

Dr inż. Janusz Tuśnio  
Politechnika Świętokrzyska

## **KONCEPCJA KONSTRUKCJI UKŁADU DO LOKALIZACJI POŁOŻENIA KĄTOWEGO LINII PRZESYŁOWEJ WYSOKIEGO NAPIĘCIA W OBIEKTACH LATAJĄCYCH**

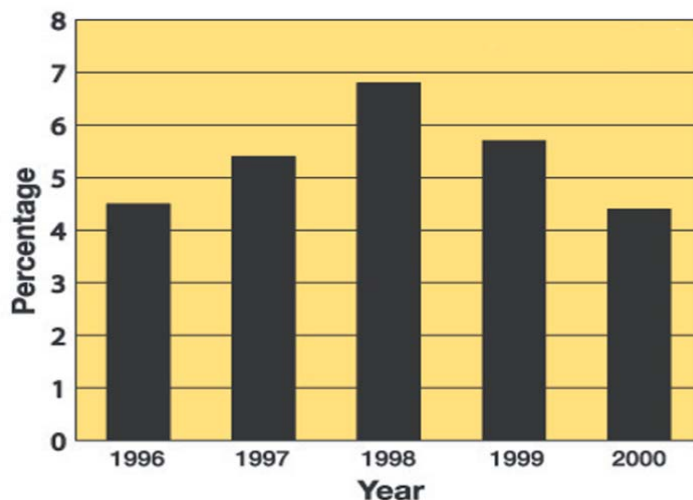
*Tematem opracowania jest konstrukcja układu określającego położenie względem obiektu latającego napowietrznej elektroenergetycznej linii przesyłowej wysokiego lub średniego napięcia. Przedstawiono sygnały emitowane przez taką linię z uwzględnieniem towarzyszących im zakłóceń oraz koncepcję układu wykrywającego i lokalizującego położenie rozpatrywanej linii. Omówiono różne warianty konstrukcji poszczególnych bloków funkcjonalnych urządzenia, wskazano też niedogodności i zalety opcjonalnych rozwiązań. Rozpatrywany układ może być częścią urządzenia służącego ochronie obiektu latającego przed kolizją z linią przesyłową lub też naprowadzeniu na nią środka napadu powietrznego.*

### **A CONCEPT OF THE DESIGN OF A SYSTEM FOR LOCATING THE ANGULAR POSITION OF A HIGH- VOLTAGE POWER LINE TO BE MOUNTED IN AERIAL VEHICLES**

*The paper is concerned with the concept of a system for detecting and determining the position of an overhead high- or medium-voltage power line in relation to an aerial vehicle. The analysis takes into account signals emitted by the line as well as the accompanying disturbances. The considerations include the advantages and disadvantages of different design variants for the particular functional blocks. The system can be used as part of a device for guiding an aerial vehicle onto a power line or for preventing their collision.*

#### **WSTĘP**

Napowietrzne linie przesyłowe wysokiego napięcia są obiektami technicznymi towarzyszącymi współczesnej cywilizacji od ponad stu lat; w polskich warunkach regułą jest, że przewodzą one prąd zmienny o częstotliwości 50 Hz i napięciu 110 kV lub jego wielokrotności. Ze względu na znaczne wysokości (nawet kilkaset metrów) i słabą widoczność stanowią zagrożenie dla nisko latających samolotów, szybowców czy motolotni. O znaczeniu problemu świadczy przedstawiony na rys. 1 procentowy udział kolizji śmigłowców z liniami przesyłowymi w USA; większość takich kolizji prowadzi w konsekwencji do śmierci lub kalectwa ludzi oraz znacznych strat materialnych. Spodziewać się należy, że instalacja na pokładach obiektów latających urządzeń do wykrywania i lokalizacji pobliskich linii przesyłowych mogłaby się przyczynić do zwiększenia bezpieczeństwa lotów, zwłaszcza na niewielkich wysokościach.



Rys. 1. Udział kolizji komercyjnych śmigłowców z liniami przesyłowymi (%) w USA w latach 1996 – 2000 (całkowita liczba wypadków 934) [4]

