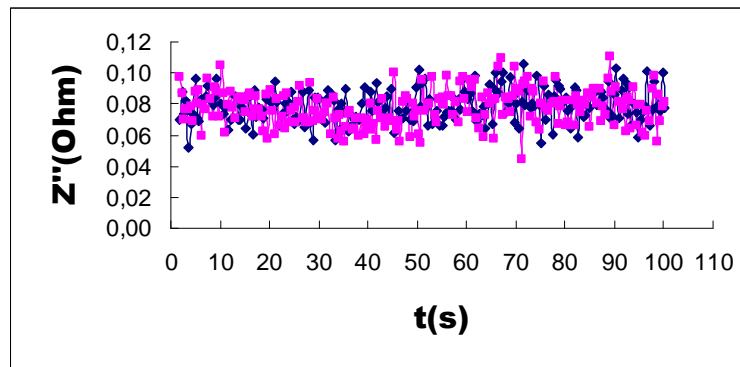


Fig. 9. Imaginary component of water impedance for the frequency of 9kHz. Rhombi – signal in the absence of air bubbles within the measurement area. Squares – air flow directed from the bottom to water surface.

The clearly visible signal fluctuations of the real component are caused by the flow of air through the measurement area. There is no impact of the flow of air on the value of the imaginary component, which remains unchanged within the measurement error limits.

The first observed biological objects were the experimenter's fingers inserted in the area between the electrodes. Electrode configuration: coaxial, distance between the electrodes: 39 cm, depth: 13 cm, measuring signal frequency 1kHz, amplitude 1V. One, two or three fingers were inserted at specified times. The results are presented in fig. 10 and 11.

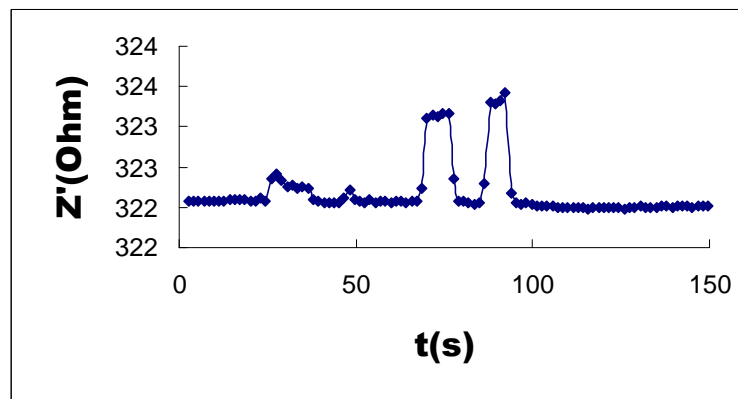
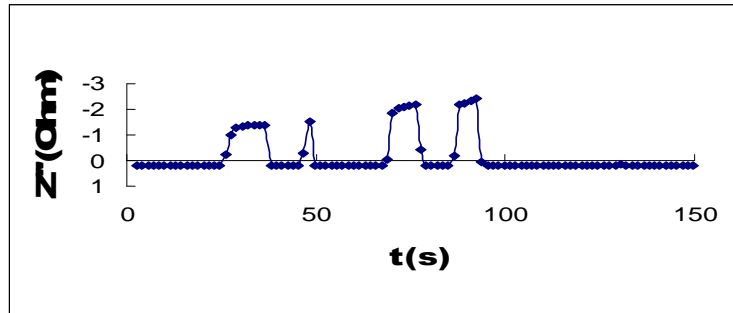


Fig. 10. Real component of water impedance for the frequency of 1kHz in a time function. Immersion of a single finger at ca. 25 and 43 sec. Two fingers were inserted at ca. 70 sec. Three fingers at 86 sec. Impedance variation is clearly visible in the case of a single finger, however, it is disproportionately lower in the other configurations.

