



---

# **Jakość energii**

## Jednopunktowe metody lokalizacji źródeł wahań napięcia w systemie elektroenergetycznym

prof. Zbigniew Hanzelka  
mgr inż. Krzysztof Chmielowiec  
dr inż. Andrzej Firlit  
mgr inż. Rafał Kozieł  
dr inż. Krzysztof Piątek  
mgr inż. Krzysztof Woźny

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

# Wstęp

Dotychczas funkcjonujący model rynku energetycznego, w którym problem określenia odpowiedzialności za wprowadzanie zaburzeń jakości energii (JEE) angażował dwóch partnerów - dostawcę energii oraz jej odbiorcę - wraz z rozwojem sieci elektroenergetycznych oraz rozproszonych źródeł energii, zastępowany jest nową konfiguracją, w której obecne są przynajmniej cztery, wzajemnie zależne strony: dostawca energii, odbiorca, producent urządzeń (odbiorników) oraz podmiot odpowiedzialny za ich dobór, instalację oraz zabezpieczenie. W przypadku wystąpienia zaburzenia, często zarówno dostawca jak i odbiorca, wzajemnie upierają się, że przyczyna znajduje się po drugiej ze stron. Zdarza się, że ich dyskusja prowadzi do wniosku, że to odbiorniki energii elektrycznej są zbyt podatne na warunki zasilania, lub są one niewłaściwie dobrane albo zainstalowane, aby mogły poprawnie działać w danym środowisku elektromagnetycznym. Zagadnienie to dotyczy zwłaszcza konsekwencji wystąpienia zmian napięcia (zapadów, wzrostów, przerw w zasilaniu), asymetrii i wahań w napięciu zasilającym. Tym bardziej, że skutki obecności zaburzeń napięcia przekładają się na wymierne koszty, które zmuszona jest ponieść przynajmniej jedna ze stron. Naturalną konsekwencją wymienionych czynników jest zatem rynkowa potrzeba posiadania narzędzia do wiarygodnej identyfikacji źródeł zaburzeń JEE, mogących mieć zastosowanie przy określeniu odpowiedzialności za ich skutki. Wyzwanie to realizowane może być przy wykorzystaniu dostępnych metod lokalizacji zaburzeń, które w zależności od ich specyfiki, podzielić można na metody jedno- oraz wielopunktowe. Niniejszy artykuł poświęcony jest metodom lokalizacji źródeł wahań napięcia przy wykorzystaniu metod jednopunktowych. Zaprezentowane zostaną wyniki badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych, mających na celu ocenę możliwości zastosowania tych metod w analizatorach jakości energii elektrycznej.

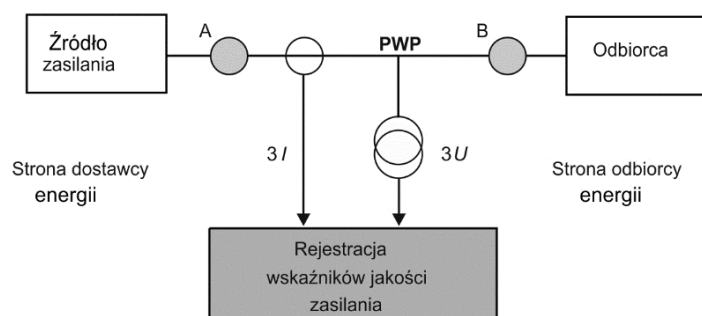
## Wprowadzenie

Wraz z postępującą deregulacją rynku energii dostawcy i odbiorcy w coraz większym stopniu zainteresowani są jednoznacznym wskazaniem odpowiedzialności za złą jakość zasilania. Nabiera to szczególnego znaczenia w okresie formułowania kontraktów na dostawę energii i egzekwowania, poprzez taryfy, opłat za pogarszanie jej jakości. W tym obszarze występują dwa zagadnienia szczegółowe. Pierwsze dotyczy lokalizacji źródła zaburzenia. Rejestrator przebiegów czasowych rejestruje napięcia i prądy w PWP i na tej podstawie formułowany jest wniosek, po której stronie: dostawcy czy odbiorcy energii zlokalizowane jest źródło. Drugie zagadnienie dotyczy ilościowej oceny stopnia udziału każdego z partnerów w całkowitym poziomie zaburzenia. W praktyce oznacza to potrzebę wyznaczenia indywidualnego poziomu emisji wyróżnionego odbiornika i porównanie go z dopuszczalnymi poziomami emisji określonymi w normach lub w warunkach technicznych przyłączenia.

Rozwiązanie przedstawionych powyżej problemów nie jest trywialne, zaproponowano wiele różnych metod, zarówno jedno- jak i wielopunktowych, z których tylko część ma wartość praktyczną. Różnią się one prawdopodobieństwem poprawnego wnioskowania, czasem niezbędnym do przeprowadzenia pomiarów, liczbą i złożonością potrzebnego wyposażenia technicznego itd.

## Jednopunktowe metody lokalizacji źródeł wahań napięcia

Pierwszym krokiem w procedurze lokalizacji źródeł zaburzeń jakości energii elektrycznej (JEE), w tym także wahań napięcia jest wykonanie pomiarów napięć i prądów w rozważanym punkcie sieci. Bardzo często takim punktem jest granica własności pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii (tzw. punkcie wspólnego przyłączenia PWP). Koncepcja jednopunktowej metody lokalizacji zaburzenia została przedstawiona na rysunku 1.

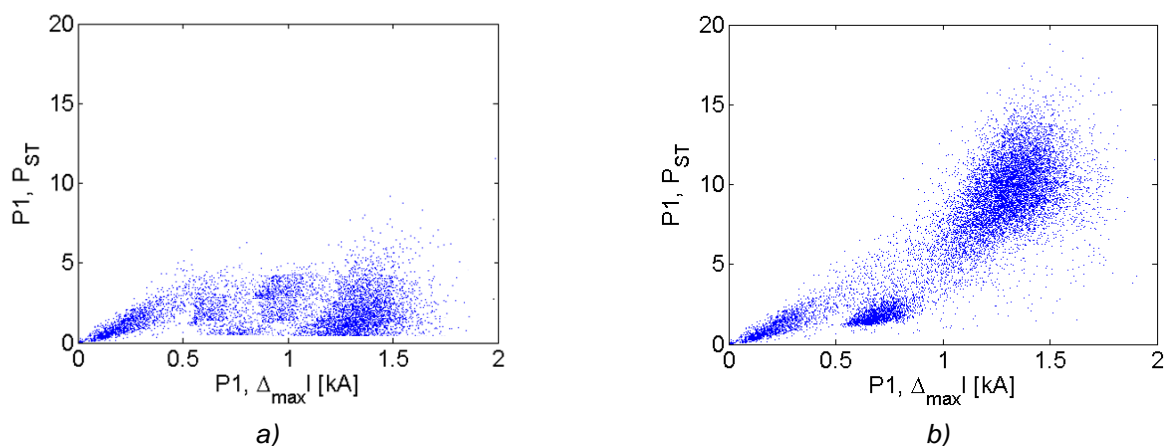


Rys. 1. Schemat ideowy stanowiący ilustrację problemu lokalizacji źródła zaburzenia elektromagnetycznego.

W punktach A i B znajdują się potencjalne źródła zaburzeń. Odpowiednio zaimplementowane algorytmy pozwalają zlokalizować źródło na podstawie charakterystycznych zjawisk w przebiegach napięć i prądów. Metody lokalizacyjne określają w istocie, czy źródło zaburzeń znajduje się „powyżej” (w tym przypadku z lewej strony) bądź „poniżej” (z prawej strony) PWP.

## Metoda I - Korelacja zmian Pst i mocy i/lub prądu

Źródło wahań napięcia można wskazać na podstawie analizy korelacji pomiędzy zmianami mocy biernej, a w przypadku odbiorników na średnim i niskim napięciu, również mocy czynnej, z wartościami współczynnika migotania światła  $P_{st}$ . Jeżeli moc i wahań napięcia charakteryzują się silną korelacją, oznacza to, że badany odbiornik jest jednocześnie dominującym źródłem wahań napięcia. Modyfikacją tej metody jest badanie korelacji wahań napięcia i zmian prądu w punkcie pomiaru.



