

## LOKALIZACJA ŹRÓDEŁ ZABURZEŃ NAPIĘCIA W OPARCIU O ZAGREGOWANE DANE POMIAROWE

Krzysztof CHMIELOWIEC<sup>1</sup>, Grzegorz WICZYŃSKI<sup>2</sup>, Andrzej FIRLIT<sup>3</sup>, Mateusz DUTKA<sup>4</sup>,  
Szymon BARCZENTEWICZ<sup>5</sup>

1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
tel.: 12 617 35 93 e-mail: krzysztof.chmielowiec@agh.edu.pl
2. Politechnika Poznańska  
tel.: 61 665 26 39 e-mail: grzegorz.wiczynski@put.poznan.pl
3. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
tel.: 12 617 28 36 e-mail: afirlit@agh.edu.pl
4. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
tel.: 12 617 39 20 e-mail: mdutka@agh.edu.pl
5. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
tel.: 12 617 28 57 e-mail: barczent@agh.edu.pl

**Streszczenie:** W ostatnim czasie operatorzy elektroenergetycznych systemów dystrybucyjnych w Polsce zainstalowali w swoich sieciach kilkadziesiąt tysięcy bilansujących liczników energii elektrycznej wyposażonych, zgodnie z wymaganiami Urzędu Regulacji Energetyki, w funkcje pomiaru wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej. Liczniki te, z racji swoich nowych funkcji pomiarowych oferują nowe możliwości oceny funkcjonowania oraz diagnostyki sieci dystrybucyjnych. Są też źródłem znaczącego wolumenu danych pomiarowych. Artykuł prezentuje możliwości wykorzystania zagregowanych wartości 10-minutowych pomiaru jakości energii elektrycznej, pochodzących z rozproszonych przyrządów pomiarowych (liczników i analizatorów) energii elektrycznej, w celu lokalizacji dominujących źródeł zaburzeń w elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej.

**Słowa kluczowe:** jakość energii elektrycznej, liczniki energii elektrycznej, lokalizacja źródeł zaburzeń napięcia.

### 1. WPROWADZENIE

Analizatory jakości energii elektrycznej (JEE) klasy A, z biegiem ostatnich lat, zyskały dużą przychylność użytkowników za sprawą relatywnie dużej ilości informacji jaką są w stanie zgromadzić. Dzięki ściśle określonymu podejściu do pomiaru i gromadzenia danych pomiarowych, urządzenia te są w stanie dostarczać informacji o stanach awaryjnych systemu elektroenergetycznego z dokładnością rzędu milisekund, profilach (np. dobowych) zaburzeń jakości energii elektrycznej oraz użytecznych danych statystycznych obejmujących tygodnie, miesiące lub lata. W literaturze dostępnych jest szereg publikacji [1,2,3,4,5,6] potwierdzających możliwości zastosowania danych pomiarowych z analizatorów JEE, także na potrzeby lokalizacji źródeł zaburzeń JEE.

Niewątpliwą cechą analizatorów JEE jest ich relatywnie wysoka cena, co powoduje, że operatorzy systemów dystrybucyjnych (OSD) instalują je relatywnie

rzadko oraz tylko w wybranych punktach sieci elektroenergetycznych.

Kwestia wolumenu urządzeń pomiarowych zupełnie inaczej wygląda w przypadku bilansujących liczników energii elektrycznej, które obecne są powszechnie w stacjach i rozdzielniach elektroenergetycznych. W ostatnich dwóch latach polscy OSD zainstalowali dziesiątki tysięcy nowych liczników bilansujących, wyposażonych – zgodnie z wytycznymi Urzędu Regulacji Energetyki – w funkcje pomiaru parametrów JEE (agregowanych 10-minutowych okresach), takich jak: wartość skuteczna napięcia, całkowity wskaźnik odkształcenia napięcia harmonicznymi TTHD, wskaźnik asymetrii napięcia, wskaźnik wahań napięcia  $P_{1t}$ , wskaźniki globalne  $W1-W4$  oraz wybrane dane dotyczące zdarzeń w napięciu (wzrostów, zapadów, przerw w zasilaniu). Dostępność tak dużej liczby danych pomiarowych JEE otwiera nowe możliwości w zakresie diagnostyki systemów dystrybucyjnych oraz lokalizacji źródeł zaburzeń.

