

# Konstrukcja elektrometru wibracyjnego z identyfikacją znaku ładunku

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia nietypowe rozwiązanie elektrometru wibracyjnego z detekcją synchroniczną służącego do pomiaru napięć statycznych w zakresie od 2,5 V do 10 kV lub pól elektrycznych o natężeniu od 120V/m. Rezystancja wejściowa przyrządu jest ograniczona jedynie upływnością izolacji elektrody wejściowej. Skonstruowany elektrometr umożliwia identyfikację znaku ładunku elektrycznego bez skomplikowanych układów fotoelektrycznych śledzących fazę ruchu elektrody drgającej. Funkcji określania znaku często nie posiadają nawet elektrometry laboratoryjne, np. elektrometr z młynkiem polowym typu MFM 200A. Przyrząd jest odporny na zakłócenia o częstotliwości 50 Hz oraz wyższej, więc może być stosowany w warunkach przemysłowych. Miernik ma autonomiczne zasilanie z baterii 6 lub 9V.

**Abstract.** This paper presents an unusual solution of a vibrating electrometer with synchronous detection for measuring static voltages in the range from 2.5 V to 10 kV or electric fields having intensity from 120 V/m. The input resistance of the instrument is limited only by the leakage of the input electrode. The electrometer constructed by the author also allows identification of the electrical charge sign (a synchronous detector to reduce noise and recover the field sign (positive or negative) without complicated photovoltaic systems that track the phase of the vibrating electrode, e.g. electrometer with field mill type MFM 200A. The instrument is resistant to interference of 50 Hz or higher, so it can be used in industrial conditions. The meter has autonomous power from 6 or 9 V batteries. (**The new solution of vibrating electrometer with identification of charge sign.**)

**Słowa kluczowe:** elektrometr, detekcja synchroniczna, identyfikacja znaku ładunku, redukcja szumów.

**Keywords:** electrometer, synchronous detection, identification of the electrical charge sign, noise reduction.

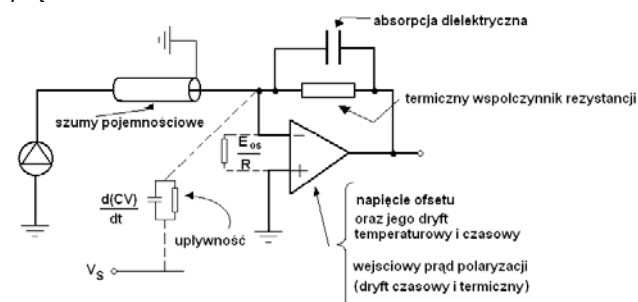
## Wstęp

Obszerne przedstawienie metod pomiarowych stosowanych w elektrostatyce zawierają prace [1,2]. Bezpośredni pomiar (zwłaszcza wysokich) napięć statycznych przy pomocy mierników skonstruowanych na elementach półprzewodnikowych jest znacznie utrudniony.

Na przeszkodzie stoi tutaj zarówno upływność bramek tranzystorów JFET i MOSFET ograniczająca rezystancję wejściową mierników do wielkości rzędu  $10^{12} \Omega$  jak i ich nieodporność na napięcia przekraczające kilkanaście woltów.

Obwody wejściowe mierników ze sprzężeniem bezpośrednim stałoprądowym wykorzystują wzmacniacz operacyjny w układzie przetwornika prąd-napięcie lub wzmacniacza nieodwracającego.

Rysunek 1 przedstawia główne źródła błędów ograniczających możliwość pomiaru bardzo słabych prądów.



Rys. 1. Źródła błędów przetwornika prąd - napięcie

## Mierniki z przetwarzaniem

Większość wad związanych ze sprzężeniem stałoprądowym można usunąć przez przetwarzanie wejściowego sygnału stałego na zmienny. Radykalny wzrost zarówno dopuszczalnych napięć wejściowych jak i rezystancji występuje przy przetwarzaniu elektromechanicznym.

W elektrometrze wibracyjnym cykliczne zbliżanie i oddalanie ruchomej elektrody wytwarza wahania potencjału które można zmierzyć woltmierzem napięć zmiennych o odpowiednio wysokiej rezystancji wejściowej [3].