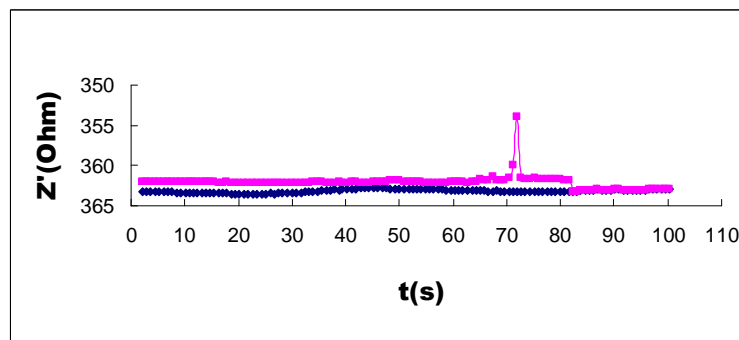


Rys. 11. Składowa urojona impedancji dla częstotliwości 1 kHz w funkcji czasu. Zanurzenie pojedynczego palca w okolicy 25s i 43s. Dwa palce zanurzone w okolicy 70s. Trzy palce dla 86 s. Wyraźnie widoczne zmiany składowej urojonej, amplituda zmian rośnie wraz z liczbą zanurzonych palców.

Porównując wykresy dla składowej rzeczywistej i urojonej wyraźnie widać różnicę w czułości obu składowych. Zmiana składowej rzeczywistej jest poniżej 1% wartości mierzonej nawet w przypadku trzech palców. Składowa urojona z wartości ujemnej równej około 0,18 oma osiąga około 2 omy. Zmiana jest bardzo wyraźna i jednoznaczna. Obecność jednego palca w przypadku składowej rzeczywistej może być przeoczona przy analizie wykresu.

Podczas pomiarów mających na celu detekcję ryby w obszarze pomiarowym, konfiguracja elektrod została zmieniona z współosiowej na koplanarną. Położenie elektrod w jednej płaszczyźnie jest konfiguracją pozwalającą na umieszczenie elektrod na dnie akwenu. Są one wtedy mniej podatne na uszkodzenie przez przepływające obiekty a ich umocowanie nie sprawia problemów natury technicznej. Wydaje się, że docelowa konfiguracja koplanarna daje większe możliwości instalowania matrycy elektrodowej na ścianach budowli hydrotechnicznych, dnie lub obiektach zanurzonych. W przypadku macierzy wielu elektrod, możliwe jest oznaczenie kierunku poruszania się obiektu i wyznaczenie jego rozmiarów. Konfigurację koplanarną stosowaną w doświadczeniach pokazano na rys. 1.2.

Ryba wykorzystywana jako obiekt testowy miała długość ciała rzędu 5 cm (z pominięciem ogona). Elektrody ustawione były w jednej płaszczyźnie na głębokości 10cm. Odległość środków elektrod była równa 14cm. Częstotliwość pomiarowa 1kHz, amplituda sygnału 1V. Wyniki przedstawiono na rys.12 i 13.



Rys. 12. Składowa rzeczywista impedancji. Częstotliwość 1kHz. Kwadraty – dane pomiarowe z detekcją ryby w okolicy 72 sekundy. Romby – analogiczna seria pomiarów bez ryby w pobliżu elektrod.

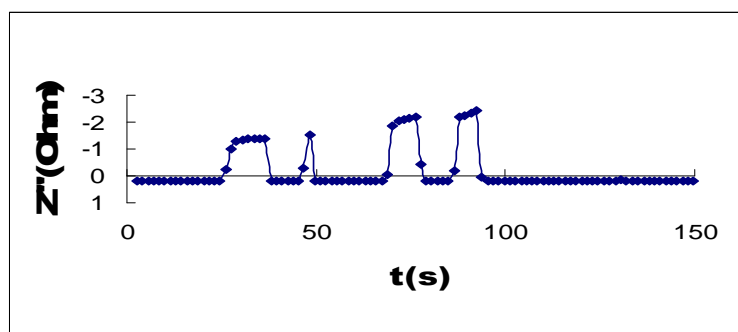


Fig. 11. Imaginary component of water impedance for the frequency of 1 kHz in a time function. Immersion of a single finger at ca. 25 and 43 sec. Two fingers were inserted at ca. 70 sec. Three fingers at 86 sec. Clearly observable variations of the imaginary component, variation amplitude increases with the number of inserted fingers.

When comparing the charts for the real and imaginary components we observe an explicit difference in the sensitivity of both components. The variation of the real component constitutes less than 1% of the measured value, even in the case of insertion of three fingers. The value of the imaginary component increased from the negative value of ca. -0.18 ohm to ca. 2 ohms. The variation is clear and unambiguous. The presence of one finger in the case of the real component, on the other hand, may be overlooked in chart analysis.