### 2. MIARY LICZBOWE LOKALIZACJI ŹRÓDEŁ ZABURZEŃ JEE

Lokalizacja źródeł zaburzeń JEE z użyciem zagregowanych danych 10-minutowych, polega na wykorzystaniu analizy statystycznej wyników pomiarów JEE, rejestrowanych synchronicznie w różnych punktach systemu elektroenergetycznego (SEE). Na tej podstawie wyznaczane są miary liczbowe, pozwalające na określenie źródeł zaburzeń JEE. Jedną z takich miar jest współczynnik korelacji Pearsona –  $r$ . Dobór danych pomiarowych do analizy korelacyjnej dokonywany jest w taki sposób, aby powiązać wartość wybranego wskaźnika JEE (wskaźnik asymetrii napięcia –  $k_{i2}$ , krótkookresowy wskaźnik migotania światła, będący miarą wahań napięcia –  $P_{st}$ , współczynnik całkowitego odkształcenia harmonicznymi napięcia –  $THD_U$ ) z parametrem opisującym stan pracy odbiornika (lub danego

fragmentu SEE), takim jak na przykład: prąd, zmiana napięcia, moc czynna lub moc bierna [7]. Podejściem, które pozwala na uzyskanie dodatkowych informacji o propagacji zaburzeń JEE w SEE jest wyznaczanie współczynnika korelacji  $r$  na podstawie danych pomiarowych zaburzeń JEE pochodzących z dwóch punktów pomiarowych, najczęściej zlokalizowanych w najbliższym otoczeniu.

## 2.1. Współczynnik kowariancji i korelacji $r$ -Pearsona

Współczynnik kowariancji jest miarą siły zmienności dwóch analizowanych przebiegów. Niech  $X_i$  oraz  $X_j$ , dla  $i, j \in \{1, \dots, n\}$  będą zmiennymi opisującymi badane dane pomiarowe. Wtedy:

$$cov(X_i, X_j) = E(X_i \cdot X_j) - (E(X_i) \cdot E(X_j)) \quad (1)$$

lub

$$cov(X_i, X_j) = E[(X_i - E(X_i)) \cdot (X_j - E(X_j))] \quad (2)$$

gdzie:  $E$  - wartość oczekiwana zmiennej, której estymatorem w populacji jest średnia arytmetyczna.

Współczynnik ten wskazuje na powiązanie badanych cech. Jeżeli podzielimy wartości kowariancji przez iloczyn odchyłeń standardowych porównywanych zmiennych, uzyskamy parametr opisujący siłę zależności pomiędzy nimi określony jako **współczynnik korelacji  $r$ -Pearsona** (3).

$$r_{i,j} = cov(X_i, X_j) / (s_i \cdot s_j) \quad (3)$$

gdzie:  $cov(X_i, X_j)$  - współczynnik kowariancji zmiennych  $X_i, X_j$ ,  $s_i, s_j$  - odchylenia standardowe zmiennych  $X_i, X_j$ .

Współczynnik  $r$  w szczególnych przypadkach może fałszywie wskazywać na nieistniejącą korelację (zjawisko to widać na przykładzie kwartetu Anscombe'a), jednak zachowuje skuteczność oraz wysoką efektywność dla rozkładów bliskich normalnemu.

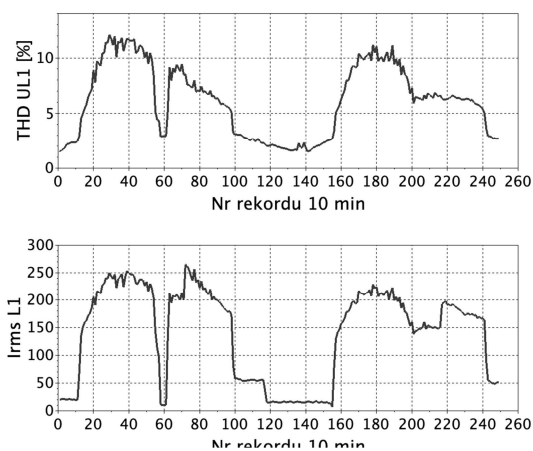
Współczynnik  $r$  może przyjmować wartości od -1 (zupełna korelacja ujemna), przez 0 (brak korelacji) do +1 (zupełna korelacja dodatnia). Wartości graniczne  $r$ , w zakresie których definiuje się poziom siły danej korelacji zależne są od rodzaju obserwowanych zjawisk i powinny być do nich dostosowane w oparciu o badania empiryczne (np. w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe z SEE).