Inny sposób pomiaru polega na zwarcie ruchomej elektrody do ziemi przez mikroamperomierz (lub przetwornik prąd – napięcie), i pomiar indukowanego prądu zmiennego. Zamiast oscylującej elektrody stosuje się również „młynki polowe” [4] w których elektroda połączona z przetwornikiem prąd-napięcie jest nieruchoma, natomiast między nią a badaną powierzchnią o mierzonym potencjale wiruje uziemiona metalowa tarcza z wycięciami.

Istotną zaletą elektrometrów z przetwarzaniem mechanicznym jest ich bardzo wysoka rezystancja wejściowa, gdyż ruchomy element przyrządu nie pobiera podczas pracy żadnego ładunku z obiektu badanego.

## Model teoretyczny elektrometru wibracyjnego

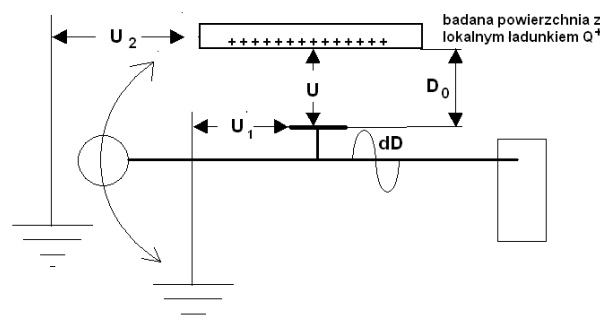
Rysunek 2 przedstawia zasadę działania elektrometru. Drgania kamertonu powodują ruch połączonej z nim elektrody umieszczonej w odległości  $D_0$  od powierzchni o mierzonym potencjale  $U_2$ . Chwilowa odległość  $D$  jest równa:

$$(1) \quad D = D_0 + D_1 \cdot \sin(\omega t)$$

gdzie:  $D_1$  - amplituda,  $D_0$  - średnia (spoczynkowa) odległość,  $\omega$  - pulsacja,  $\omega = 2\pi f$  (rad/s),  $f$  - częstotliwość oscylacji w Hz.

Chwilowa pojemność między wibrującą elektrodą o powierzchni  $A$ , a próbką wynosi:

$$(2) \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{D_0 + D_1 \cdot \sin(\omega t)}$$

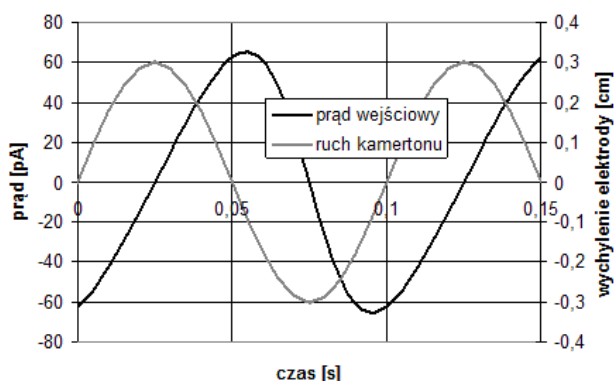


Rys. 2. Działanie kondensatora z elektrodą drgającą

Prąd chwilowy płynący między masą a ruchomą elektrodą:

$$(3) I = U \frac{dc}{dt} = U \frac{d}{dt} \left( \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{D_0 + D_1 \cdot \sin(\omega t)} \right) = -U \epsilon \epsilon_0 A \frac{D_1 \omega \cos(\omega t)}{[D_0 + D_1 \cdot \sin(\omega t)]^2}$$

Zależność prądu chwilowego, i wychylenia elektrody od czasu przedstawia rysunek 3. Przyjęto  $A = 1,5 \text{ cm}^2$ ,  $D_0 / D_1 = 6,66$ . Elektroda ruchoma porusza się względem elektrody nieruchomej o potencjale dodatnim 100V. Częstotliwość drgań kamertonu równa 10 Hz.