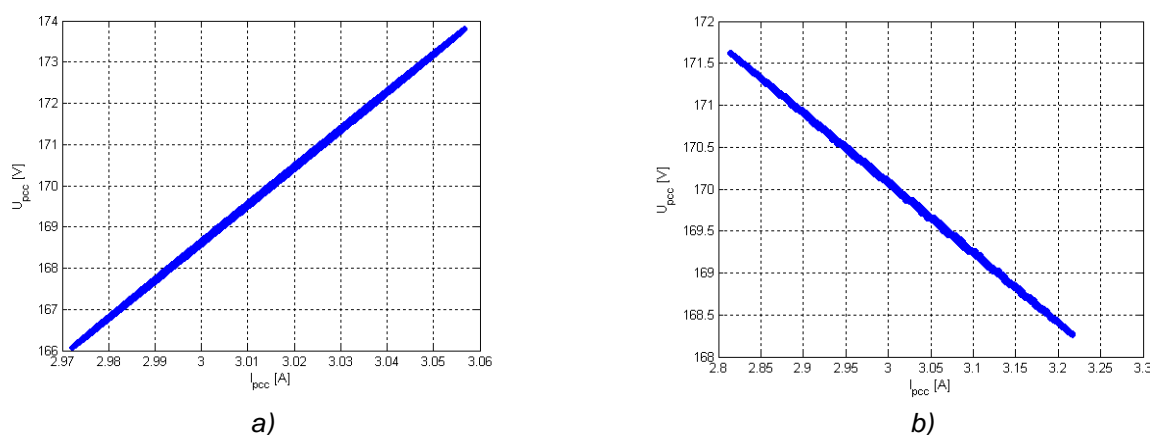
Rys. 2. a-b) Przykładowe charakterystyki korelacyjne.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe charakterystyki korelacyjne. W przypadku (a) występuje słaba korelacja pomiędzy wartością  $P_{st}$  i wartością prądu, natomiast w przypadku (b) korelacja ta jest silna.

Metoda korelacyjna należy do kategorii metod statystycznych. W jej przypadku ufność wskazania źródła zaburzenia zależy w dużym stopniu od długości okresu pomiarowego i tym samym liczby próbek wykorzystanych do utworzenia charakterystyki korelacyjnej.

## Metoda II - Badanie nachylenia charakterystyki napięciowo - prądowej

Metoda polega na obserwacji wzajemnych zmian napięcia oraz prądu w PWP podczas trwania zaburzenia. W wyniku jej zastosowania otrzymuje się narastającą bądź malejącą charakterystykę korelacyjną, co pozwala wskazać położenie źródła zaburzeń.



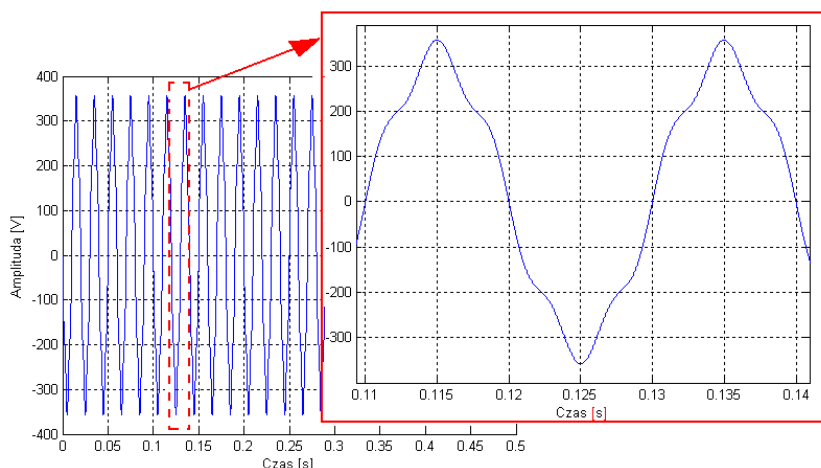
Rys. 3a-b) Charakterystyki  $U(I)$  dla źródła wahań napięcia: a) powyżej PWP; b) poniżej PWP

Przyjmuje się, że źródło wahań napięcia znajduje się powyżej PWP, w przypadku, gdy redukcji napięcia towarzyszy zmniejszanie prądu (rys. 3a). Źródło wahań napięcia znajduje się poniżej PWP, gdy

przyrostowi/zmniejszeniu prądu odpowiada zmniejszenie/zwiększenie napięcia (rys. 3b). Łatwo wykazać, że przedstawiona metoda może być niekiedy nieskuteczna. Dotyczy to przypadków, gdy np. po stronie odbiorcy znajdują się układy energoelektroniczne pracujące ze stałą mocą.

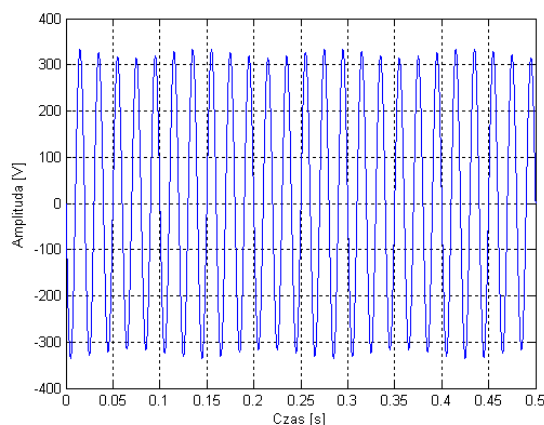
### Metoda III - Badanie kierunku przepływu mocy interharmonicznych

Wahania napięcia uwidaczniają się w widmie poprzez obecność interharmonicznych. Na rysunku 4 przedstawiono przebieg czasowy napięcia o częstotliwości podstawowej  $f_{(1)}=50$  Hz odkształcony 5. harmoniczną o amplitudzie  $U_{(5)}=10\%$  składowej podstawowej ( $U_{(1)}=230$  V). Wartość współczynnika wahań napięcia wynosi zero.



Rys. 4. Przebieg napięcia:  $U_{(1)}=230$  V,  $f_{(1)}=50$  Hz,  $U_{(5)}=10\%$   $U_{(1)}$ ,  $f_{(5)}=250$  Hz.

Rysunek 5 przedstawia przebieg napięcia odkształcony składową  $f_{interharm}=57$  Hz o amplitudzie  $U_{interharm}=3\%$  składowej podstawowej ( $U_{(1)}=230$  V). Widoczna jest wyraźna modulacja przebiegu ( $f_{modulacji}=7$  Hz), a współczynnik wahań napięcia ma wartość niezerową.



Rys. 5. Przebieg napięcia:  $U_{(1)}=230$  V,  $f_{(1)}=50$  Hz,  $U_{interharm}=3\%$   $U_{(1)}$ ,  $f_{interharm}=57$  Hz.

Problem lokalizacji źródła zaburzenia można zatem sprowadzić do zagadnienia lokalizacji źródła interharmonicznych, np. poprzez wyznaczenie kierunku przepływu mocy dla wyróżnionej składowych. W praktyce częstotliwości interharmonicznych podlegają ciągłym zmianom, jako efekt zmiany warunków pracy urządzeń będących źródłem tych składowych, lecz istnieje małe prawdopodobieństwo, że w tym samym czasie dwa lub więcej odbiorników będą generować interharmoniczne o tej samej częstotliwości.

W procesie filtracji wyznaczone są dominujące składowe interharmoniczne w zarejestrowanych podczas wahań napięcia przebiegach czasowych prądów i napięć. Ponieważ występują one często parami (w pasmach bocznych wokół składowej podstawowej), obydwie mogą być rozważane w procedurze oceny. Dla każdej z wyróżnionych interharmonicznych wyznaczany jest znak (kierunek przepływu) mocy. Dodatni znak

mocy oznacza lokalizację źródła wahań po stronie dostawcy, ujemny – po stronie odbiorcy. Skuteczność metody jest mała w przypadku wahań napięcia o losowych charakterze zmian.