Jeżeli stwierdzona zostanie silna korelacja pomiędzy wskaźnikiem zaburzenia JEE, a parametrem opisującym stan odbiornika, tj. znacznej jego aktywności towarzyszą duże zmiany wskaźnika oceny zaburzenia JEE, oznacza to, że odbiornik zasilany z badanej linii jest prawdopodobnym źródłem zaburzenia. Zaznaczyć należy jednak, że w takim przypadku nie można mówić o 100% pewności dla wskazanego źródła zaburzenia, gdyż możliwy jest również przypadek, w którym profile czasowe rzeczywistego źródła zaburzeń oraz rozpatrywanego odbiorcy, będą na tyle zbliżone, że w obu przypadkach wyznaczona korelacja przyjmować będzie wartości bliskie 1. Stanowi to istotne ograniczenie metody. Jeżeli jednak stwierdzona korelacja jest słaba, to dany odbiorca na pewno jest źródłem danego zaburzenia (poza przypadkami czysto teoretycznymi).

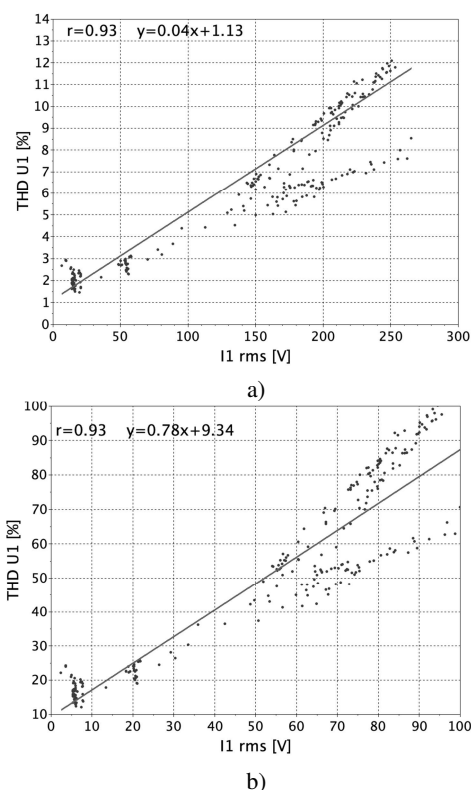
Poziomy korelacji wyznaczanej dla dwóch sąsiadujących punktów pomiarowych stanowią informację dodatkową o tym, czy zlokalizowane źródło zaburzenia jest jedynym (dominującym lub lokalnym) w rozważanym obszarze sieci, czy może jest ich więcej o zbliżonym wpływie na JEE.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki (wartości 10 minutowe) pomiaru  $THD_U$ , oraz  $I_{rms}$  zarejestrowane w przykładowym punkcie pomiarowym. Analiza wskaźnika korelacji  $r$  pozwala na uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy źródłem zwiększonych wartości  $THD_U$  jest oddziaływanie odbiornika lub sposób pracy SEE. Innymi słowy chcemy ustalić czy źródło zaburzenia pochodzi "z dołu" lub "z góry" SEE w stosunku do rozważanego punktu pomiarowego.

Wnioskowanie w tym zakresie prowadzone jest na podstawie analizy korelacyjnej  $r(THD_U, I_{rms})$  prezentowanej na rysunku 2. Została ona wykonana zarówno dla rzeczywistych danych pomiarowych, jak i dla danych znormalizowanych (sprowadzonych do zakresu 0-100%), aby wykazać niezmiennosc współczynnika  $r$  dla obu przypadków (w odróżnieniu od współczynników prostej regresji liniowej, które są silnie zależne zarówno od zmienności danych pomiarowych, ale także ich poziomów, co ma szczególne znaczenie w przypadku analiz prowadzonych na różnych poziomach napięć w SEE).



Rys. 1. Przebiegi czasowe  $THD_U$  i  $I_{rms}$  10 minutowe wartości zarejestrowane



Rys. 2. Wykres korelacji  $r(THD_U, I_{rms})$   
a) dane rzeczywiste, b) dane znormalizowane

Wyznaczona korelacja na poziomie 0,76 wskazuje na znaczną zależność pomiędzy poziomem zaburzenia ( $THD_U$ ), a aktywnością odbiorcy ( $I_{rms}$ ) i wskazuje na odbiorcę jako dominujące źródło wyższych harmonicznych napięcia.