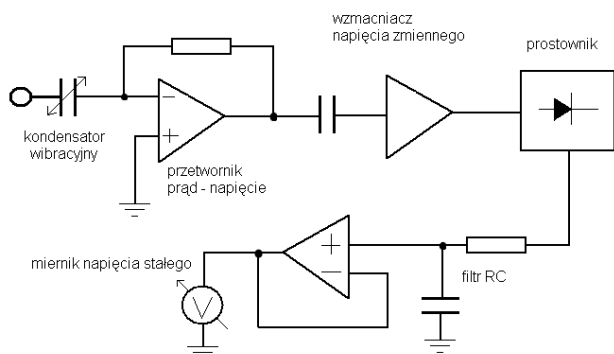
Rys. 3. Wychylenie elektrody oraz chwilowa wartość prądu w funkcji czasu

Wychylenia o znaku dodatnim oznaczają fazę oddalania się ruchomej elektrody od elektrody wejściowej lub od badanego obiektu.

Prąd indukowany w drgającej elektrodzie jest przesunięty o kąt  $90^\circ$  względem jej położenia, czyli maksymalnym wychyleniom odpowiadają prądy o zerowej wartości.

### Konstrukcja elektrometru bez identyfikacji znaku ładunku

Rysunek 4 przedstawia schemat blokowy elektrometru bez identyfikacji znaku. Podczas drgań kondensatora wibracyjnego na wyjściu wzmacniacza napięcia zmiennego pojawia się sygnał zbliżony do sinusoidalnego o amplitudzie proporcjonalnej do wysokości potencjału nieruchomej okładki kondensatora lub od natężenia pola elektrycznego między okładką drgającą a naelektryzowanym obiektem. Dodatnia i ujemna faza tego sygnału występuje odpowiednio przy zbliżaniu i oddalaniu drgającej elektrody od powierzchni naładowanej dodatnio.

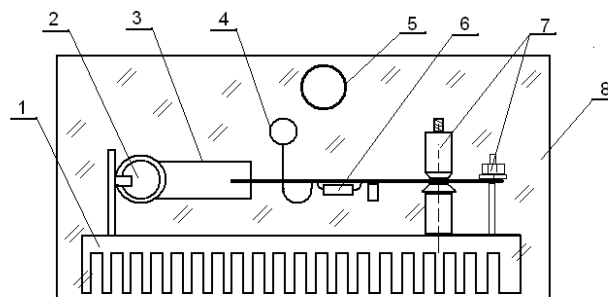


Rys. 4. Schemat blokowy prostego elektrometru wibracyjnego z prostownikiem liniowym

Drgający kamerton składa się ze sprężystej płytki dwustronnie metalizowanej na której zrealizowano układ

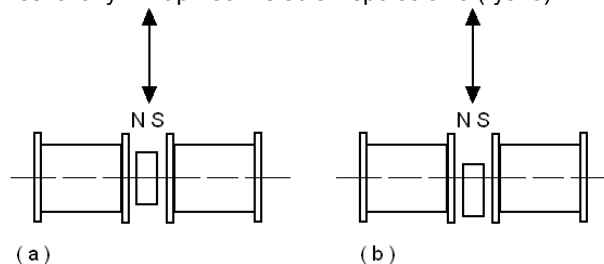
elektroniczny elektrometru, zakończonej na jednej krawędzi napędzającym magnesem neodymowym, zaś sztywno zamocowanej na krawędzi przeciwnej. Na płytce drukowanej zamontowano dwa warianty detektorów.

Mechaniczna konstrukcja elektrometru jest przedstawiona na rysunku 5. Elektroda drgająca kondensatora (4) wykonana została w formie cienkościennej miedzianej rurki o średnicy 5mm i długości 30 mm. Elektrode wejściową (5) stosowaną przy wyznaczaniu charakterystyki i czułości przyrządu stanowi rurka aluminiowa średnicy 10 mm izolowana od reszty konstrukcji dzięki wspornikom z tworzywa akrylowego. W położeniu „środkowym” odległość między tymi elektrodami wynosi 12mm a amplituda drgań 3mm. Przy pomiarach napięć wynoszących ponad 5kV jako elektrodę wejściową stosowano płytkę stalową o wymiarach 85 x 65 mm umieszczoną 22 mm nad elektrodą wibrującą.