## Metoda IV - Analiza „mocy wahań napięcia”

Metoda zaproponowana w [[1], [2]] wprowadza pojęcie tzw. „mocy wahań napięcia”, które opiera się na definicji tej wielkości w dziedzinie czasu. Dla prezentacji istoty metody zakłada się, że napięcie oraz prąd w punkcie przyłączenia są wielkościami sinusoidalnymi ze zmodulowanymi amplitudami, według zależności (1.1) oraz (1.2):

$$u_{PWP}(t) = (U_1 + m_u(t))\cos(\omega_1 t) \quad (1.1)$$

$$i_{PWP}(t) = (I_1 + m_i(t))\cos(\omega_1 t + \varphi) \quad (1.2)$$

gdzie:

$U_1$  - amplituda składowej podstawowej napięcia,

$I_1$  - amplituda składowej podstawowej prądu,

$m_u(t)$  - funkcja modulująca napięcia,

$m_i(t)$  - funkcja modulująca prądu,

$\varphi$  - faza początkowa prądu,

$\omega_1$  - pulsacja składowej podstawowej,

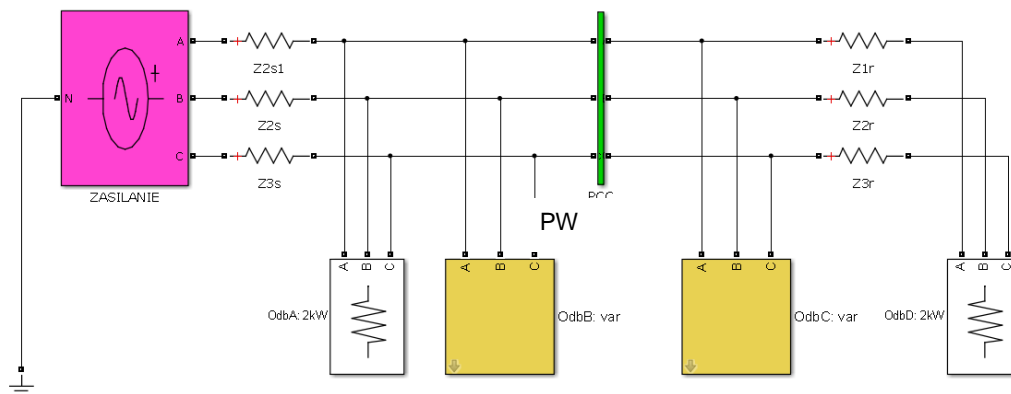
Wrażliwość człowieka na zjawisko wahań napięcia jest funkcją zarówno częstotliwości modulującej, jak i stopnia modulacji. Oznacza to, że sygnały częstotliwościowe  $m_u(t)$  i  $m_i(t)$  powinny zostać przefiltrowane, aby odwzorować mechanizm postrzegania oka, zgodnie z postanowieniami normy [3]. Poprzez mnożenie i całkowanie tych sygnałów, otrzymuje się nową wielkość tzw. *moc wahań napięcia* (FP) (moc związana ze składowymi napięcia i prądu o częstotliwości modulacji):

$$FP = \frac{1}{T} \int_0^T m_{uf}(t)m_{if}(t)dt \quad (1.3)$$

Znak „mocy wahań napięcia” dostarcza informacji, czy źródło zaburzenia jest zlokalizowane powyżej, czy też poniżej miejsca dokonywania pomiarów. Dodatni znak „mocy wahań napięcia” oznacza jednakowy kierunek przepływu zarówno *mocy wahań napięcia*, jak i mocy czynnej dla składowej podstawowej. Oznacza to, że modulacja napięcia jest zależna od modulacji prądu, co powoduje, że zmniejszenie wartości napięcia zasilającego skutkować będzie zmniejszeniem prądu obciążenia, oraz że źródło wahań napięcia znajduje się powyżej punktu pomiarowego. Ujemny znak *mocy wahań napięcia* oznacza przeciwny kierunek przepływu *mocy wahań napięcia* i mocy czynnej dla składowej podstawowej. Rezultatem tego jest brak korelacji pomiędzy modulacjami prądu i napięcia, co oznacza, że zwiększający się prąd obciążenia będzie powodował zmniejszanie napięcia oraz, że źródło wahań napięcia znajduje się poniżej punktu pomiarowego. Przedstawiona metoda lokalizacji źródeł wahań napięcia daje poprawne rezultaty w sieciach obciążonych głównie odbiornikami o charakterze indukcyjnym i ograniczonym obciążeniu pojemnościowym.

## Wyniki badań symulacyjnych

Układ testowy stosowany w badaniach symulacyjnych (rys. 6) składa się z symetrycznego, trójfazowego źródła zasilającego ( $U=400$  V,  $f=50$  Hz), odbiorników trójfazowych: dwóch o stałej mocy 2 kW (Odbiornik A, Odbiornik D) oraz dwóch o zmiennej mocy, niespokojnych (Odbiornik B, Odbiornik C), będących źródłem wahań (wszystkie zasilane trójfazowo). Pomiar realizowany jest w punkcie PWP.



Rys. 6. Układ odbiorca-dostawca.

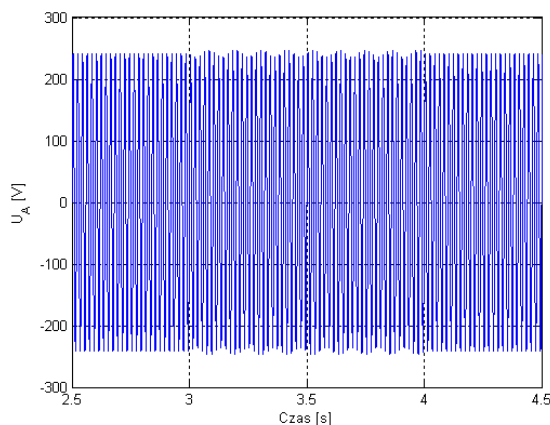
## Test 1 - Źródło wahań napięcia po stronie dostawcy

Dla przyjętych warunków symulacji element B jest rezystancyjnym odbiornikiem o prądzie znamionowym  $I_N=1$  A. W warunkach znamionowych przy  $U=230$  V moc odbiornika wynosi  $P_N=690$  W. Odbiornik powoduje przepływ prądu zmodulowany sinusoidalnie o parametrach: amplituda modulacji  $A_{mod}=50\%$   $I_N$  i częstotliwość  $f_{mod}=9$  Hz (Tabela 1).

Tabela 1. Dane niespokojnego odbiornika B (rys. 6).

$I_N$	$\cos\varphi$	$P_N$	$Q_N$	$I_{mod}$	$f_{mod}$	$t_{start}$	$t_{stop}$
1 A	1	690 W	0 var	50% $I_N$	9 Hz	3,0 s	4,0 s

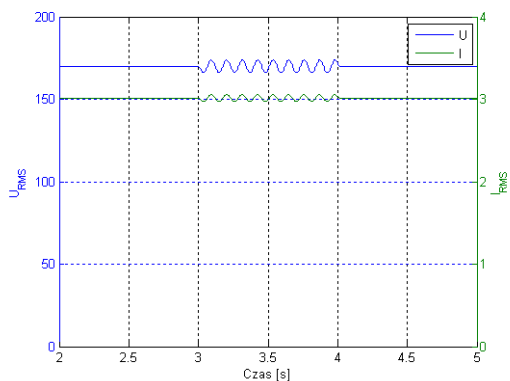
W efekcie zmiennego obciążenia (modulacja prądu) w punkcie PWP występują wahania napięcia jak na rysunku 7.



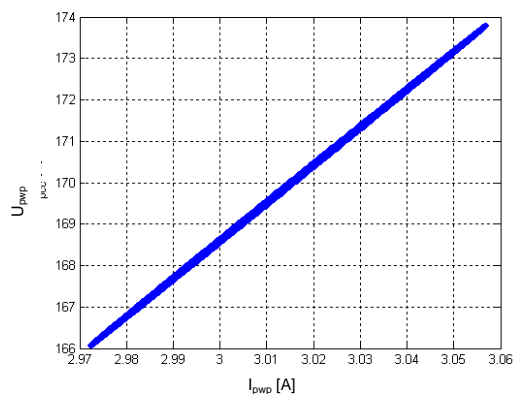
Rys. 7. Przebieg napięcia w PWP.