## 2.2. Wskaźnik emisji odbiornika

Wskaźnik emisji odbiornika  $e_{odb}$  zawiera informację, ile wynosi szacunkowy udział odbiorcy w generacji zaburzeń w danym punkcie pomiarowym. Wskaźnik jest wyliczany z wykorzystaniem współczynników prostej regresji liniowej wyznaczanych zgodnie z wzorami (4) oraz (5).

$$\bar{a} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \left( \sum y_i - a \sum x_i \right) \quad (5)$$

gdzie:  $x_i, y_i$  - wyniki pomiarów,  $n$  - liczba wykonanych pomiarów.

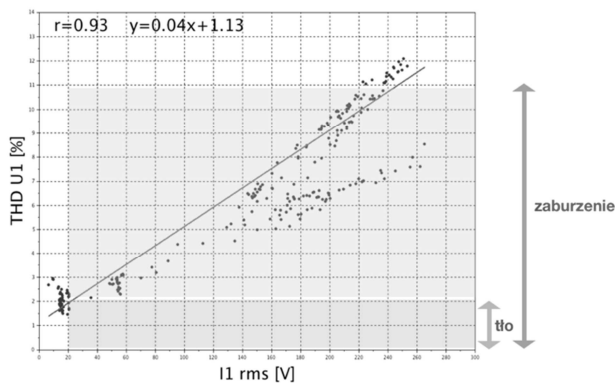
W dalszej kolejności obliczany jest poziom zaburzenia (6) oraz  $t\theta$  (7). Zastosowane we wzorach (6, 7) wartości percentyli CP05 oraz CP95 odnoszą się odpowiednio do poziomu  $t\theta$  (poziom zaburzenia dla okresów, gdy odbiorca nie pracuje lub pracuje przy małym obciążeniu) oraz poziomu zaburzenia, gdy odbiorca pracuje na poziomie zbliżonym do maksymalnego.

$$\text{zaburzenie} = a \cdot CP(I_{rms}, 95) + b \quad (6)$$

$$t\theta = a \cdot CP(I_{rms}, 05) + b \quad (7)$$

$$e_{odb} = (\text{zaburzenie} - t\theta) / \text{zaburzenie} \cdot 100 [\%] \quad (8)$$

Podsumowaniem etapu jest wyznaczenie wskaźnika  $e_{odb}$  zgodnie z (8) poprzez określenie procentowego udziału *zaburzenia* do poziomu  $t\theta$ , który reprezentuje poziom zaburzeń wprowadzanych przez dostawcę. Wylizanie  $e_{odb}$  polega na wyznaczeniu poziomu parametru  $t\theta$ , jako średniej wartości wskaźnika JEE za okres, w którym aktywność odbiorcy jest odpowiednio mała. W związku z powyższym warunkiem wyznaczenia tego wskaźnika jest występowanie takich stanów pracy odbiornika, w których pobierany prąd jest odpowiednio mały w porównaniu z jego wartością znamionową (0-15%).



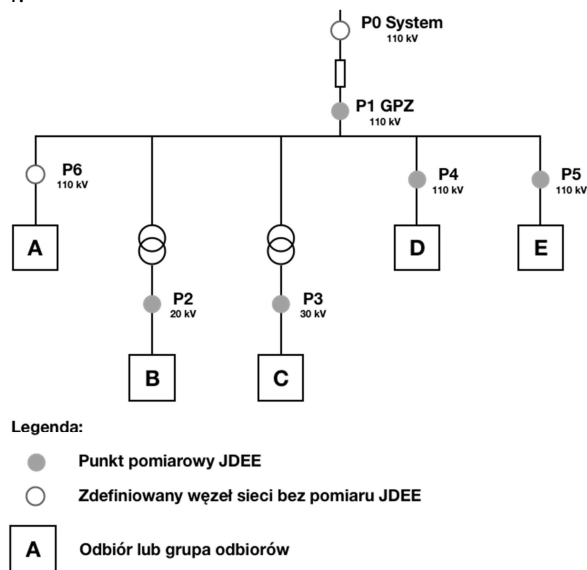
Rys. 3. Graficzna prezentacja idei wskaźnika  $e_{odb}$