Rys. 5. Mechaniczna konstrukcja modelu elektrometru 1 – uziemiona podstawa (profil aluminiowy), 2 – cewki układu napędowego, 3 – łącznik między magnesem a drgającą płytką, 4 – Elektroda ruchoma elektrometru, 5 – Elektroda nieruchoma (wejściowa), 6 – płytka drgająca z układem elektronicznym elektrometru, 7 – śruby mocujące i regulacyjne, 8 – boczne elementy obudowy z przezroczystej żywiczy akrylowej.

Do napędu wibratora zastosowano generator Hartleya z dzieloną indukcyjnością złożoną z dwóch cewek. Magnes napędzający element sprężysty może wykonywać swobodne drgania pionowo między cewkami (2) generatora umieszczonymi naprzeciw siebie współosiowo (rys. 6).



Rys. 6. Położenie spoczynkowe magnesu a – symetryczne, b – niesymetryczne

Impulsy napędowe pojawiają się w cewkach za każdym razem gdy magnes zbliża się w kierunku położenia środkowego, niezależnie od tego czy jest to ruch z dolnego, czy z górnego skrajnego położenia. Dlatego częstotliwość impulsów jest dwukrotnie wyższa od częstotliwości oscylacji mechanicznej wibratora.

W przedstawionym modelu częstotliwość drgań kamertonu mieści się w zakresie 9,5 – 11,1 Hz.

### Elektrometr wibracyjny z identyfikacją znaku ładunku

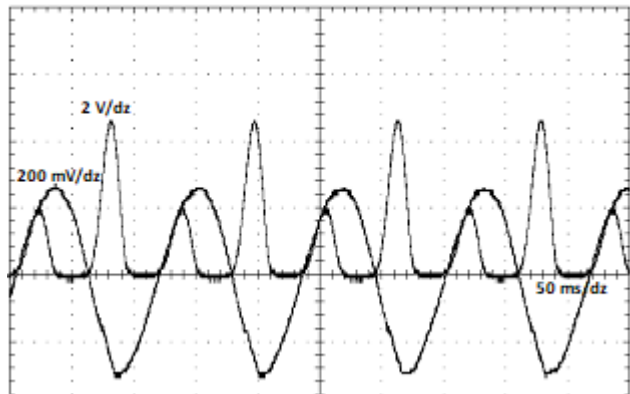
Zasadę detekcji synchronicznej przedstawia rysunek 8. Aby określić znak badanego ładunku lub napięcia należy do układu całkującego RC doprowadzić sygnał odpowiadający wyłącznie fazie zbliżania (lub oddalania) elektrody, a nie

sygnał sumaryczny jak to jest realizowane w uproszczonym elektrometrze wibracyjnym.

Sposób uzyskania impulsów kluczujących jest istotą niniejszej pracy.

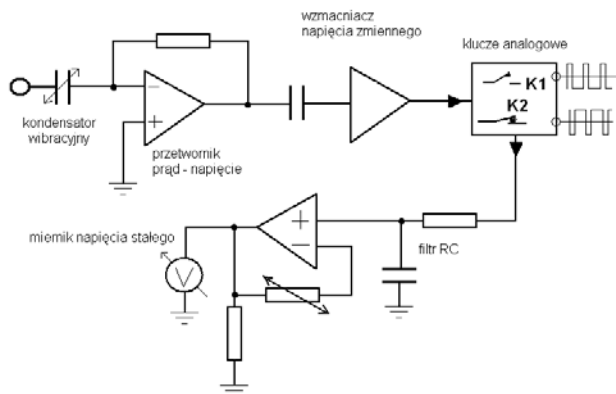
Sygnaly kluczujące uzyskano dzięki obniżeniu położenia spoczynkowego drgającego magnesu poniżej osi cewek napędowych.

Po zbliżeniu do drgającej elektrody płytki silikonowej naelektryzowanej ujemnie przez tarcie, otrzymano na oscyloskopie przebiegi jak na rysunku 7.

