

Zastosowanie zagregowanych danych pomiarowych w wykrywaniu źródeł zaburzeń jakości energii elektrycznej

Streszczenie. 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 oferują nowe możliwości oceny jakości napięcia oraz diagnostyki sieci dystrybucyjnych, będąc źródłem istotnego wolumenu danych pomiarowych. Artykuł prezentuje możliwości wykorzystania wyników pomiarów agregowanych w okresach 10-minutowych, pochodzących z rozproszonego systemu pomiarowego (składającego się z dużej liczby liczników i i małej liczby analizatorów) w lokalizacji dominujących źródeł zaburzeń w elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej.

Abstract. In recent years, 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 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 dispersed electricity meters to locate dominant sources of disturbances in the power distribution network. The use of measurement aggregated data to detect the sources of disturbances in electrical distribution systems

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

Keywords: power quality, energy meters, location of voltage disturbances.

Wstęp

Współczesne analizatory jakości energii elektrycznej (JEE) klasy A to zaawansowane układy pomiarowo-rejestrujące o dużych możliwościach diagnostycznych. Podstawowym zadaniem takich układów jest ocena jakości napięcia w sieciach elektroenergetycznych. Oprócz tego, w wielu sytuacjach zagregowane dane z takich analizatorów wspomagają diagnostykę sieci elektroenergetycznych. Przykładowo, wyniki pomiarów zarejestrowane w odpowiednio wybranych punktach sieci wspierają wykrywanie źródeł zaburzeń JEE [1,2,3,4,5,6]. Jednak analizatory JEE to urządzenia o wysokiej cenie. Dlatego operatorzy systemów dystrybucyjnych (OSD) instalują je relatywnie rzadko oraz tylko w wybranych punktach sieci elektroenergetycznych. Najbardziej rozpowszechnionymi w sieciach elektroenergetycznych układami pomiarowo-rejestrującymi są liczniki energii elektrycznej. W nowych modelach liczników dodawane są funkcje oceny JEE. Możliwości pomiarowe liczników są znacznie mniejsze niż analizatorów JEE. Jednak w ostatnich dwóch latach OSD w Polsce zainstalowali dziesiątki tysięcy nowych liczników bilansujących. Są one wyposażone, zgodnie z wytycznymi Urzędu Regulacji Energetyki, w funkcje pomiaru wskazanych wielkości JEE agregowanych w 10 minutowych okresach. Do wskazanych wielkości należą: wartość skuteczna napięcia U , całkowity wskaźnik odkształcenia napięcia harmonicznymi TTHD, wskaźnik asymetrii napięcia k_{u2} , wskaźnik wahań napięcia P_{st} , wskaźniki globalne $W1$ - $W4$ oraz wybrane wskaźniki dotyczące zdarzeń w napięciu (wzrostów, zapadów, przerw w zasilaniu). Dostępność tak dużej ilości informacji o JEE otwiera nowe możliwości w zakresie diagnostyki systemów dystrybucyjnych oraz lokalizacji źródeł zaburzeń napięcia.

Miary liczbowe lokalizacji źródeł zaburzeń jakości energii elektrycznej

Lokalizacja źródeł zaburzeń JEE na podstawie danych agregowanych w 10 minutowych okresach opiera się na wykorzystaniu analizy statystycznej wyników pomiarów JEE, rejestrowanych synkronicznie 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 r -Pearson. Dobór danych pomiarowych do analizy korelacyjnej dokonywany jest w taki sposób, aby powiązać wartość wybranego wskaźnika JEE (wskaźnik asymetrii napięcia - k_{u2} , krótkookresowy wskaźnik migotania światła, będący miarą wahań napięcia - P_{st} , czy współczynnik całkowitego odkształcenia harmonicznymi napięcia - TTHD_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 na podstawie danych pomiarowych zaburzeń JEE pochodzących z dwóch punktów pomiarowych, najczęściej zlokalizowanych w najbliższym otoczeniu.

Współczynnik kowariancji i korelacji r -Pearsona

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

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

lub

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

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

Jeżeli podzielimy wartości kowariancji przez iloczyn odchyleń standardowych porównywanych zmiennych, uzyskamy parametr opisujący siłę zależności pomiędzy nimi określony jako **współczynnik korelacji r -Pearsona**:

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

gdzie: $\text{cov}(X_i, X_j)$ - 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