## 3. ANALIZA PRZYPADKU

Rozważany przypadek dotyczy systemu elektroenergetycznego dużego odbiorcy przemysłowego

zasilanego z poziomu 110 kV, posiadającego wewnętrzną sieć dystrybucyjną SN z różnymi poziomami napięć. Sieć ma strukturę drzewiastą. W systemie zasilania odbiorcy pracuje duży niespokojny odbiornik, silnie oddziaływający na system operatora. Na rysunku Rys.4 pokazano uproszczony schemat rozważanego fragmentu systemu elektroenergetycznego z zaznaczonymi miejscami podłączenia analizatorów – punkty od P1 do P6.

W punkcie P1 mierzony jest sumaryczny prąd zasilania GPZ. Punkty pomiarowe P4 oraz P5 dotyczą dwóch odplywów z GPZ do grup odbiorców D oraz E. Punkty pomiarowe P2 oraz P3 realizują pomiar dużych odbiorników jednostkowych B oraz C. Pozostałe (nieopomiarowane) odplywy z GPZ reprezentuje grupa odbiorców A. Rozważana sieć testowa zalicza się do kategorii sieci przemysłowych, dla których obowiązują poziomy kompatybilności określone w normie PN-EN 61000-2-4 [8]. Uproszczony schemat sieci testowej przedstawiony jest na Rys. 4.



Rys. 4. Schemat sieci testowej

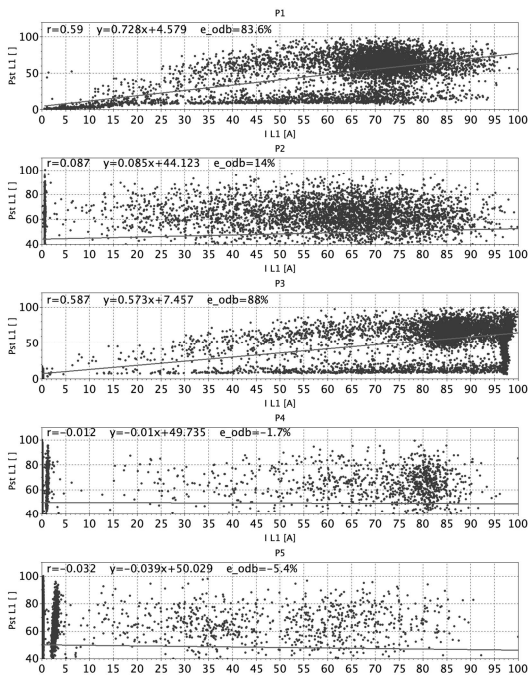
W tabeli 2 zawarto zestawienie CP95 wyznaczonego dla  $P_{st}$  dla poszczególnych punktów pomiarowych. Dane przedstawione w tabeli 2 wskazują na znaczące przekroczenia poziomu dopuszczalnego (w odniesieniu do [8]) dla wahań napięcia we wszystkich punktach pomiarowych. Największe wartości  $P_{st}$  występują w punkcie P3. Dla rozważanej sieci testowej przeprowadzono ocenę lokalizacji źródeł wahań napięcia. Z uwagi na symetrię fazową wyników pomiarów przeprowadzona analiza obejmuje prezentację danych oraz wyznaczenie miar lokalizacji zaburzeń wyłącznie dla fazy L1.

Tabela 2. Poziom wahań napięcia w sieci testowej

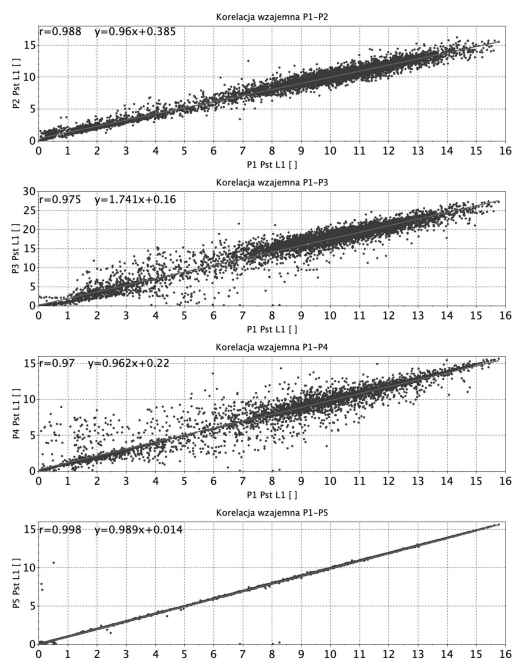
Punkt pomiarowy	Wskaźnik	$P_{st}$
P1	CP95	14,56
P2		13,10
P3		22,90
P4		13,07
P5		13,07