## Test 1 - Wynik zastosowania metody II

Dla przebiegów chwilowych napięcia i prądu (rys. 8) w punkcie wspólnego przyłączenia wyznaczone są wartości skuteczne. Na tej podstawie tworzona jest charakterystyka  $U(I)$  przedstawiona na rysunku 9. Znak pochodnej funkcji  $U_{rms}(I_{rms})$  jest dodatni, co jednoznacznie wskazuje na lokalizację źródła wahań napięcia po stronie dostawcy energii (na lewo od PWP).



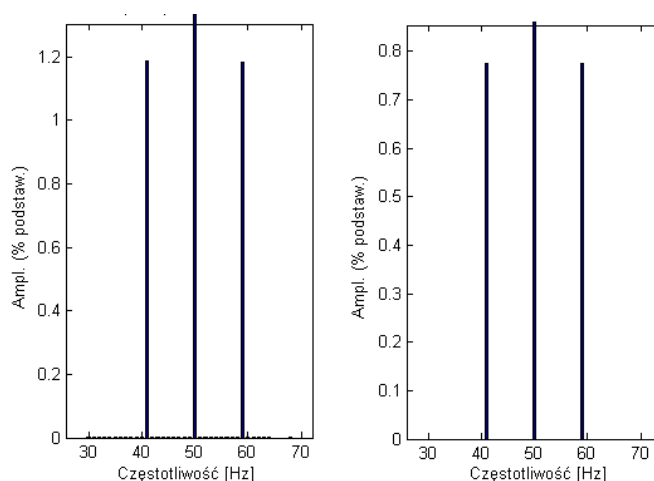
Rys. 8. Przebiegi  $U_{rms}$  oraz  $I_{rms}$  w PWP.



Rys. 9. Charakterystyka  $U_{rms}(I_{rms})$ .

## Test 1 - Wynik zastosowania metody III

Zgodnie z algorytmem metody III, dla wybranego fragmentu przebiegu (rys. 7), wykonywana jest analiza Fouriera. Na tej podstawie można stwierdzić, że w widmie sygnału, oprócz składowej podstawowej (50 Hz), występują także interharmoniczne o częstotliwościach 41 Hz i 59 Hz (rys. 10).



Rys. 10. Widmo przebiegu napięciowego (L) i prądowego (P).

Zmierzone wartości skuteczne interharmonicznych prądu oraz napięcia, wraz z informacją o kącie przesunięcia fazowego, wykorzystywane są następnie do wyznaczania mocy czynnej interharmonicznych  $P_{iharm}$ , zgodnie z zależnością (1.4). Oddzielnie dla każdej rozważanej interharmonicznej:

$$P = UI \cos(\varphi U, I) \quad (1.4)$$

Moce dla obydwu interharmonicznych są nieujemne, co jednoznacznie wskazuje na położenie źródła zakłóceń powyżej PWP (Tabela 2). Potwierdza to poprawność rozważanej metody.

Tabela 2. Składowe widmowe napięcia i prądu oraz moce czynne interharmonicznych.

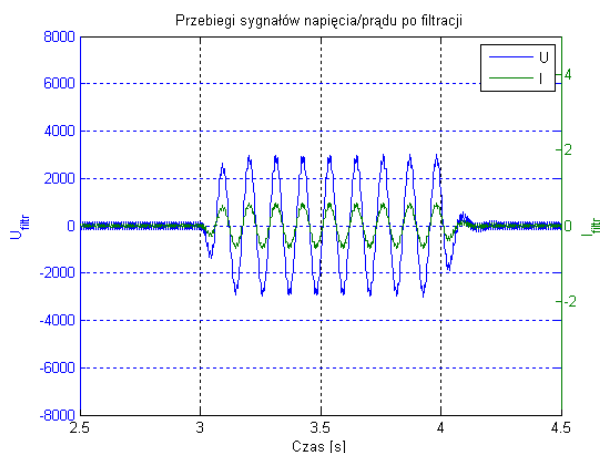
	$A_{fund} (RMS)$	$f_{iharm}$	$\varphi_{iharm} [^\circ]$	$\%A_{iharm}$	$A_{iharm}$	$\varphi U, [^\circ]$	$P_{iharm} [W]$
$U [V]$	170,6	41 Hz	-90	1,19 %	2,030	0	0,046
$I [A]$	2,896		270	0,78 %	0,023		
$U [V]$	170,6	59 Hz	90	1,19 %	2,030	360	0,046
$I [A]$	2,896		90	0,78 %	0,023		

gdzie:

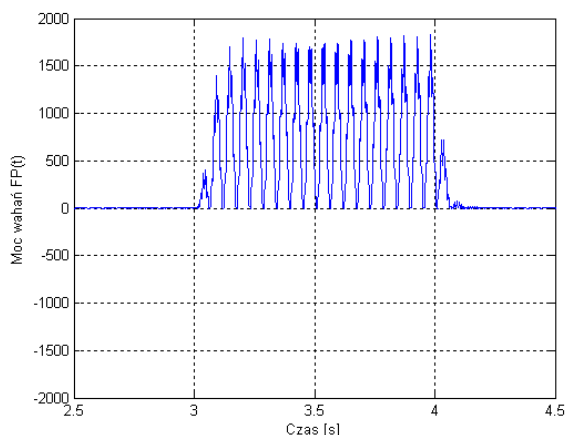
- $A_{fund}$  - wartość skuteczna składowej podstawowej,
- $f_{iharm}$  - częstotliwość składowej interharmonicznej,
- $\varphi_{iharm}$  - kąt fazowy składowej interharmonicznej,
- $A_{iharm}$  - wartość skuteczna składowej interharmonicznej,
- $\angle U, I$  - kąt fazowy interharmonicznej,
- $P_{iharm}$  - moc interharmonicznej.

## Test 1 - Wynik zastosowania metody IV

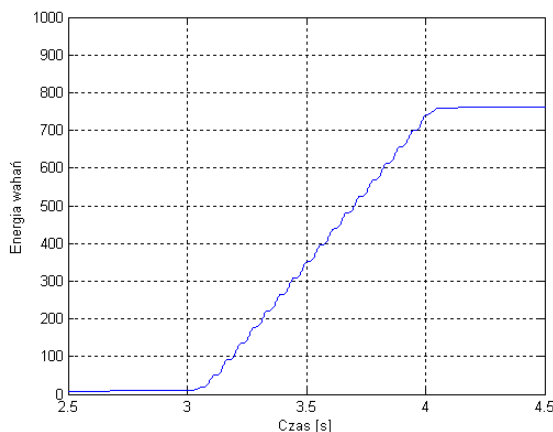
Zgodnie z algorytmem rozważanej metody sygnał napięcia i prądu poddawany jest demodulacji, a następnie filtracji. Przebiegi otrzymane na wyjściu filtrów przedstawiono na rysunku 11. Kolejne przebiegi (rysunki 12 i 13) ilustrują moc i energię wahań napięcia.



Rys. 11. Przebiegi sygnałów  $U$  i  $I$  po filtracji (faza A).



Rys. 12. Przebieg mocy chwilowej wahań (faza A).



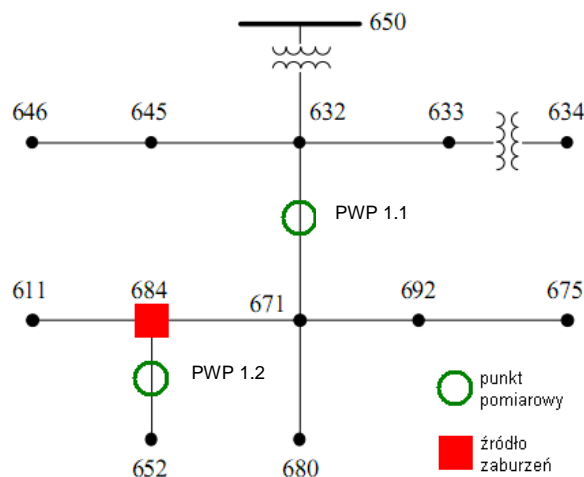
Rys. 13. Przebieg energii wahań (faza A).