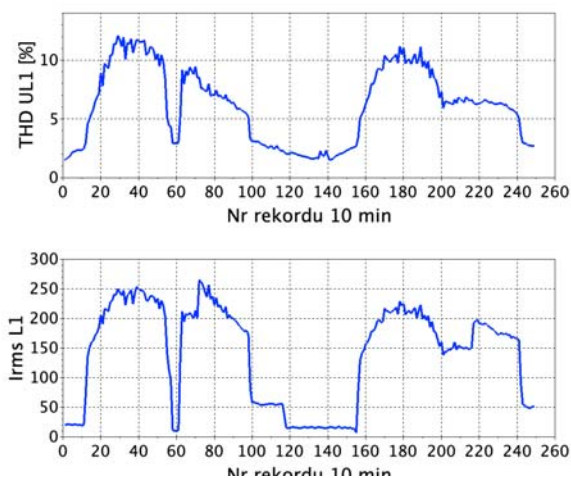
(zupełna korelacja dodatnia). Wartości graniczne r , w zakresie których definiuje się poziom siły danej korelacji zależne są od rodzaju obserwowanych zjawisk i powinny być do nich dostosowane w oparciu o badania empiryczne (np. w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe z SEE).

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 sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia. 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.

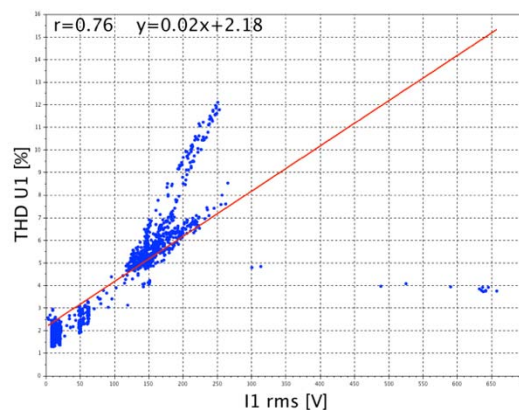
Wnioskowanie w tym zakresie prowadzone jest na podstawie analizy korelacyjnej $r(THD_U, I_{rms})$ prezentowanej na rysunku 2. Została ona wykonana zarówno dla rzeczywistych danych pomiarowych, jak i dla danych znormalizowanych (sprowadzonych do zakresu 0-100%), aby wykazać niezmiennosc współczynnika 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).



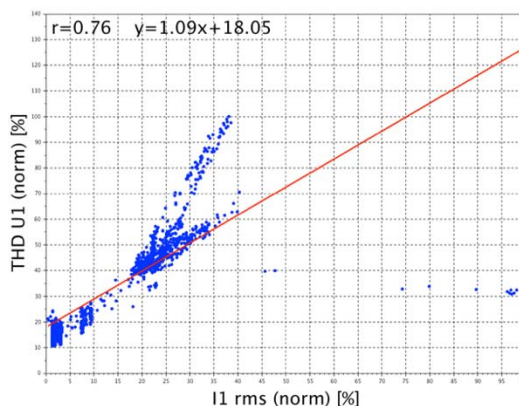
Rys.1. Przebiegi czasowe THD_U i I_{rms} 10 minutowe wartości zagregowane

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.



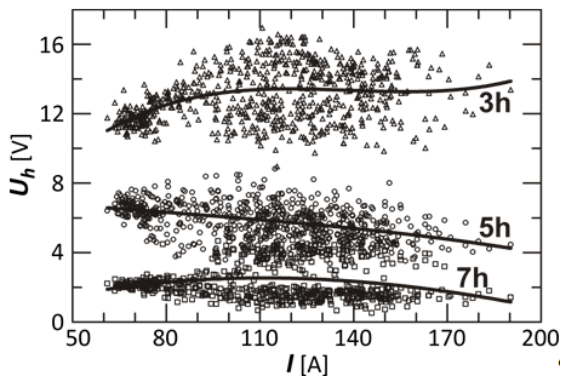
a)



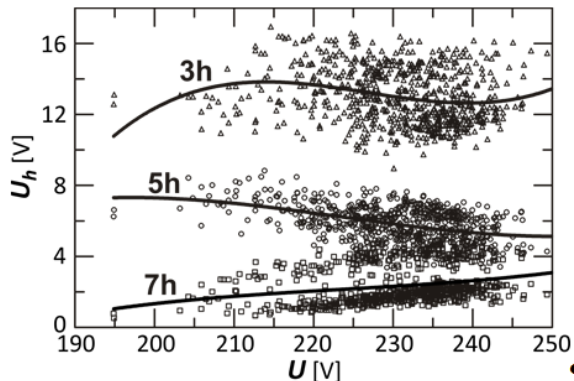
b)