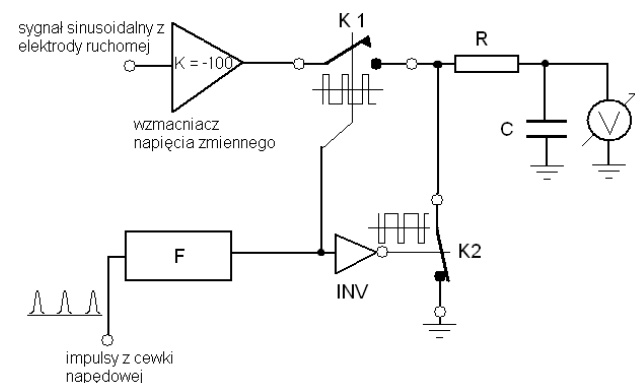


Rys. 7. Impulsy napędowe i sygnał na wyjściu wzmacniacza elektrometru po podaniu napięcia ujemnego na wejściową nieruchomą elektrodę.

Dzięki temu, że w tym przypadku impulsy napędowe przy ruchu magnesu w dół i w górę mają różne amplitudy, można przy pomocy separatora amplitudy uformować impulsy kluczujące detektor synchroniczny.



Rys. 8. Elektrometr z detektorem synchronicznym



Rys. 9. Sposób kluczowania sygnału przemiennego

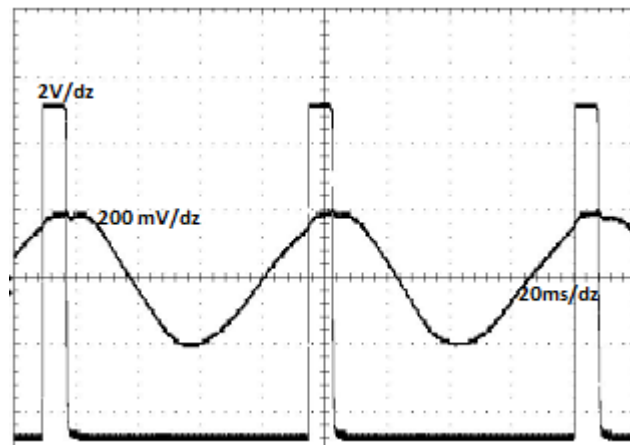
Zastosowano układ separujący przepuszczający jedynie impulsy z cewek napędowych o amplitudzie wyższej niż 1/3 napięcia zasilającego, a następnie obwód różniczkujący oraz układ przesuwania poziomów napięć, tak aby poziom

wysoki i niski impulsów sterujących kluczem analogowym typu 4066 odpowiadał dodatniemu i ujemnemu napięciu zasilania.

Schemat blokowy układu detektora kluczowanego przedstawia rysunek 9.

Sygnaly sterujące kluczami K1 i K2 mają przeciwne fazy dzięki inwertorowi INV. W momencie pojawienia się stanu wysokiego klucz K1 zamyka się otwierając drogę sygnałowi w kierunku układu całkującego RC. Natomiast stan niski sygnału sterującego kluczem K1 powoduje jego otwarcie zaś klucz K2 zamyka się powodując rozładowanie kondensatora wyjściowego przebiegające ze stałą czasową RC. Wygładzone wyjściowe napięcie stale mierzone dołączonym do elektrometru woltmierzem ma polaryzację zgodną z polaryzacją wejścia elektrometru.

Układ formujący F (rys. 9) został tak zaprojektowany by wytworzone impulsy kluczujące miały szerokość 8 ms. Odstęp między impulsami wynosi 90 ms ( $f = 11,1$  Hz). Położenie impulsów przedstawia rysunek 10.



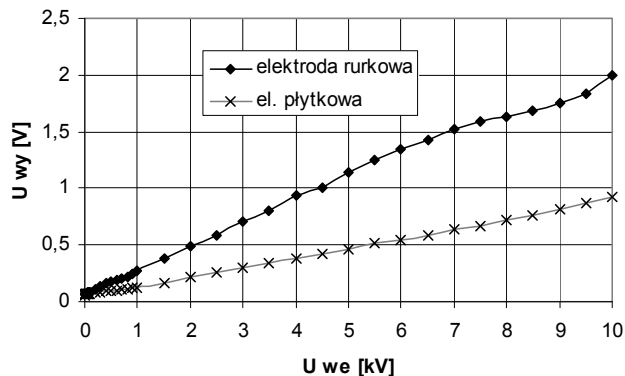
Rys. 10. Impulsy kluczujące na tle sygnału wywołanego dodatnią polaryzacją wejścia elektrometru

Jak widać położenie impulsów kluczujących nie jest idealnie zgodne z maksymalną wielkością sygnału mierzonego.