Wartości chwilowe mocy wahań są dodatnie, a energia wahań rośnie w czasie. Powyższe obserwacje pozwalają zlokalizować źródło wahań napięcia powyżej PWP, co jest zgodne ze stanem faktycznym. Tym samym wnioskowanie z godne z metodą jest poprawne.

## Test 2 - Źródło wahań napięcia po stronie odbiorcy

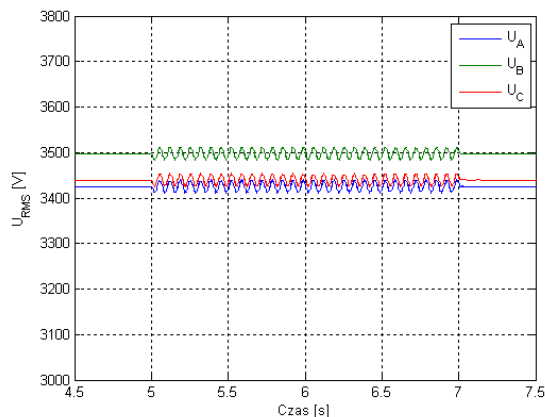
Platformę symulacyjną stanowi 13. węzłowa sieć elektroenergetyczna (rys. 14) wykonana w oparciu o model IEEE 13-Node Test Feeder [Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.].





Rys. 14. Schemat sieci testowej IEEE.

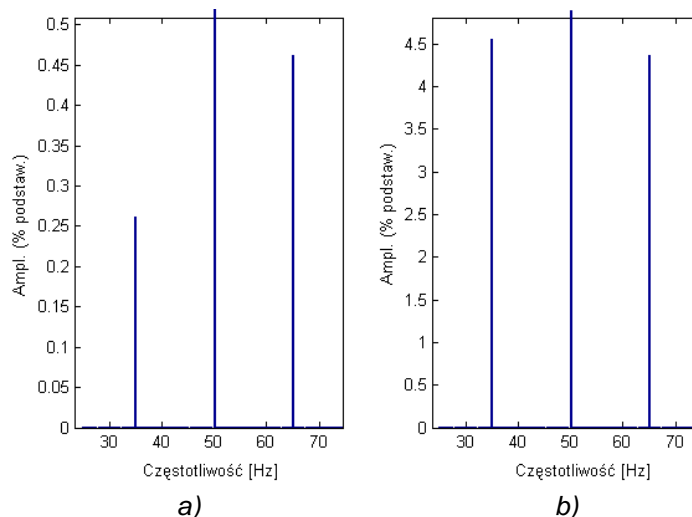
Dla przyjętych warunków symulacji do węzła 684 sieci IEEE przyłączono symetryczny odbiornik wywołujący wahania napięcia. Odbiornik wywołuje przepływ sinusoidalnie zmodulowanego prądu o parametrach modulacji:  $A_{\text{mod}}=50\% I_N$ ,  $f_{\text{mod}}=15$  Hz. W efekcie zmiennego obciążenia w punktach PWP 1.1 występują wahania napięcia przedstawione na rysunku 15 ( $P_{\text{inst}}=3,1$ ).



Rys. 15. Przebiegi napięć w PWP 1.1

## Test 2 - Wynik zastosowania metody III

Wyniki analizy Fouriera dla przebiegów napięcia i prądu w pierwszym punkcie pomiarowym przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Widmo napięcia a) i prądu b) w PWP 1.1 – faza A.

Prócz harmonicznej podstawowej ( $f=50\text{Hz}$ ) w widmie występują także składowe interharmoniczne o częstotliwościach równych  $(f+f_{\text{mod}})$  i  $(f-f_{\text{mod}})$ , będące bezpośrednim skutkiem obecności odbiornika niespokojnego przyłączonego do węzła 684. Dane i wyniki obliczeń mocy tych składowych dla wszystkich trzech faz zestawiono w Tabeli 3.

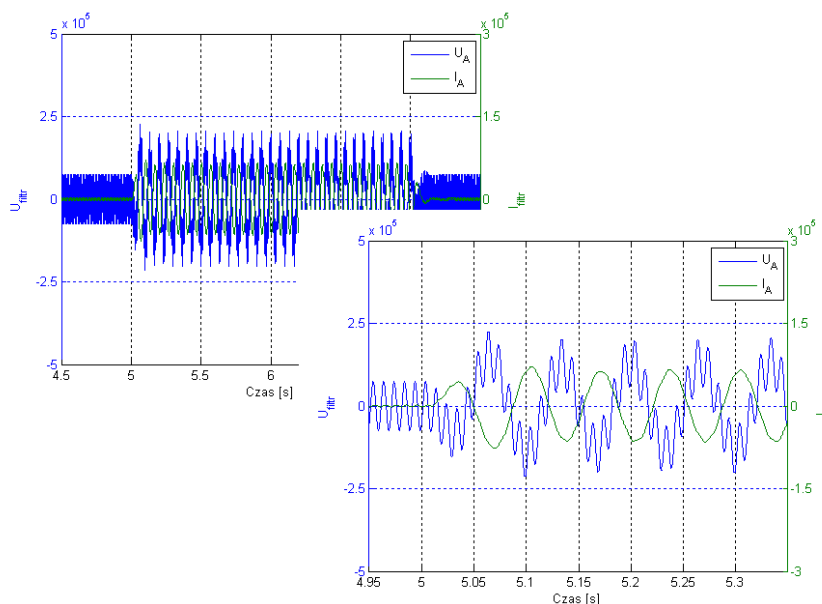
Tabela 3. Składowe widmowe napięcia i prądu oraz moce czynne interharmonicznych – punkt PWP 1.1.

	$A_{\text{fund}} \text{ (RMS)}$	$f_{\text{iharm}}$	$\varphi_{\text{iharm}} [^\circ]$	$\% A_{\text{iharm}}$	$A_{\text{iharm}}$	$\angle U, I [^\circ]$	$P_{\text{iharm}} \text{ [W]}$
$U_A \text{ [V]}$	3642	35 Hz	- 68,2	0,26 %	9,469	-97,1	-28,446
$I_A \text{ [A]}$	533,2		28,9	4,56 %	24,314		
$U_A \text{ [V]}$	3642	65 Hz	114,7	0,46 %	16,753	-93,8	-25,852
$I_A \text{ [A]}$	533,2		208,5	4,37 %	23,301		
$U_B \text{ [V]}$	3498	35 Hz	171,4	0,26 %	9,095	-98,6	-33,637
$I_B \text{ [A]}$	312		270	7,93 %	24,742		
$U_B \text{ [V]}$	3498	65 Hz	-6,1	0,46 %	16,091	-95,9	-39,820
$I_B \text{ [A]}$	312		89,8	7,72 %	24,086		
$U_C \text{ [V]}$	3440	35 Hz	50,8	0,26 %	8,944	-97,8	-30,248
$I_C \text{ [A]}$	479,4		148,6	5,20 %	24,929		
$U_C \text{ [V]}$	3440	65 Hz	233	0,46 %	15,824	265,4	-30,715
$I_C \text{ [A]}$	479,4		-32,4	5,04 %	24,162		

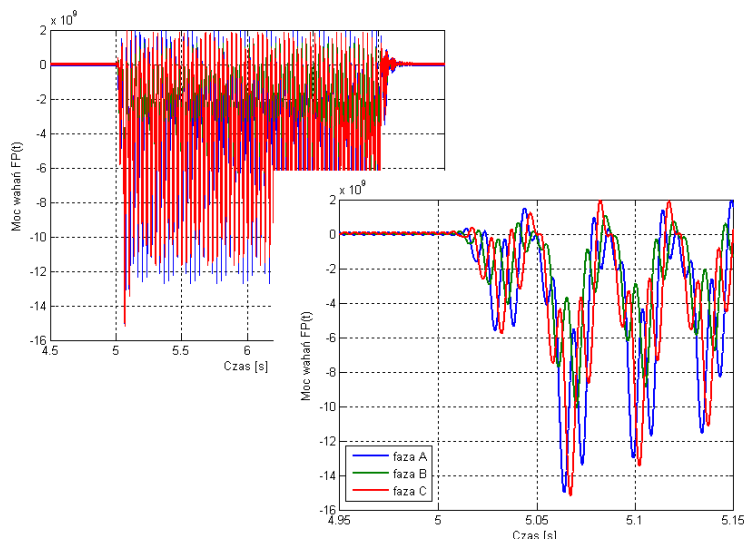
Moce poszczególnych interharmonicznych przyjmują wartości ujemne. Potwierdza to fakt, że źródło zaburzeń znajduje się poniżej punktu pomiarowego.