### 1.CHARAKTERYSTYKA LINII PRZESYŁOWYCH JAKO ŹRÓDŁA PROMIENIOWANIA I OBIEKTU ATAKU.

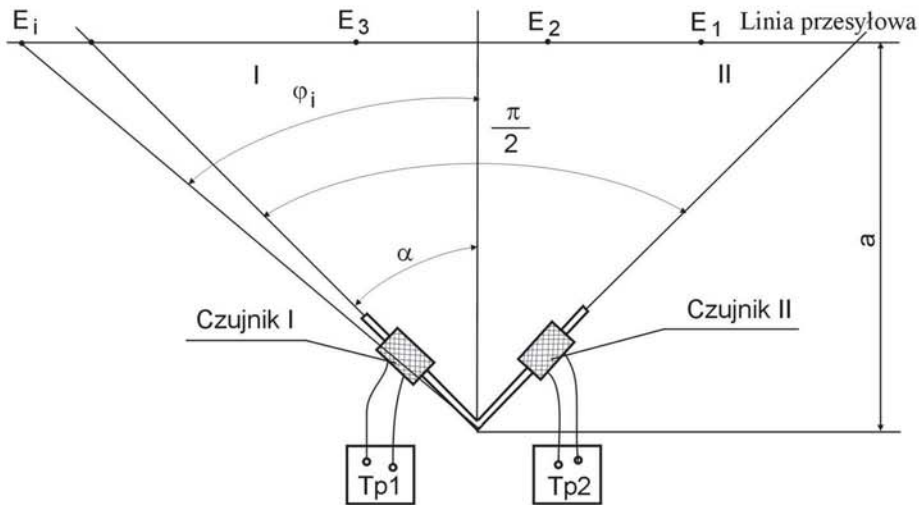
Napowietrzne elektroenergetyczne linie przesyłowe wysokiego napięcia emitują pole elektryczne i magnetyczne o częstotliwości 50 Hz. Wartość natężenia pola elektrycznego zmniejsza się bardzo wyraźnie przy oddalaniu się od osi linii w bok oraz przy zbliżaniu się do konstrukcji słupów. Wartości natężenia obu pól są w znacznym stopniu zależne od wysokości nad powierzchnią ziemi, na której dokonywane są pomiary. Ze względu na fakt, że wartość natężenia pola elektrycznego nie jest zależna od obciążenia linii a głównie od wartości jej napięcia, przyjęto, że natężenie pola elektrycznego jest wielkością umożliwiającą wykrycie celu (linii napowietrznej); do określenia jego położenia kąтового przydatna jest składowa magnetyczna pola elektromagnetycznego.

W opracowaniu [8] przedstawiono budowę czujnika o właściwościach kierunkowych, umożliwiającego wykrycie i lokalizację emitującego pole elektromagnetyczne urządzenia elektroenergetycznego, którym jest np. linia przesyłowa wysokiego napięcia. W referacie konferencyjnym [9] zaprezentowano koncepcję lokalizacji punktowego i liniowego źródła zmiennego pola elektrycznego o małej częstotliwości (rys. 2).

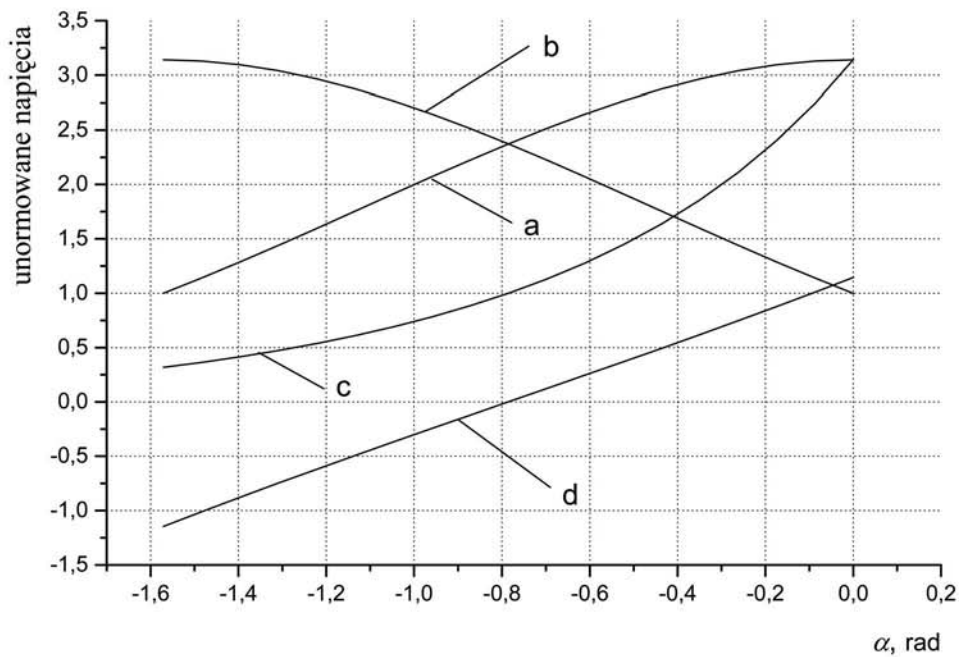
W skład urządzenia służącego do lokalizacji położenia kąтового celu wchodzi dwa wzajemnie prostopadłe czujniki  $Tp1$  i  $Tp2$ . W opracowaniu [9] wyznaczono zależności napięć na wyjściach czujników od kątów ich odchylenia od prostej normalnej do osi linii przesyłowej:

$$u_I = k \frac{E_i}{2a} \left( \alpha \cos \alpha + \pi \cos \alpha - 0.5 \cos \alpha \sin 2\alpha - \sin^3 \alpha \right) \quad (1)$$

$$u_{II} = k \frac{E_i}{2a} \left| \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha - \cos \alpha \right| \quad (2)$$



Rys. 2. Schemat koncepcji lokalizacji położenia kąowego celu liniowego [9]



Rys. 3. Wartości unormowanych napięć  $u_1$  i  $u_2$  na wyjściach torów pomiarowych, ich ilorazu  $u_1/u_2$  oraz logarytmu  $\ln(u_1/u_2)$  w funkcji kąta odchylenia czujnika i od normalnej do linii wysokiego napięcia [9]

W powyższych wzorach:

$E_i$  – natężenia pola elektromagnetycznego w elementarnych odcinkach linii,  
 $a$  – odległość miejsca pomiaru od osi linii,

$k$  – współczynnik proporcjonalności.

Na rys. 3 przedstawiono obliczone wartości unormowanych napięć  $u_1$  i  $u_2$  na wyjściach torów pomiarowych, ich ilorazu  $u_1/u_2$  oraz logarytmu  $\ln(u_1/u_2)$  w funkcji kąta odchylenia czujnika i od normalnej do linii wysokiego napięcia. Liniowa zależność logarytmu z ilorazu skutecznych wartości napięć na wyjściach czujników ( $d$ ) od kąta odchylenia osi symetrii zespołu czujników umożliwia lokalizację położenia kąтового linii przesyłowej.

## 2. KONCEPCJA BUDOWY BLOKÓW FUNKCJONALNYCH UKŁADU

### 2.1. Układ zasilania

Warunkiem poprawnego funkcjonowania każdego układu jest poprawny dobór zasilania. W przypadku układów pracujących w warunkach laboratoryjnych (stacjonarnych) zagadnienie staje się drugorzędne ze względu na dostępność sieci elektroenergetycznej i całej gamy typowych zasilaczy stabilizowanych. W sytuacji, gdy urządzenie pomiarowe zainstalowane jest na pokładzie wyposażonego w silnik i prądnicę obiektu latającego a nawet gdy obiekt latający jest pozbawiony prądnicy lecz posiada zdolność do przenoszenia na pokładzie źródła zasilania w postaci akumulatora czy też baterii ogniów galwanicznych, problemem i koniecznością jest jedynie zapewnienie poprawnej pracy wspomnianego źródła oraz ewentualnie stabilizacji napięcia zasilającego urządzenie pomiarowe a także ochrona układu pomiarowego przed zakłóceniami wnoszonymi przez prądnicę.

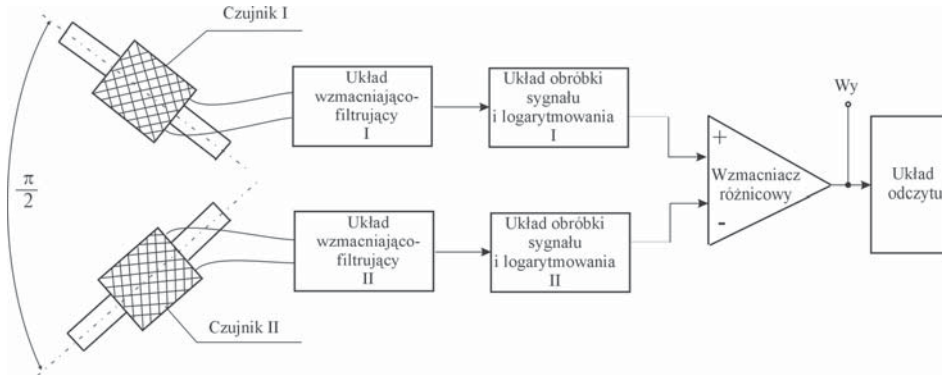
Poważne problemy występują w przypadku wyrobów wojskowych, gdy układ pomiarowy jest jednym z bloków funkcjonalnych zapalnika zbliżeniowego czy też układu naprowadzania pocisku raketowego lub bomby lotniczej. Okres gwarancyjny i czas magazynowania takich wyrobów to zazwyczaj kilkanaście lat, co jest okresem zbyt długim na to, by akumulator lub bateria zachowały swoje właściwości. Wprawdzie wyjątek od przedstawionej reguły stanowią baterie litowe o czasie składowania rzędu 10 lat, istnieją jednak inne ograniczenia ze względu na bezpieczeństwo przechowywanych wyrobów - w warunkach, gdy magazynowane wyroby zawierają materiały wybuchowe, nie dopuszcza się w warunkach technicznych danego wyrobu lub dopuszcza z poważnymi ograniczeniami, by zawierający materiał wybuchowy i składowany wyrób zawierał naładowane źródło energii elektrycznej, mogące przy złym zbiegu okoliczności doprowadzić do wybuchu, zapoczątkowującego eksplozję innych wyrobów składowanych w sąsiedztwie.