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

Lokalizacja źródeł zaburzeń jakości energii elektrycznej metodami korelacyjnymi zakłada, że wartość zaburzenia wzrasta z wartością wielkości opisującej stan źródła zaburzeń. Przykładowo, zakłada się, że wzrostowi prądu I uciążliwego odbiornika towarzyszy wzrost wartości harmonicznych w punkcie zasilania tego odbiornika. Jednak wyniki badań wskazują, że nie zawsze tak jest. Na rysunku 3 zamieszczono charakterystykę $U_h=f(I)$ sporządzoną na podstawie wyników pomiarów w sieci nn. Prąd o wartości skutecznej I rejestrowano w stacji SN/nn w polu zasilającym poszukiwane uciążliwe odbiorniki. Harmoniczne napięcia U_h rzędu $h=3, 5$ i 7 , rejestrowano w wytypowanym punkcie linii nn zasilającej poszukiwane odbiorniki. Na charakterystyce $U_h=f(I)$ widoczne są różne powiązania harmonicznych U_h napięcia i wartości skutecznej I prądu. Dla harmonicznej $h=3$ wzrostowi prądu I towarzyszy przyrost harmonicznej U_3 . Jednak dla harmonicznych rzędu $h=5$ i 7 wzrostowi wartości prądu I odpowiada zmniejszanie wartości harmonicznych U_5 i U_7 . Innym przykładem potwierdzającym możliwość wystąpienia mieszanych powiązań zaburzenia z stanem źródła zaburzeń jest charakterystyka $U_h=f(U)$ z rysunku 4. Prezentuje ona wyniki pomiarów wartości skutecznej U i wybranych harmonicznych U_h napięcia w wytypowanym punkcie linii nn zasilającej poszukiwane odbiorniki. Wzrostowi napięcia U towarzyszy albo zmniejszanie wartości U_5 , albo przyrost U_7 , albo niejednoznaczny trend zmian U_3 . Z zamieszczonych przykładów wynika, że w procesie lokalizacji źródeł zaburzeń jakości energii elektrycznej metodami korelacyjnymi należy uwzględniać możliwość wystąpienia powiązań przedstawionych na rysunkach 3 i 4.



Rys.3. Przykładowa charakterystyka $U_h=f(I)$ harmonicznych napięcia i prądu fazowego w sieci nn dla $h = 3, 5$ i 7



Rys.4. Przykładowa charakterystyka $U_h=f(U)$ harmonicznych napięcia fazowego w sieci nn dla $h = 3, 5$ i 7

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).

(4)

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

(5)

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

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.

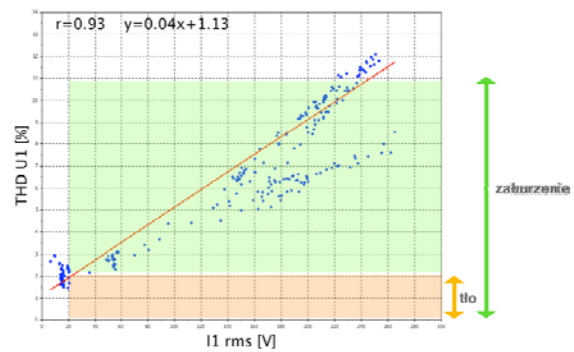
(6) $zaburzenie = a \cdot CP(I_{rms}, 95) + b$

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

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

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. Wskaźnik e_{odb} opiera się 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%).

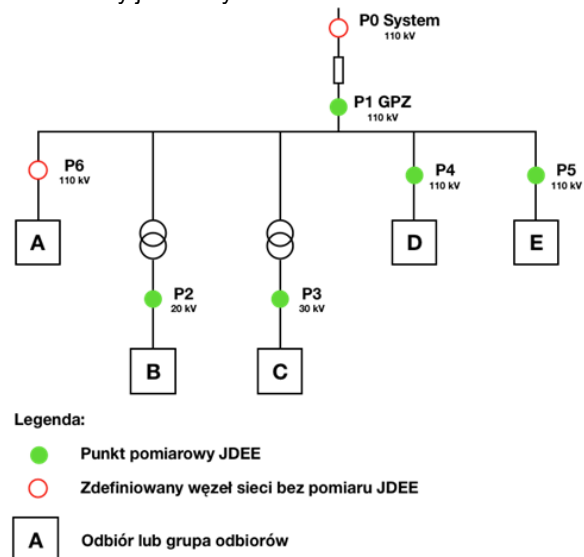


Rys.5. Graficzna prezentacja idei wskaźnika e_{odb}

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 oddziałujący na system operatora. Na rysunku 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 odpływów z GPZ do grup odbiorców D oraz E. Punkty pomiarowe P2 oraz P3 realizują pomiar dużych odbiorników jednostkowych B oraz C. Pozostałe (nieopiniowane) odpływy 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 rysunku 6.