### Wyznaczenie charakterystyki modelu z prostownikiem jednopółkowym

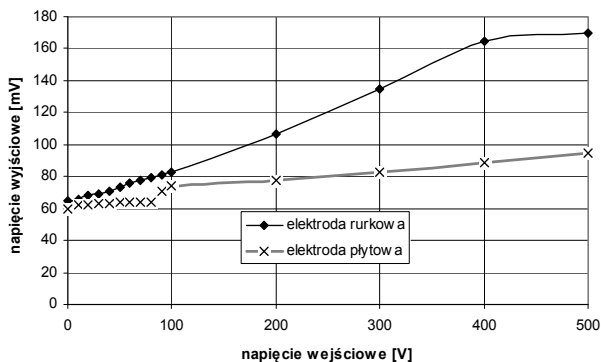
Do elektrody wejściowej (rurki położonej w odległości 12 mm od elektrody ruchomej lub płytki metalowej oddalonych o 22 mm) podłączono napięcie stałe o polaryzacji dodatniej z zasilacza regulowanego o zakresie 0 – 500V.

Dla wyższych napięć zastosowano zasilacz wysokiego napięcia. Układ był ekranowany jedynie częściowo, aluminiową podstawą elektrometru. Otrzymaną zależność między potencjałem elektrody wejściowej a napięciem stałym na wyjściu przyrządu (za prostownikiem i filtrem wygładzającym) przedstawiają rysunki 11 i 12.



Rys. 11. Charakterystyka elektrometru z prostownikiem jednopółkowym

Czułość przyrządu w znacznym stopniu zależy od odległości elektrody wejściowej od elementu drgającego. Elektroda rurkowa (rys. 11) umożliwia pomiar niższych napięć kosztem ograniczenia maksymalnych napięć wyjściowych.

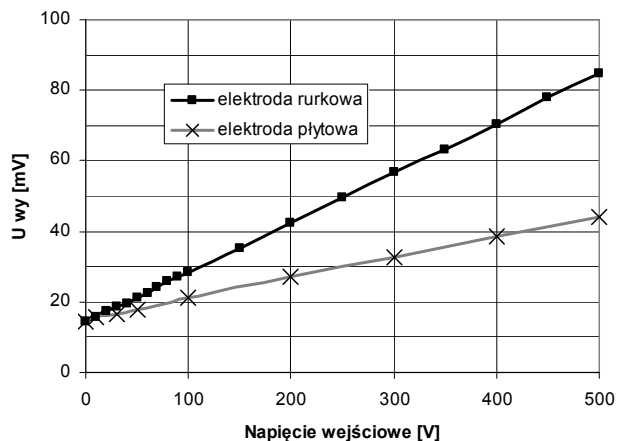


Rys. 12. Charakterystyka elektrometru z prostownikiem jednopółkowym przy napięciach wejściowych z zakresu 0 – 500V

Na wyjściu miernika występuje dość znaczne (65 mV) napięcie stałe nawet przy uziemieniu elektrody wejściowej. Jest to spowodowane brakiem korekcji offsetu wzmacniaczy operacyjnych oraz znacznym poziomem zakłóceń z sieci 50Hz. Napięcia zakłócające o tej, oraz wyższej częstotliwości przedostają się przez wzmacniacz i po detekcji nakładają się na sygnał użyteczny.

### Charakterystyka elektrometru z detektorem synchronicznym

Powtórzono wcześniejszy pomiar pobierając sygnał z wyjścia detektora synchronicznego, a nie z prostownika jednopółkowego. Ograniczono się do zakresu napięć wejściowych 0 – 500V. Uzyskano rezultat przedstawiony na rysunku 13.