Próba uporania się z tym problemem jest przedstawione w patencie [6] rozwiązanie polegające na tym, że układ elektroniczny wyrobu bojowego oraz spłonka zapalająca jego układu wykonawczego zasilane są z baterii kondensatorów elektrolitycznych o znacznej pojemności. Bateria kondensatorów ładowana jest w chwili opuszczania przez wyrób wyrzutni raketowej czy też pokładu samolotu bombowego. Kilkunastoletni okres pewnego działania kondensatorów umożliwia niezawodne funkcjonowanie wyrobu w okresie gwarancyjnym a zarazem umożliwia bezpieczne jego magazynowanie.

Konsekwencją przyjęcia powyższego rozwiązania jest konieczność zastosowania elementów elektronicznych (głównie układów scalonych) o bardzo małym poborze mocy; zasilająca układ elektroniczny bateria połączonych równolegle kondensatorów o pojemności  $6600 \mu\text{F}$  ( $3 \times 2200 \mu\text{F}$ ) zapewnia zasilanie układu pobierającego prąd o wartości 1 mA przez około jedną minutę.

## 2.2 Ogólna budowa układu lokalizacji

Na rys. 4 przedstawiono schemat blokowy układu służącego do lokalizacji położenia kąowego napowietrznej linii wysokiego napięcia, stanowiącej źródło promieniowania elektromagnetycznego niskiej częstotliwości.



Rys. 4. Schemat blokowy układu lokalizacji położenia kąowego linii wysokiego napięcia

Podstawowym członem układu lokalizacji jest zespół dwóch identycznych wzajemnie prostopadłych czujników o właściwościach kierunkowych, z których każdy składa się z cewki o znacznej liczbie zwojów i indukcyjności osadzonej na rdzeniu z materiału ferromagnetycznego (pręt ferrytowy lub z wyżarzanej stali niskowęglowej). Celem poprawy dobroci układu wejściowego przewidziano również opcję, w której obydwie cewki zostały połączone z kondensatorami o pojemności rzędu kilku  $\mu\text{F}$ , tworząc równoległe obwody o częstotliwości rezonansowej 50 Hz.

Uzyskane na wyjściach czujników sygnały napięciowe zostają doprowadzone do układów wzmacniająco – filtrujących, zapewniających wzmocnienie napięciowe rzędu  $10^7$  oraz tłumienie sygnałów zakłócających.

Otrzymane na wyjściach układów wzmacniająco – filtrujących sygnały napięciowe o przebiegach sinusoidalnych zostają doprowadzone do układów obróbki i logarytmowania, gdzie podlegają wyprostowaniu, filtracji (przekształceniu AC/DC) oraz logarytmowaniu.

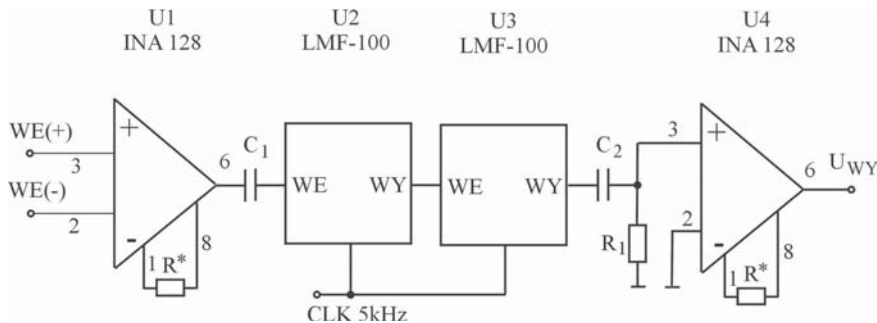
Sygnały napięciowe z wyjść w/w układów są odejmowane we wzmacniaczu różnicowym, którego wzmocnienie jest nastawiane w taki sposób, by układ odczytu wskazywał wartość kąta odchylenia osi obiektu latającego od prostej normalnej do osi linii przesyłowej wysokiego napięcia. Sygnał na wyjściu wzmacniacza różnicowego może być doprowadzony do bloku naprowadzania obiektu latającego na linię przesyłową (układu regulacji automatycznej), stanowiąc ekwiwalent wielkości regulowanej (kąta odchylenia osi obiektu od linii celu).