## Test 2 - Wynik zastosowania metody IV

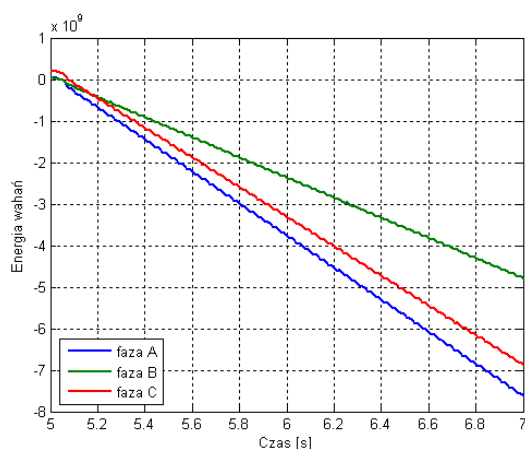
Na rys. 17 przedstawiono przebiegi napięć i prądów po filtracji. Zlokalizowanie źródła wahań napięcia nie sprawia trudności. W znaczącym czasie analizy moce chwilowe przedstawione na rysunku 18 przyjmują ujemne wartości, czego efektem jest ujemna energia wahań (rys. 19). Z przebiegów charakterystyk  $U(t)$  i  $I(t)$  (rys. 17) wynika, że przesunięcie fazowe pomiędzy obiema wielkościami wynosi w przybliżeniu  $180^\circ$ . Jest to pierwszym symptomem lokalizacji źródła zaburzenia poniżej PWP, co potwierdzają charakterystyki mocy i energii wahań.



Rys. 17. Przebiegi napięcia i prądu po filtracji - faza A.



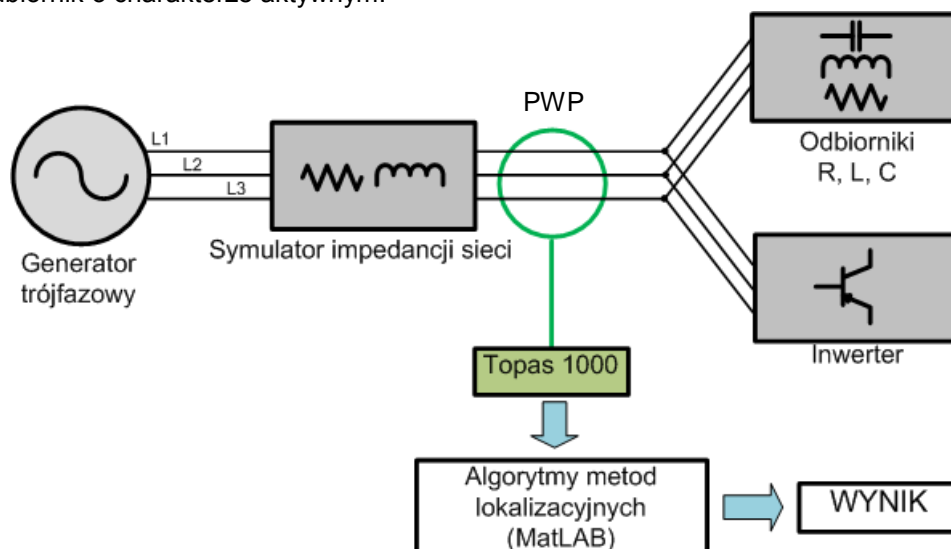
Rys. 18. Przebieg mocy chwilowej wahań.



Rys. 19. Przebieg energii wahań.

## Wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne wykonane zostały w laboratorium TECNALIA zlokalizowanym w Derio (Hiszpania). Układ testowy stanowi laboratoryjna sieć wydzielona (microgrid) (rys. 20), w skład której wchodzi trójfazowe źródło zasilające ( $U=400\text{ V}$ ,  $f=50\text{ Hz}$ ), symulator impedancji sieci, odbiorniki pasywne (R, L, C) oraz inwerter stanowiący odbiornik o charakterze aktywnym.



Rys. 20 Schemat ideowy laboratoryjnego układu testowego.

### Test 3 - Laboratoryjna sieć wydzielona - źródło wahań napięcia po stronie dostawcy

W ramach badań wykonane zostały testy metod lokalizacyjnych w warunkach wystąpienia zaburzenia po stronie dostawcy (powyżej PWP). Zbadano funkcjonalność metod w zależności od charakteru zastosowanych odbiorników – rezystancyjnego, indukcyjnego, pojemnościowego (Tab. 4).

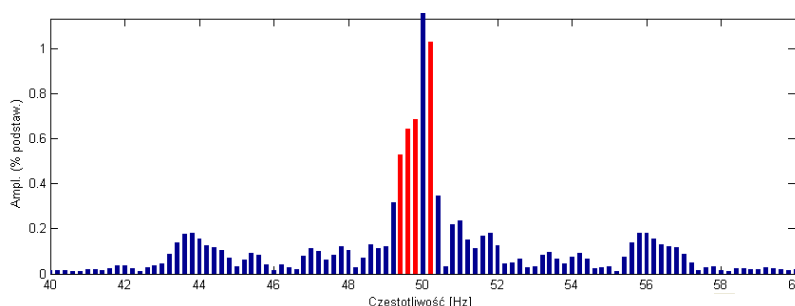
Tab. 4. Parametry obwodu testowego - test 3.

Nr	Parametry sieci		Odbiorniki			Inwerter		PF
	R [ $\Omega$ ]	L [mH]	P [kW]	Q <sub>ind</sub> [kvar]	Q <sub>poj</sub> [kvar]	P [kW]	Q <sub>ind</sub> [kvar]	
1A	0,05	1,16	18,06	0	0	0	0	1
1B	0,05	1,16	18,06	8,75	0	0	0	0,84
1C	0,05	1,16	11,11	0	12,5	0	0	-0,75

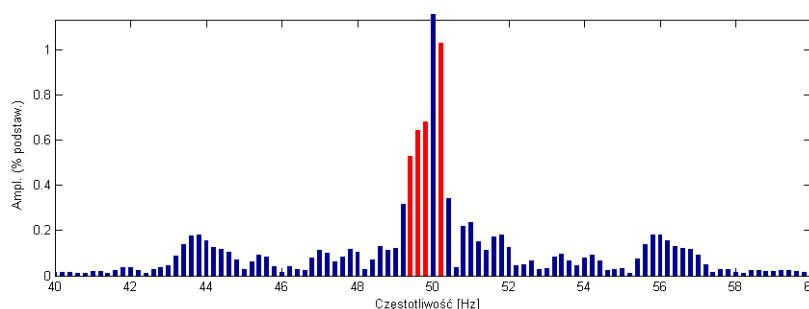
WARIANT 1A - obwód rezystancyjny PF=1

### Test 3 - Wynik zastosowania metody III

Wyniki analizy Fouriera przedstawiono na rysunkach 21 oraz 22. Obliczenia mocy przedstawiono dla czterech interharmonicznych, zaznaczonych czerwonym kolorem. Przykładowe rezultaty obliczeń dla fazy A zostały zebrane w tabeli 5.



Rys. 21 Widmo częstotliwościowe przebiegu napięciowego – faza A.



Rys. 22 Widmo częstotliwościowe przebiegu prądowego – faza A.