Rys.6. Schemat sieci testowej

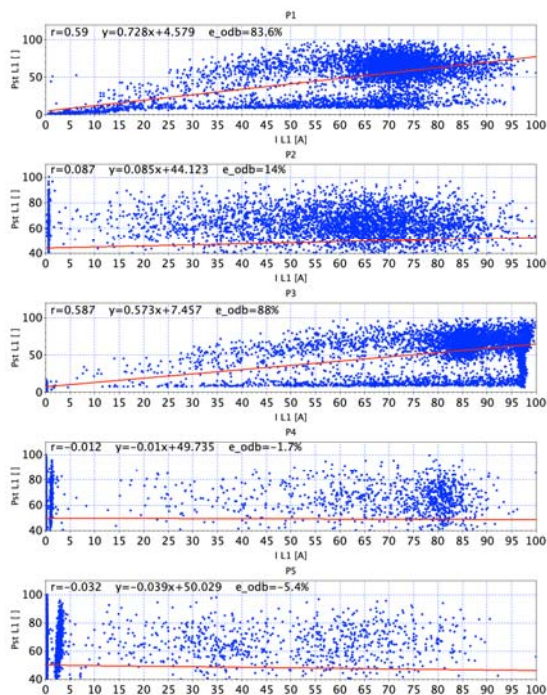
W tabeli 2 zawarto zestawienie CP95 wyznaczonego dla P_{st} dla poszczególnych punktów pomiarowych. Dane przedstawione w tabeli 2 wskazują na znaczące przekroczenia poziomu dopuszczalnego (w odniesieniu do [8]) dla wahań napięcia we wszystkich punktach pomiarowych. Największe wartości P_{st} występują w punkcie

P3. Dla rozważanej sieci testowej przeprowadzono ocenę lokalizacji źródeł wahań napięcia.

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 7 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 8 prezentuje analizę korelacyjną (korelacja wzajemna) pomiędzy wartościami P_{st} par punktów pomiarowych zlokalizowanych jeden pod drugim w ramach rozpatrywanej drzewiastej struktury sieci.

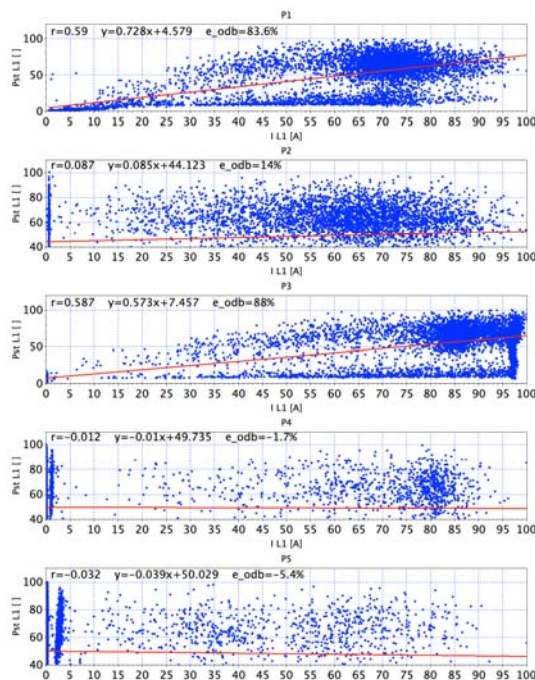


Rys.7. Charakterystyki korelacyjne $r(P_{st}, I)$ dla punktów P1-P5 (dane znormalizowane)

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.

Wnioski końcowe

W artykule przedstawiono podejście do lokalizacji źródeł zaburzeń JEE oparte na analizie danych zagregowanych 10 minutowych pochodzących z rozproszonego systemu pomiarowego. Zdefiniowano i omówiono miary liczbowe wykorzystywane w procesie lokalizacji zaburzeń JEE, wskazując na ich możliwości oraz ograniczenia.



Rys.8. Charakterystyki korelacyjne wzajemne $r(P_{st_{Px}}, P_{st_{Py}})$ dla punktów P1-P5.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Chmielowiec, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: kchmielo@agh.edu.pl; dr hab. inż. Grzegorz Wiczyński, Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, e-mail: gwicz@man.poznan.pl; dr inż. Andrzej Firlit, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: afirlit@agh.edu.pl; mgr inż. Mateusz Dutka, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: mdutka@agh.edu.pl; dr inż. Szymon Barcentewicz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: barcent@agh.edu.pl

LITERATURA

- [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 Tran, 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/ CGEI'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 Zbigniew, Piątek Krzysztof 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", ISBN 978-953-307-330-9, InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, available at www.intechopen.com
- [8] PN-EN 61000-2-4:2003 Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych, PKN, 2003