### 2.2.1. Budowa układu wzmacniająco – filtrującego

Uproszczony schemat układu w jednym kanale przedstawiono na rysunku 5. Wzmocnienie i filtracja sygnału w zbudowanym i zbadanym układzie modelowym odbywa się w trzech stopniach. Pierwszym stopniem jest wzmacniacz pomiarowy zbudowany w oparciu o układ scalony INA-128 produkowany przez firmę Burr – Brown.

Sygnał wejściowy doprowadzony jest bezpośrednio pomiędzy wejścia wzmacniacza pomiarowego. Celem uproszczenia rysunku pominięto na nim kompensację wejściowego napięcia niezrównoważenia wzmacniacza oraz jego zasilanie (odpowiednio końcówki 5, 4 i

7). Nastawianie wzmacnienia dokonywane jest w obu torach identycznie dla obu czujników poprzez dobór rezystora  $R^*$ .



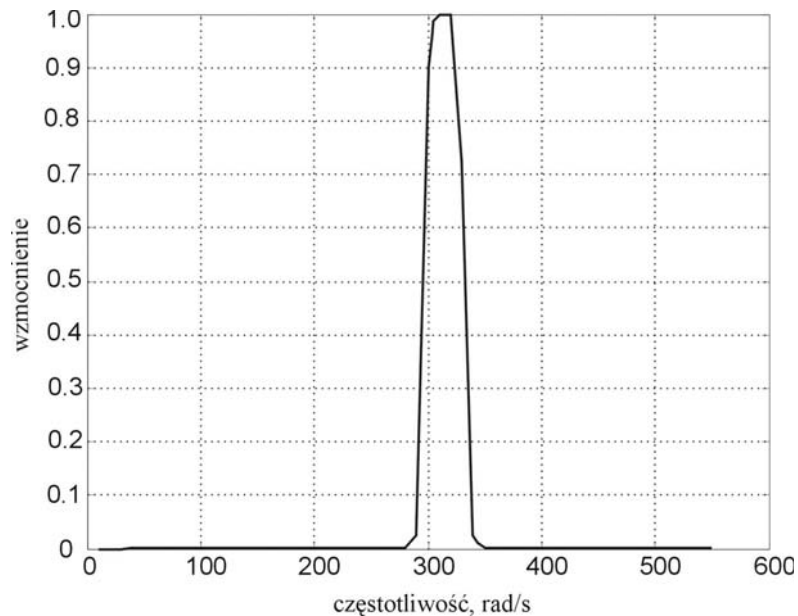
Rys. 5. Schemat blokowy układu wzmacniająco – filtrującego

Wzmocniony w układzie U1 sygnał z czujnika doprowadzony jest poprzez sprzężenie pojemnościowe (kondensator  $C_1$ ) do zbudowanego z dwóch układów scalonych typu LMF-100 (nowsza wersja układu MF-10) pasmowoprzepustowego filtra Butterwortha 8 rzędu o charakterystyce amplitudowej przedstawionej na rysunku 6. Projektowanie filtra przeprowadzono w oparciu o [1, 2] a założenia konstrukcyjne, szczegółowy schemat i charakterystykę amplitudową przedstawiono w [3]. Układ LMF-100 podobnie jak MF-10 wymaga doprowadzenia sygnału zegarowego o częstotliwości 100 razy większej od częstotliwości środkowej filtra. Fakt, że sygnał zegarowy wytwarzany jest na ogół przez generatory, których częstotliwość jest określona przez właściwości rezonatora kwarcowego sprawia, że częstotliwość sygnału zegarowego jest bardzo stabilna i w praktyce niezależna od zmian wartości napięcia zasilającego i temperatury otoczenia. Zaletą zastosowanego filtra jest bardzo prosta budowa, wadą konieczność dodatkowej budowy generatora sygnału zegarowego, najczęściej zresztą z zespołem dzielnika częstotliwości. Konieczność spełnienia powyższych uwarunkowań zwiększa dodatkowo wymiary geometryczne układu oraz wartość pobieranego przez niego prądu.

Sygnał wyjściowy z zespołu filtrów poprzez kondensator sprzęgający  $C_2$  doprowadzony jest do drugiego stopnia wzmacniającego, zbudowanego również ze wzmacniacza pomiarowego INA-128.