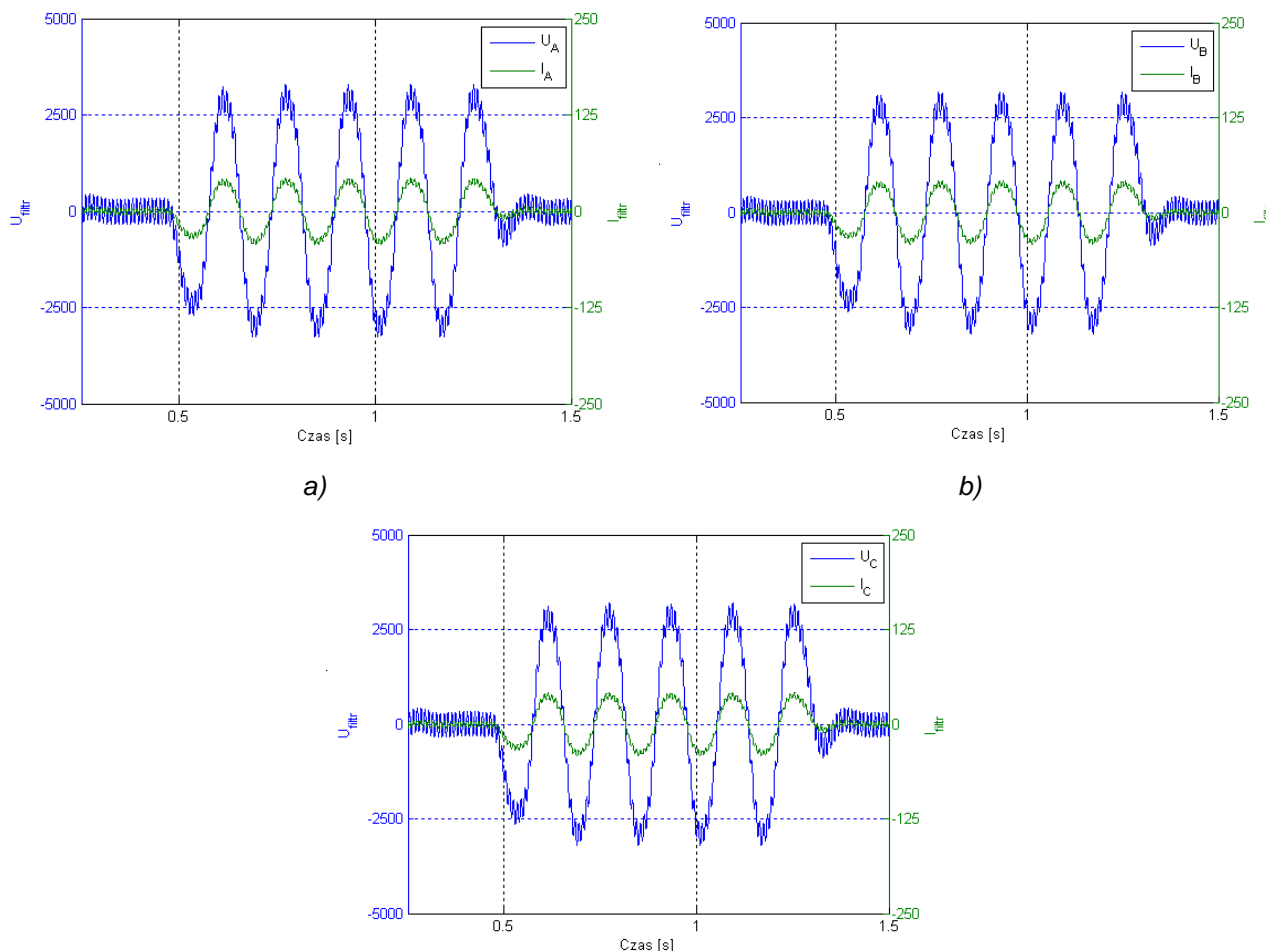
Tab. 5 Składowe częstotliwościowe U, I, moce interharmoniczne.

	A <sub>fund</sub> (RMS)	f <sub>iharm</sub>	φ <sub>iharm</sub> [°]	%A <sub>iharm</sub>	A <sub>iharm</sub>	αU, I [°]	P <sub>iharm</sub> [W]
U <sub>A</sub> [V]	226,7	49,4 Hz	20,0	0,53 %	1,202	0,5	<b>0,165</b>
I <sub>A</sub> [A]	25,99		19,5	0,53 %	0,138		
U <sub>A</sub> [V]	226,7	49,6 Hz	-9,0	0,64 %	1,451	0,5	<b>0,241</b>
I <sub>A</sub> [A]	25,99		-9,5	0,64 %	0,166		
U <sub>A</sub> [V]	226,7	49,8 Hz	-12,6	0,68 %	1,542	0,4	<b>0,272</b>
I <sub>A</sub> [A]	25,99		-13,0	0,68 %	0,177		
U <sub>A</sub> [V]	226,7	50,2 Hz	177,5	1,03 %	2,335	0,5	<b>0,625</b>
I <sub>A</sub> [A]	25,99		177,0	1,03 %	0,268		

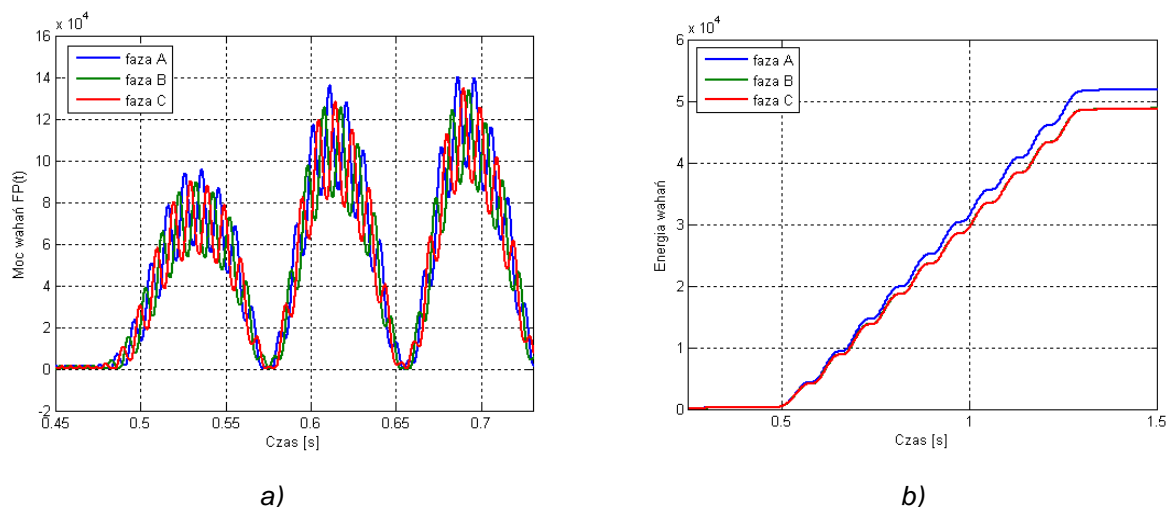
Moce wszystkich wybranych interharmoniczných są dodatnie, co wskazuje na źródło wahań napięcia po stronie dostawcy. Metoda zadziałała poprawnie. Moce interharmoniczných obliczone w wariantach 1B oraz 1C (tabela 4) zawsze przyjmowały wartości dodatnie. Potwierdza to tym samym poprawność działania metody III. Na wyniki nie miał wpływu charakter odbiornika – zarówno przy odbiorach rezystancyjnych, indukcyjnych czy pojemnościowych, algorytm bezbłędnie wskazywał położenie źródła wahań napięcia.  
 WARIANT 1A - obwód rezystancyjny PF=1

### Test 3 - Wynik zastosowania metody IV

Na rysunku 23 przedstawiono przebiegi prądu i napięć po filtracji. Rysunek 24 przedstawia przebiegu mocy i energii wahań.



Rys. 23. Przebieg sygnałów  $U, I$  po filtracji a) faza A, b) faza B, c) faza C.



Rys. 24. Przebieg mocy chwilowej wahań i energii wahań - wariant 1A.

Rysunek 24 wskazuje, że wyznaczone moce wahań przyjmują wartości dodatnie, z kolei energia wahań ma charakter rosnący. Metoda potwierdza, że źródło wahań napięcia zlokalizowane jest po stronie dostawcy. Sytuacja ta powtarza się w przypadku wariantów 1B oraz 1C.