In the course of measurements aimed at fish detection, the electrode configuration was altered from coaxial to coplanar configuration. Electrode placement on one plane is a configuration allowing locating electrodes at the bottom of a body of water. Such an arrangement causes the electrodes to be less susceptible to damage inflicted by passing objects and, moreover, their placement itself does not cause any technical problems. It seems that the final coplanar configuration provides greater possibilities of installing an electrode matrix on the walls of hydrotechnical structures, the bottom of a body of water or on submerged objects. In the case of matrixes consisting of many electrodes, it is possible to determine the direction of a given object as well as its dimensions. The coplanar configuration used in the experiments is presented in fig. 1.2.

The fish used as a test object had the body length of ca. 5 cm (excluding the tail). The electrodes were positioned on one plane at the depth of 10cm. The distance between the central parts of the electrodes was equal to 14cm. Measurement frequency: 1kHz, signal amplitude: 1V. The results are presented in fig. 12 and 13.

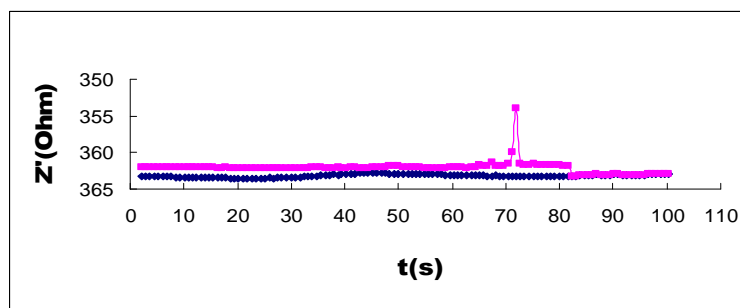
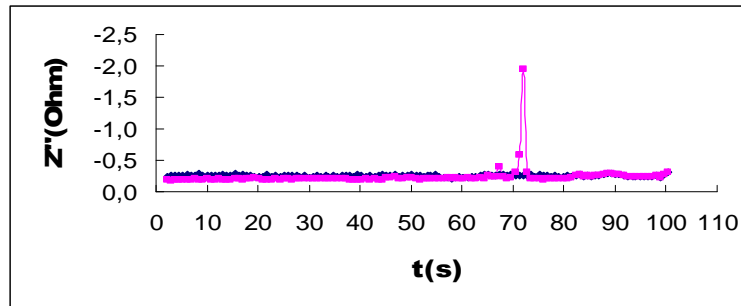


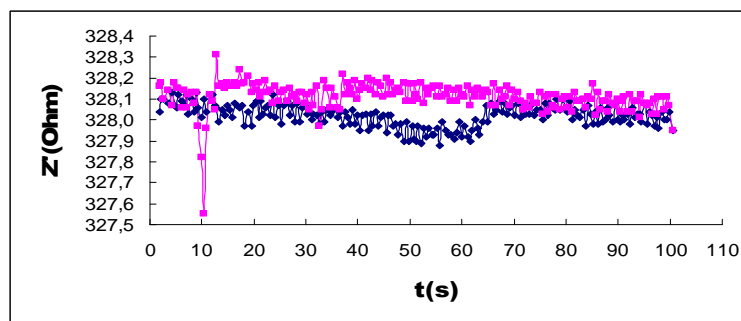
Fig. 12. Real component of impedance. Frequency 1kHz. Squares – measurement data with fish detection at ca. 72 sec. Rhombi – analogous series of measurements without a fish in the proximity of the electrodes.



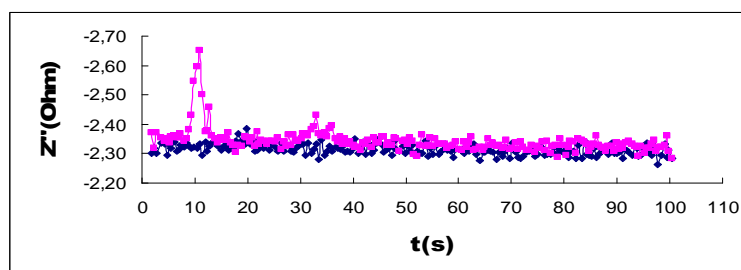
Rys. 13. Składowa urojona impedancji. Częstotliwość 1kHz. Kwadraty – dane pomiarowe z detekcją ryby w okolicy 72 sekundy. Romby – analogiczna seria pomiarów bez ryby w pobliżu elektrod.