Wzmacniacz pomiarowy typu INA-128 charakteryzuje się niskim napięciem zasilającym (sumaryczne napięcie już od 4 V, nieznacznym poborem prądu (rzędu  $700 \mu A$ ) i dryfem temperaturowym oraz znacznym wzmocnieniem sygnału różnicowego (według producenta do  $10^4$ , w praktyce  $5 \cdot 10^3$ ). Cechy te powodują, że można go stosować w układach o niewielkim poborze mocy, niekiedy również zasilanych z baterii kondensatorów. Do tego ostatniego zastosowania nie nadaje się jednak układ LMF-100 (a tym bardziej MF-10), który wprowadzić może być zasilany napięciem całkowitym poczynając już od wartości 4 V, jednakże pobór prądu przez pojedynczy układ jest rzędu 10mA, co sprawia, że staje się nieprzydatny do zastosowań mikromocowych, zwłaszcza zasilanych z baterii kondensatorów. W przypadku konieczności budowy układu filtra aktywnego o bardzo małym poborze prądu można zastosować przedstawiony na rysunku 7 filtr modelujący zmienne stanu, zbudowany ze wzmacniaczy operacyjnych TLE-2021 i TLE2022 [3]. Właściwości tego filtra są gorsze od przedstawionego uprzednio filtra zbudowanego z układów LMF-100. Podstawową wadą jest

możliwość przestrojenia i zmiany wartości częstotliwości środkowej na skutek zmian wartości rezystancji i pojemności zastosowanych elementów dyskretnych, głównie na skutek zmian wartości temperatury otoczenia a także starzenia się elementów. Powoduje to, że niecelową staje się w tym przypadku budowa filtru o znacznej dobroci  $Q > 10$ , jednakże fakt, że filtr taki obciąża źródło zasilania prądem rzędu 0,6 mA sprawia, że może być zastosowany np. jako blok funkcjonalny zasilanego z baterii kondensatorów układu zapalnika zbliżeniowego w pocisku raketowym przeznaczonym do obezwładniania linii wysokiego napięcia.

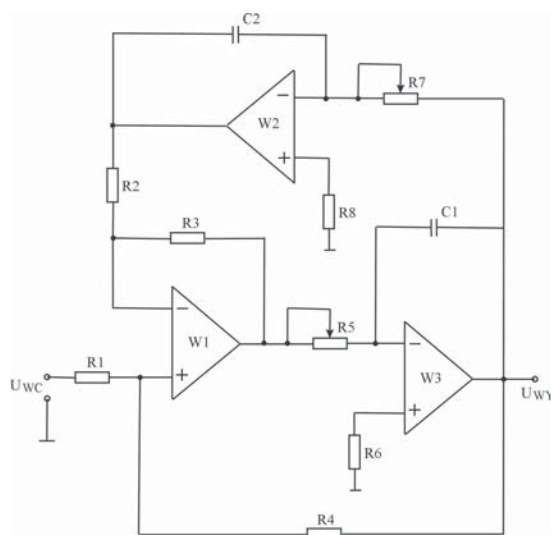


Rys. 6. Charakterystyka amplitudowa pasmowoprzepustowego filtru Butterwortha 8 rzędu o częstotliwości środkowej  $f_0 = 50$  Hz i dobroci  $Q = 10$  [3]

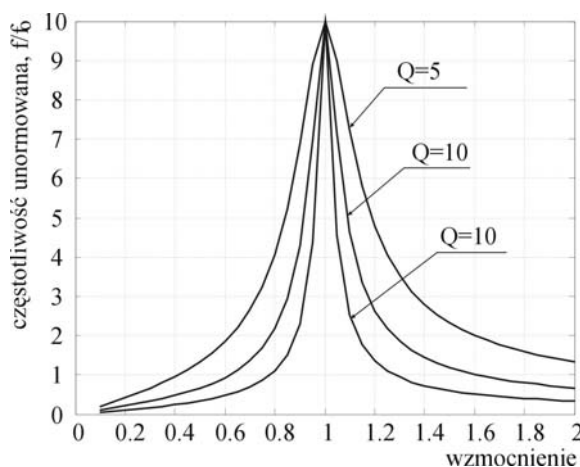
Ciągły postęp w zakresie produkcji podzespołów elektronicznych spowodował, że w ostatnim czasie pojawiły się w sprzedaży wzmacniacze operacyjne nowej generacji, szczególnie predysponowane do zastosowania w układach mikromocowych, zasilanych z baterii galwanicznych małej mocy czy też baterii kondensatorów elektrolitycznych.