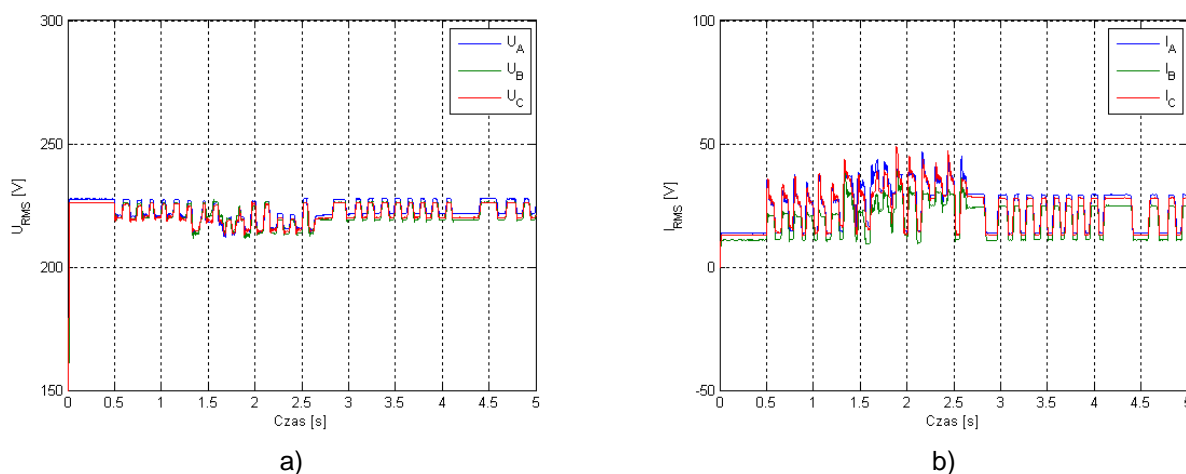
### Test 4 - Laboratoryjna sieć wydzielona - źródło wahań napięcia po stronie odbiorcy

Zgodnie z warunkami testu prawa część obwodu składała się z odbiorników pasywnych i inwertera. Wahania napięcia wygenerowane zostały poprzez stochastyczne procesy łączeniowe odbiornika indukcyjnego oraz części odbiornika rezystancyjnego (11,11kW). W czasie testu inwerter pracował bezprzerwowo. Parametry obwodu zebrano w tabeli 6.

Tab. 6 Parametry elementów obwodu - test 4.

Parametry sieci		Odbiorniki			Inwerter	
R [ $\Omega$ ]	L [mH]	P [kW]	Q <sub>ind</sub> [kvar]	Q <sub>poj</sub> [kvar]	P [kW]	Q <sub>ind</sub> [kvar]
0,25	0,49	13,89	15	0	1,39	2,5

Przebiegi napięć i prądów fazowych (wartości skuteczne) zarejestrowanych w PWP przedstawiono na rysunku 25.



Rys. 25. Przebieg wartości skutecznej napięć fazowych i prądów.

### Test 4 - Wynik zastosowania metody III

Wyniki obliczeń mocy dominujących interharmonicznych zebrano w tabeli 7.

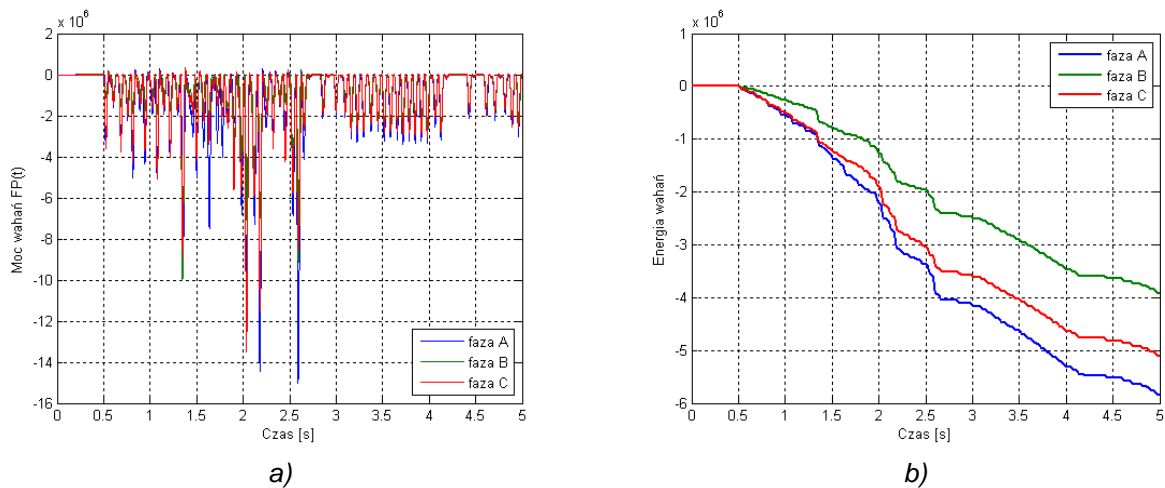
Tab. 7. Zestawienie wyników obliczeń mocy dominujących interharmonicznych.

Faza		Częstotliwość interharmonicznej				Suma mocy
		42,8 Hz	50,2 Hz	50,4 Hz	57,4 Hz	
Moc	A	-6,225	-9,290	-5,134	-3,815	-24,464
	B	-5,994	-8,472	-3,727	-3,740	-21,933
	C	-5,231	-5,067	-3,423	-3,415	-17,136

Obliczone moce dla wszystkich faz jednoznacznie wskazują na obecność źródła wahań poniżej PWP. Potwierdza to poprawność zastosowanej metody lokalizacji.

### Test 4 - Wynik zastosowania metody IV

Przebiegi mocy chwilowej wahań i energii wahań, przedstawione na rysunkach 26a-b), potwierdzają obecność źródła wahań napięcia poniżej PWP.



Rys. 26. Przebieg mocy a) i energii b) wahań.

## Podsumowanie

W ramach artykułu przybliżono podstawy teoretyczne czterech metod lokalizacji źródeł wahań napięcia. Część z nich została zaimplementowana oraz przetestowana w warunkach symulacyjnych i laboratoryjnych. Każda z prób wykorzystywała inny rodzaj zaburzenia w sieci, co pozwoliło na badanie algorytmów w szerokim zakresie możliwych zdarzeń. Wykonano również testy w warunkach obecności kilku źródeł wahań napięcia – każde o odmiennej charakterystyce i wpływie na jakość napięcia zasilania

Bardzo istotne wnioski płyną z wyników badań w obwodach rzeczywistych. Potwierdzono działanie wybranych algorytmów, sprawdzono zależności pomiędzy charakterem elementów obwodu a skutecznością działania metod. Szczególnie cenne okazały się wyniki pomiarów prowadzonych w hiszpańskim laboratorium TECNALIA, które pozwalają sądzić, że zaproponowane metody znajdą w przyszłości zastosowanie w lokalizatorach źródeł zaburzeń. Dużym wyzwaniem jest cały czas jednak poprawa skuteczności tych metod w systemie zakłócanym przez wiele odbiorników jednocześnie. Jest to szczególnie istotne z punktu widzenia zastosowania w rzeczywistym systemie, który zawiera wiele odbiorników o bardzo zróżnicowanym oddziaływaniu. Ogólna ocena wykonanych testów jest jednak bardzo pozytywna, co wskazuje na bardzo duży potencjał implementacji algorytmów lokalizacji wahań napięcia w analizatorach JEE.

## Literatura

- [1] Axelberg P. G. V., Bollen M. H. J., Yu-Hua Gu I.; Trace of Flicker Sources by Using the Quantity of Flicker Power. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 1, January 2008.
- [2] Axelberg P.G.V.; On Tracing Flicker Sources and Classification of Voltage Disturbances. Thesis for the degree of doctor of philosophy, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.
- [3] PN EN 61000-4-15; Kompatybilność elektromagnetyczna. Metody badań i pomiarów. Miernik migotania światła. Specyfikacja projektowa i funkcjonalna.