W momencie detekcji (epizod w okolicy 72s na wykresie) ryba znajdowała się w odległości około 10-11cm od zestawu elektrod, 2cm poniżej prostej łączącej środki elektrod. Zmiana składowej rzeczywistej jest na poziomie 2% wartości średniej. W przypadku składowej urojonej wpływ jest dużo większy. Wartość zmienia się od około 0,2 oma do 2 omów co daje 1000% wzrostu.

Jako przykład czułości metody w niekorzystnej konfiguracji pomiarowej przedstawiono wyniki w konfiguracji elektrod takiej, jak dla wyników na rys.12 i 13. Ryba w trakcie detekcji była zlokalizowana około 15 cm od powierzchni elektrod i około 5-6 cm poniżej linii elektrod, a zatem zdecydowanie poza obszarem największej czułości. Wyniki przedstawiono na rys. 14 i 15.



Rys. 14. Składowa rzeczywista impedancji. Częstotliwość 1kHz. Kwadraty – dane pomiarowe z detekcją ryby w okolicy 11 sekundy. Romby – analogiczna seria pomiarów bez ryby w pobliżu elektrod.



Rys. 15. Składowa urojona impedancji. Częstotliwość 1kHz. Kwadraty – dane pomiarowe z detekcją ryby w okolicy 11 sekundy. Romby – analogiczna seria pomiarów bez ryby w pobliżu elektrod.

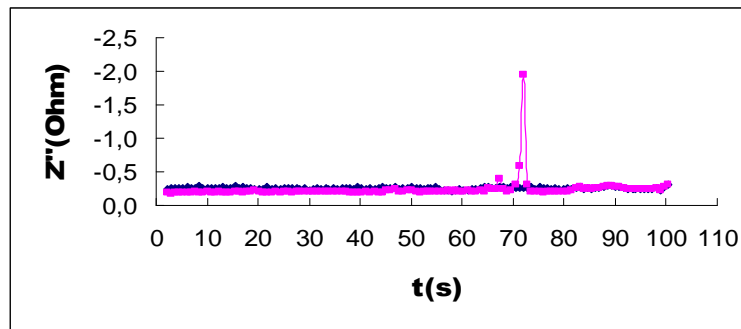


Fig. 13. Imaginary component of impedance. Frequency 1kHz. Squares – measurement data with fish detection at ca. 72 sec. Rhombi – analogous series of measurements without a fish in the proximity of the electrodes.

At the moment of detection (an episode at ca. 72 sec. as represented on the chart) the fish was at a distance of approx. 10-11 cm from the electrodes, 2 cm below the straight line connecting the central parts of the electrodes. The variation of the real component is at the level of 2% of the mean value. In the case of imaginary components the impact is much higher. The value changes from ca. 0.2 ohm to 2 ohms, which gives an increase of 1000%.

The sensitivity of the method in an unfavourable measuring configuration was presented on the example of a similar electrode configuration to the one applied for the results presented in fig. 12 and 13. At the moment of detection, the fish was located ca. 15 cm from the electrode and ca. 5-6 cm below the electrode line, and, therefore, definitely beyond the area of highest sensitivity. The results are presented in fig. 14 and 15.

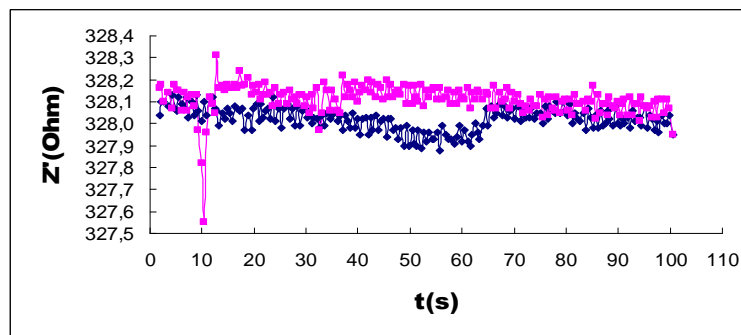


Fig. 14. Real component of impedance. Frequency 1kHz. Squares – measurement data with fish detection at ca. 11 sec. Rhombi – analogous series of measurements without a fish in the proximity of the electrodes.