W przypadku budowy takich układów dość atrakcyjna wydaje się koncepcja zastosowania w stopniach wzmocnienia bloku wzmacniająco-filtrującego wzmacniaczy pomiarowych najnowszej generacji produkcji firmy Texas Instrument typu INA-333 o znacznie korzystniejszych od INA-128 parametrach przy niemal zerowym dryfcie temperaturowym i znikomym poborze prądu. Wzmacniacz INA-333 wykonany został w opracowanej przez TI technologii zerowego dryftu, która wykorzystuje chroniony patentem filtr zaporowy z przełączanymi pojemnościami. Filtr ten eliminuje zakłócenia impulsowe i zapewnia bardzo mały poziom wejściowego napięcia szumów wynoszący 50nV/Hz. Układ zbudowany jest w uniwersalnej konfiguracji wzmacniacza pomiarowego z trzema wzmacniaczami operacyjnymi. Prąd spoczynkowy układu wynosi jedynie 75  $\mu$ A a praca układu możliwa jest już przy całkowitym napięciu zasilania tak małym jak 1,8 V, zastosowanie układu INA-333 maksymalizuje sprawność zasilania. Małe napięcie niezrównoważenia 25  $\mu$ V i mały dryft temperaturowy 0,1  $\mu$ V/°C pozwalają na uzyskanie doskonałej precyzji i stabilności w długim czasie eksploatacji [10].

Innym przykładem postępu w budowie układów analogowych jest mikromocowy wzmacniacz operacyjny typu OPA333 o napięciu zasilania 1.8V, poborze prądu przez jeden wzmacniacz około 17  $\mu$ A, wejściowym napięciu niezrównoważenia 2  $\mu$ V. Podobnie jak INA-333 układ ten wykonany jest w technologii CMOS i zerowego dryftu.



Rys. 7. Filtr modelujący zmienne stanu (na podstawie [ 8 ]):  $A_{uf} = 10$ ,  $Q = 20$ ,  $f_0 = 50$  Hz,  $R_1 = 30$  k $\Omega$ ,  $R_2 = 900$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 900$  k $\Omega$ ,  $R_4 = 300$  k $\Omega$ ,  $R_5 = 318,5$  k $\Omega$ ,  $R_6 = 300$  k $\Omega$ ,  $R_7 = 318,5$  k $\Omega$ ,  $R_8 = 300$  k $\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = 10$  nF



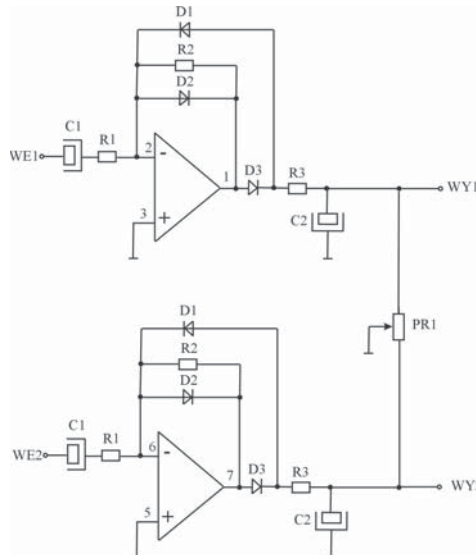
Rys. 8. Charakterystyki amplitudowe filtra modelującego zmienne stanu dla różnych wartości dobroci Q: 1 – Q = 5, 2 – Q = 10, 3 – Q = 20 [3]

### 2.2.2. Układ obróbki sygnału i logarytmowania

Uzyskane w obu kanałach na wyjściach układów wzmacniająco – filtrujących przemienne sygnały napięciowe o częstotliwości 50 Hz podlegają wyprostowaniu i filtracji a następnie logarytmowaniu. Celem minimalizacji liczby zastosowanych układów zdecydowano się na wykorzystanie po niezbędnych modyfikacjach nietypowego układu, omówionego w [7].