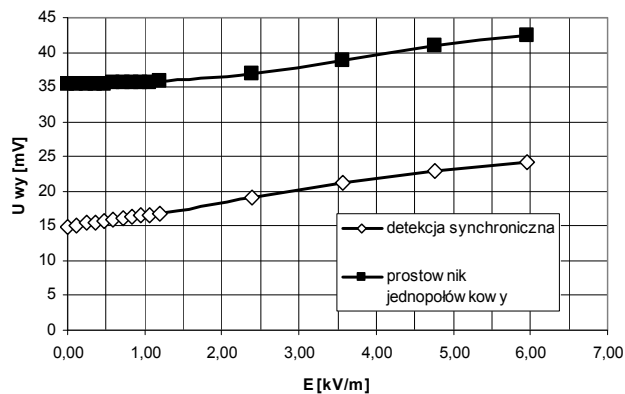
Rys. 13. Napięcie wyjściowe po detekcji synchronicznej przy napięciach wejściowych z zakresu 0 – 500V

Detekcja synchroniczna radykalnie zmniejsza (z 65 mV do 14,2 mV) poziom sygnału występującego mimo uziemienia wejścia elektrometru. Pozostaje składowa stała o napięciu około 14 -15 mV wynikająca z niedoskonałości wzmacniaczy operacyjnych, oraz sygnał użyteczny próbkowany w obszarze jego szczytowych wielkości.

### Pomiar natężenia pola elektrycznego

Wyznaczenie odpowiedzi elektrometru na pole elektryczne wymagało umieszczenia przyrządu między dwiema płaszczyznami przewodzącymi o znacznej powierzchni. Do powierzchni „górnej” podłączono zasilacz

regulowany napięcia stałego zaś „dolna” była uziemiona oraz połączona z masą przyrządu.



Rys. 14. Wpływ typu detekcji na pomiar natężenia pola elektrycznego

Jak pokazano na rysunku 14 w przypadku stosowania prostownika jednopółkowego nie jest możliwe wykrycie pól elektrycznych o niższych natężeniach niż 0,6 kV/m, gdyż mierzony sygnał jest wówczas zbyt słaby w stosunku do poziomu zakłóceń. Zastosowanie detekcji synchronicznej zdecydowanie powiększa czułość przyrządu. Już pole o natężeniu  $E = 0,12$  kV/m daje na wyjściu detektora przyrost napięcia stałego równy 0,3 mV. Przykładowo natężenie tła, czyli pola elektrycznego atmosfery ziemskiej przy bezchmurnym niebie wynosi od 0,1 do 0,13 kV/m.

### Wnioski

- Opracowany sposób detekcji synchronicznej umożliwia skonstruowanie elektrometru służącego do pomiaru napięć statycznych od 2,5 V do 10 kV lub pól elektrycznych o natężeniach od 0,12kV/m
- Rezystancja wejściowa przyrządu jest ograniczona jedynie przepływnością izolacji elektrody wejściowej oraz rezystancją powietrza
- Przedstawiony elektrometr umożliwia identyfikację znaku ładunku elektrycznego
- Przyrząd jest odporny na zakłócenia o częstotliwości 50 Hz oraz wyższej.

**Autorzy:** dr inż. Jerzy Pomianowski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, al. Piastów 17, 70-310 Szczecin, e-mail: [jpomianowski@zut.edu.pl](mailto:jpomianowski@zut.edu.pl)  
mgr inż. Wojciech Szoka, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, al. Piastów 17, 70-310 Szczecin, e-mail: [wojciech.szoka@zut.edu.pl](mailto:wojciech.szoka@zut.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Kacprzyk R., „Wybrane zagadnienia badań ładunku i jego zaniku w dielektrykach stałych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2004) 41 -49
- [2] Cendrowski S., Blinkow W., Mrówczyński J., Najdeker E., „Metody pomiaru elektryzacji statycznej folii z tworzyw Sztucznych”, Warszawa (1980)
- [3] Riehl P. S., Scott K. L., Muller R. S., „High-resolution electrometer with micromechanical variable capacitor”, Berkeley Sensor & Actuator Center, Department of EECS, University of California Berkeley, CA 94720-1774
- [4] Panneerselvam C., Anil Kumar C. P., Ajay Dhar, K. U. Nair1, C. Selvaraj, S. Gurubaran1, and B. M. Pathan, “Instrumentation for the surface measurements of electrical parameters at Maitri, Antarctica: First results”, *Earth Planets*, 62 (2010), 545-549