Wyraźnie widoczny na wykresie wpływ obecności ryby. Zmiana składowej rzeczywistej rzędu 0,7 oma. Charakterystyczną cechą jest zmniejszenie się wartości impedancji w stosunku do wartości średniej, co spowodowane jest obecnością obiektu (ryby) położonej równoległe do płaszczyzny elektrod. Zmiana składowej urojonej rzędu 25% wartości średniej wykracza zdecydowanie poza zakres zmienności spowodowany fluktuacjami.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Przedstawione wyniki pomiarów pozwalają stwierdzić, że impedancja wody mierzona metodą czteroelektrodową jest stała w szerokim zakresie częstotliwości. Wartość składowej rzeczywistej zależna jest od przewodności wody i geometrii układu elektrod i dla danej geometrii pozostaje niezmienna w czasie rzędu minut. Stałość składowej rzeczywistej osiąga 0,01% wartości średniej. Tak duża stałość składowej rzeczywistej pozwala na detekcję niezwykle małych odchyłeń od wartości średniej, pozwalając na pewną detekcję małych zmian oporu. W przypadku składowej urojonej, zmiany są nieco większe, ale sama składowa jest zbliżona do zera co sprawia, że czułość pomiarów nie jest istotnie różna od tej, którą osiąga się dla składowej rzeczywistej.

Detekcja pęcherzyków powietrza jest wyraźnie obserwowana w zakresie składowej rzeczywistej natomiast nie powoduje dostrzegalnych zmian składowej urojonej. Ten ciekawy fakt można wytłumaczyć brakiem polaryzacji międzyfazowej w przypadku pęcherzyków. Powietrze powoduje jedynie zmniejszenie przekroju poprzecznego słupa wody pomiędzy elektrodami, co przekłada się na zmianę składowej rzeczywistej (oporności). Brak występowania polaryzacji nie powoduje zmian składowej urojonej. Podobna sytuacja będzie zachodziła w przypadku wszystkich obiektów martwych, np. kawałków drewna, kamieni, zawieszin pochodzenia mineralnego. Pozwala to na jednoznaczne określenie charakteru przedmiotu i odróżnienie go od organizmu żywego (człowieka, ryby). Zaletą spektroskopii dielektrycznej jest jednoznaczna detekcja obiektu w obecności pęcherzyków powietrza, których wpływ jest bardzo łatwy do oddzielenia z powodu oddziaływania jedynie na składową rzeczywistą impedancji. Dodatkową zaletą metody jest stabilna detekcja obiektów zanurzonych w sytuacji, gdy metody hydroakustyczne nie są w stanie oddzielić wpływu obiektu od zakłóceń spowodowanych silnymi echemi pochodzącymi od pęcherzyków.

Czynnikiem odpowiedzialnym za występowanie polaryzacji międzyfazowej w przypadku organizmów żywych jest obecność błon komórkowych [3]. Rozdzielając obszary dobrze przewodzące (wnętrza komórek od środowiska wodnego) ograniczają ruch jonów i wywołują polaryzację elektryczną w wyniku powstania warstwy podwójnej [4]. Wyraźnie jest to widoczne podczas detekcji palców lub ryb. Zmiany składowej urojonej w stosunku do wartości niezaburzonej są wielokrotnie silniejsze niż składowej rzeczywistej. Efekt ten pozwala bez kłopotu odróżnić organizm żywy od materii nieożywionej a także od zwłok.

W pracy wykazano możliwość zastosowania zespołu elektrod w konfiguracji koplanarnej pozwalającej na objęcie obserwacją przestrzeni położonej przed elektrodami. Istnieje duża swoboda w doborze wielkości i rozstawienia elektrod, co daje dodatkowe możliwości kształtowania obszaru detekcji adekwatnie do zapotrzebowań. Teoria rozkładu pola wytwarzanego przez dowolną konfigurację elektrod na płaszczyźnie pozwala na precyzyjne zaprojektowanie zespołu elektrod i wyznaczenie obszaru detekcji obiektów. Poprzez dobór średnicy elektrod możliwe jest zoptymalizowanie czułości detekcji dla obiektów o założonej wielkości, np. ryb o określonych rozmiarach.

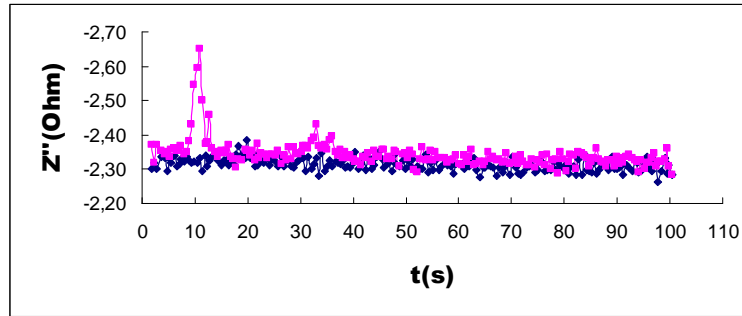


Fig. 15. Imaginary component of impedance. Frequency 1kHz. Squares – measurement data with fish detection at ca. 11 sec. Rhombi – analogous series of measurements without a fish in the proximity of the electrodes.