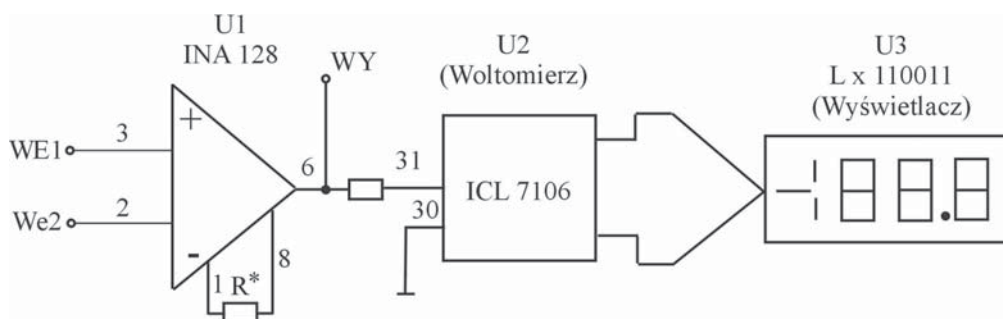
Schemat układu przedstawiono na rysunku 9. Układ ten jest przetwornikiem napięcia zmiennego na stałe o charakterystyce logarytmicznej, umożliwiającym uzyskanie w zakresie napięć wejściowych od 3,3 mV do 3,3 V dokładności przetwarzania lepszej od 1 dB. Zmiany temperaturowe napięcia wyjściowego są mniejsze niż 3 % na 10 °C. Potencjometr PR1 służy do symetryzacji odczytów w obu kanałach.



Rys. 9. Schemat układu obróbki sygnału i logarytmowania (na podstawie [7])

### 2.2.3 Budowa układu dopasowującego i odczytu.

Ostateczny wynik obróbki sygnałów z obu czujników o właściwościach kierunkowych w postaci wartości kąta zawartego pomiędzy dwusieczną kąta zawartego pomiędzy osiami czujników a linią celu dostępny jest w postaci wskazania wyświetlacza cyfrowego LCD sterowanego przez przetwornik analogowo – cyfrowy (woltomierz cyfrowy) typu ICL 7106 (rys. 10). Poprawny odczyt wyniku pomiaru wymaga dopasowania wartości różnicy sygnałów z wyjść układów obróbki sygnałów i logarytmowania. Dopasowanie odbywa się poprzez zmianę wzmacnienia wzmacniacza pomiarowego INA-128 za pomocą zmian wartości rezystancji  $R^*$ . Napięcie na wyjściu WY tego układu po dopasowaniu jest liniową funkcją kąta odchylenia czujników od linii celu i może być wprowadzane do układu regulacji (naprowadzania) jako odpowiednik wielkości regulowanej (kąta odchylenia).



Rys. 10. Uproszczony schemat układu dopasowującego i odczytu

### 3. PODSUMOWANIE

Wstępne badania układu lokalizacji położenia linii przesyłowych przedstawionego blokowo na rys. 4 wykazały poprawność przyjętej koncepcji lokalizacji celów liniowych w odległości od nich (linia 110kV) nie przekraczającej 150 m. Prowadzone w przyszłości prace i badania zmierzają do zwiększenia czułości a tym samym zasięgu układu. Problemem utrudniającym praktyczne zastosowanie układu jest znaczna wrażliwość układu logarytmującego (rys. 9) od zmian temperatury otoczenia. Problemem jest również dobór układów i wartości elementów dyskretnych w taki sposób, by zminimalizować pobór prądu przez układ. Pozytywne rezultaty prac umożliwią zastosowanie takiego mikromocowego układu w urządzeniach zasilanych energią z baterii kondensatorów elektrolitycznych.

### LITERATURA:

1. Horowitz P., Hill W.: *Sztuka elektroniki Cz. 1*. WKŁ. Warszawa 1996
2. Izydorczyk J., Konopacki J.: *Filtry analogowe i cyfrowe*. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Katowice 2003.
3. Koruba Z. Tuśnio J: Generation and reduction of slow-varying disturbances affecting the operation of systems for detection and location of electromagnetic fields from overhead power lines. *Mechanics*, vol. 26, No.3, 2007. AGH University of Science and Technology Press, Cracow, pp. 133-139.
4. Monsoo Park: Millimeter-wave polarimetric radar sensor for detection of power lines in strong clutter background. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in University of Michigan 2003.
5. National Semiconductor: LMF-100, High performance dual switched capacitor filter, July 1999.
6. Patent PL 162020.B1 – Układ zasilania zapalnika do bomb lotniczych.
7. Sońta S. Kotlewski H.: *Układy scalone liniowe i ich zastosowanie*. WNT, Warszawa 1977.
8. Szmitkowski J, Tuśnio J. i inni: Metoda i urządzenie do monitorowania zagrożeń porażenia prądem elektrycznym w warunkach prowadzenia akcji ratowniczych. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa 2003 r.
9. Tuśnio J., Koruba Z.: Koncepcja określenia położenia kąowego źródła promieniowania elektromagnetycznego małej częstotliwości na przykładzie napowietrznych urządzeń elektroenergetycznych VI Międzynarodowa Konferencja Uzbrojenia – Waplewo 2006.
10. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/ina333.html>
11. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/opa333.html>

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008 - 2010 jako projekt badawczy