Na rysunku 5 zaprezentowano uzyskane wykresy korelacyjne wraz z naniesionymi informacjami o wskaźniku korelacji  $r$ , współczynnikach prostej regresji  $a$  i  $b$  oraz wskaźniku emisji odbiornika  $e_{odb}$ . Rysunek 6 prezentuje analizę korelacyjną (korelacja wzajemna)

między wartościami  $P_{st}$  par punktów pomiarowych zlokalizowanych jeden pod drugim w ramach rozpatrywanej drzewiastej struktury sieci.



Rys. 5. Charakterystyki korelacyjne  $r(P_{st}, I)$  dla punktów P1-P5 (dane znormalizowane)



Rys. 6. Charakterystyki korelacyjne wzajemne  $r(P_{st_{Px}}, P_{st_{Py}})$  dla punktów P1-P5

Zgromadzone wyniki obliczeń, w szczególności wysokie wartości korelacji wzajemnych, wskazują na obecność w sieci jednego dominującego źródła wahań napięcia, które zlokalizowane jest poniżej punktu P3.

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono podejście do lokalizacji źródeł zaburzeń JEE oparte na analizie danych zagregowanych (10 minutowych) pochodzących z rozproszonego systemu urządzeń pomiarowych z funkcjami pomiaru zagregowanych wartości wskaźników JEE. Zdefiniowano i omówiono miary liczbowe wykorzystywane w procesie lokalizacji zaburzeń JEE, wskazując na ich możliwości oraz ograniczenia.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Li, C., Tayjasanant, T., Xu W., Liu X.: A method for voltage sag source detection by investigating slope of the system trajectory, IEEE Proceedings on Generation Transmission & Distribution, 150, 3, 2003 pp.367-372.
2. Pradhan A.K, Routray A., Madhan S.: Fault direction estimation in radial distribution system using phase change in sequence current, IEEE Transactions on Power Delivery, 22, 2007.
3. Nassif A., Nino E., Xu W.: A V-I slope based method for flicker source detection, Annual North American Power Symposium, Edmonton (Canada), October 2005, 0-7803-9255- 8/2005 IEEE.
4. Nassif A., Zhang D., Xu W.: Flicker source identification by interharmonic power direction, IEE CCECE/CCGEI'2005 International Conference, Saskatoon (Canada), May 2005, 0-7803-8886-0/2005/IEEE.
5. Pyzalski T.: Localisation of harmonic sources in a power system, Ph.D. dissertation, Wrocław University of Technology, 2006.
6. Li C., Xu W., Tayjasanant T.: A critical impedance based method for identifying harmonic sources, IEEE Transaction on Power Delivery, 19, 1, April 2004.
7. Hanzelka Z., Piątek K. et al. "Single-Point Methods for Location of Distortion, Unbalance, Voltage Fluctuation and Dips Sources in a Power System", chapter in "Power Quality – Monitoring, Analysis and Enhancement," edited by Ahmed Zobaa, Mario Mañana Canteli and Ramesh Bansal, ISBN 978-953-307-330-9, InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, available at www.intechopen.com.

### LOCATION OF VOLTAGE DISTURBANCES SOURCES BASED ON AGGREGATED MEASURING DATA

Recently, electricity distribution system operators in Poland have installed tens of thousands of balancing electricity meters, in accordance with the requirements of the Energy Regulatory Office, with the function of measuring the quality of electricity supply indicators. These meters, due to their new power quality measuring functions and significant volume, offer new possibilities in the assessment of functioning and diagnostics of power distribution systems. The article presents the possibility of using aggregated 10-minute power quality measurement data from electricity from dispersed electricity meters to locate dominant sources of disturbances in the power distribution network.

**Keywords:** power quality, energy meters, location of power quality disturbances sources.