A clearly observable impact of the presence of the fish. The variation of the real component of ca. 0.7 ohm. A characteristic feature is a decrease of the impedance value in relation to the mean value caused by the presence of an object (fish) located parallel to the electrode plane. The variation of the imaginary component of ca. 25% of the mean value is definitely beyond the variability range caused by fluctuations.

DISCUSSION OF RESULTS

The presented measurement results allow stating that water impedance measured with a four-electrode method remains unchanged for a wide frequency range. The value of the real component depends on water conductivity and geometry of an electrode system, and remains unchanged for a given geometry within the scope of several minutes. The constancy of the real component reaches 0.01% of the mean value. Such a high constancy of the real component allows detections with extremely small deviations from the mean value, and certain detections of slight resistance variations. In the case of the imaginary component, the variations are somewhat higher, however the component itself is approximately equal to zero, causing the measurement sensitivity not to be significantly different from that reached for the real component.

The detection of air bubbles is clearly visible in the case of the real component, however, it does not cause any noticeable variations in the imaginary component. This interesting fact may be explained by a lack of interphase polarization in the case of air bubbles. The air only leads to a decrease in the cross section of the water column between the electrodes, which involves a variation of the real components (resistance). The lack of polarization does not impose any variations of the imaginary component. A similar situation will take place in the case of any dead objects, e.g. pieces of wood, stones, mineral suspensions. This allows unambiguous specification of an object's nature and its differentiation from a living organism (human, fish). An advantage of dielectric spectroscopy is explicit detection of an object in the presence of air bubbles, whose impact is very easy to isolate due to its effect only on the real component of impedance. An additional advantage of the method lies in a stable detection of submerged objects in a situation when hydroacoustic methods are unable to differentiate the impact caused by an object from the disturbances caused by a strong echo reflected from the air bubbles.

Wpływ głębokości przestaje być mierzalny, gdy jest ona porównywalna z rozstawem elektrod pomiarowych. Jest to cecha korzystna, pozwalająca na zaniechanie wpływu zmian struktury powierzchni wody na wynik detekcji w sytuacji, gdy zmiana spowodowana np. zafalowaniem może generować artefakty pomiarowe.

The factor responsible for interphase polarization in the case of a living organism is the presence of cell membranes [3]. They limit ion movement by separating the highly conductive areas (cell insides) from the water environment and induce electrical polarization as a result of the production of a double layer [4]. This is explicitly observable in the detection of fingers or fish. The variations of the imaginary component in relation to an undisturbed value are many times higher than the variations of the real component. This effect makes it easy to differentiate a living organism from inanimate matter or a corpse.

The research demonstrated the possibility of applying a coplanar electrode configuration enabling observation of the area located before the electrodes. There is a large freedom in the selection of electrode sizes and arrangements, which provides additional possibilities of shaping the detection zone according to existing needs. The theory of distribution of the field generated by a random electrode configuration on a plane allows establishing an accurate pattern of electrodes and designating an area of object detection. Proper selection of electrode diameters allows optimizing detection sensitivity for the objects of specified sizes, e.g. fish. The impact of depth is no longer measurable when it is comparable to the distance maintained between the electrodes. This is a favourable feature, allowing disregarding modifications in the water surface structure on a detection result in a situation when such an alteration, resulting for instance from waves, may generate measurement artefacts.

LITERATURA/ BIBLIOGRAPHY

1. Macdonald J.R.; Impedance spectroscopy Theory, Experiment and Applications. Wiley-Interscience ISBN 0-471-64749-7, USA 2005,
2. Salamon R.; Systemy hydrolokacyjne. Wydawnictwo Gdańskie ISBN 83-87359-98-X, Gdańsk 2006,
3. Schwan H.P.; Electrical properties of tissues and cell suspensions. Advances in Biology and Medical Physics. Nr 5, 1957, str. 147-209,
4. Pethig R., Kell D.B.; The passive electrical properties of biological systems: Their significance in physiology, biophysics and biotechnology. Physics in Medicine and Biology. Nr8, vol. 32 1987, str. 933-970.

