

## ZMIANY POZIOMÓW NAPIĘĆ W SIECI NISKIEGO NAPIĘCIA Z PRZYŁĄCZONYMI ŹRÓDŁAMI GENERACJI ROZPROSZONEJ

Robert KOWALAK

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki,  
tel.: 58 347-18-27, e-mail: robert.kowalak@pg.gda.pl

**Streszczenie:** Wprowadzenie generacji rozproszonej do sieci niskiego napięcia może wywołać w niej problemy natury napięciowej. W artykule zaprezentowano wpływ generacji rozproszonej na poziomy napięcie w sieci niskiego napięcia. Rozpatrzono różne punkty przyłączenia źródeł i związane z tym zmiany poziomów napięć. Analizę przeprowadzono dla rzeczywistej sieci niskiego napięcia o znacznej długości. Sieć zasilana budynki mieszkalne zlokalizowane na terenie wiejskim.

**Słowa kluczowe:** mikrogeneracja, odnawialne źródła energii, poziomy napięcie, sieć niskiego napięcia.

### 1. WPROWADZENIE

W miarę wzrostu świadomości społeczeństwa i rozwoju technologii, przy równoczesnym obniżaniu się kosztów instalacji małych źródeł energii elektrycznej, coraz więcej odbiorców energii może zostać posiadaczem takiego źródła. Jego instalacja przy budynku mieszkalnym lub innym niedużym obiekcie może przyczynić się do znacznego obniżenia ilości energii pobieranej z sieci zasilającej przez taki obiekt, a co za tym idzie ograniczyć związane z tym koszty.

Odnawialne źródła energii (OZE) są uważane za elementy wpływające na podniesienie bezpieczeństwa energetycznego, gdyż ich praca przyczynia się do zmniejszenia zależności od importowanych paliw kopalnych. Innym aspektem jest też wpływ na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Nie bez znaczenia są także czynniki ekonomiczne związane z kosztami energii pochodzącej z elektrowni konwencjonalnych przy równocześnie obniżających się kosztach OZE [1].

Źródła rozproszone, przeznaczone do wytwarzania energii elektrycznej na małą skalę, współpracujące z siecią niskiego napięcia przyczyniły się do powstania pojęć mikrogeneracji i mikroźródeł. Do mikroźródeł zalicza się mikroturbiny gazowe i wiatrowe, ogniwa fotowoltaiczne i paliwowe oraz mikroturbiny na biopaliwa [2]. Odbiorcy dokonujący inwestycji w mikrogenerację ukierunkowaną na własny użytek stają się prosumentami, czyli producentami i konsumentami energii elektrycznej jednocześnie. Wytworzoną energię elektryczną wykorzystują na własny użytek, a jej ewentualne nadwyżki mogą sprzedawać do sieci zasilającej. Prosumentami mogą więc być gospodarstwa domowe, gospodarstwa rolne, czy małe przedsiębiorstwa. W Polsce przyjmuje się, że 10% energii będą generować prosumenci [3].

Podstawowym zagrożeniem dla sieci nn, w której znajduje się pewna liczba mikroźródeł, są zmiany napięcia,

uzależnione nie tylko od stopnia obciążenia sieci, ale także aktualnej generacji. W takiej sieci nie ma urządzeń prowadzących automatyczną regulację napięcia. Co prawda można dokonać zmiany położenia przełącznika zaczepów w transformatorze SN/nn, ale tylko w stanie beznapięciowym i jest to proces przeprowadzany ręcznie.

Na poziomy napięcie może mieć wpływ również rozmieszczenie źródeł w danej sieci. Skupienie ich w jednym punkcie (jednej gałęzi) może dać inne efekty, niż rozmieszczenie równomierne. Ponadto obecność źródeł blisko transformatora SN/nn wywoła również inne efekty, niż lokalizacja źródeł na końcu sieci (w punktach najbardziej oddalonych od transformatora). Niniejszy artykuł koncentruje się na określeniu wpływu miejsca lokalizacji mikroźródeł w sieci na skalę zmian napięcia, która w tej sieci może zaistnieć.

### 2. PRZYŁĄCZANIE MIKROŹRÓDEŁ DO SIECI

Przyłączenie odnawialnego źródła energii, nawet o małej mocy, do sieci elektroenergetycznej jest regulowane odpowiednimi przepisami. Aktami prawnymi w naszym kraju, które określają warunki pracy i przyłączania odnawialnych źródeł energii do sieci są: Ustawa Prawo Energetyczne z 10 kwietnia 1997 r. wraz z późniejszymi zmianami [4], ustawa o OZE wraz ze zmianami [5] oraz Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku [6].

Źródła energii elektrycznej o mocy znamionowej nie przekraczającej 40 kW teoretycznie mogą być podłączane w sieci nn bezpośrednio w każdym punkcie sieci. Muszą być jednak przy tym spełnione warunki określone w IRiESD odpowiednich operatorów (np. [7]), do których sieci rozdzielczej taka instalacja ma zostać podłączona.

Największą popularnością jako mikroźródła instalowane w sieci niskiego napięcia cieszą się instalacje fotowoltaiczne i małe elektrownie wiatrowe, o mocach rzędu pojedynczych kilowatów.

Jednym z pierwszych mikroźródeł, które zyskało popularność były turbiny wiatrowe. Dokonują one zamiany energii kinetycznej strumienia powietrza na energię mechaniczną, która w generatorze zamieniana jest na energię elektryczną. Rozróżnia się dwa typy turbin, ze względu na położenie osi wirnika: z poziomą osią obrotu – HAWT (ang. Horizontal Axis Wind Turbines) oraz z pionową osią obrotu – VAWT (ang. Vertical Axis Wind Turbines) [8]. Pierwsze wykorzystywane są częściej i mają większą sprawność.

Natomiast drugie charakteryzują się pracą niezależną od kierunku wiatru, ale posiadają mały moment rozruchowy [9].

Obecnie coraz większą popularnością zaczynają cieszyć się ogniwa fotowoltaiczne. Przekształcają one energię promieniowania słonecznego na energię elektryczną dzięki zjawisku fotoelektrycznemu zachodzącemu w półprzewodnikowej strukturze fotoogniwa. Praca ogniwa zależna jest od warunków atmosferycznych takich jak nasłonecznienie i temperatura oraz zastosowanego materiału półprzewodnikowego: krzemu, germanu lub selenu. Z siecią zasilającą sprzęgane są za pomocą falownika, który dopasowuje parametry energii pochodzącej z ogniwa do warunków sieciowych [2].

### 3. MODEL BADAWCZY

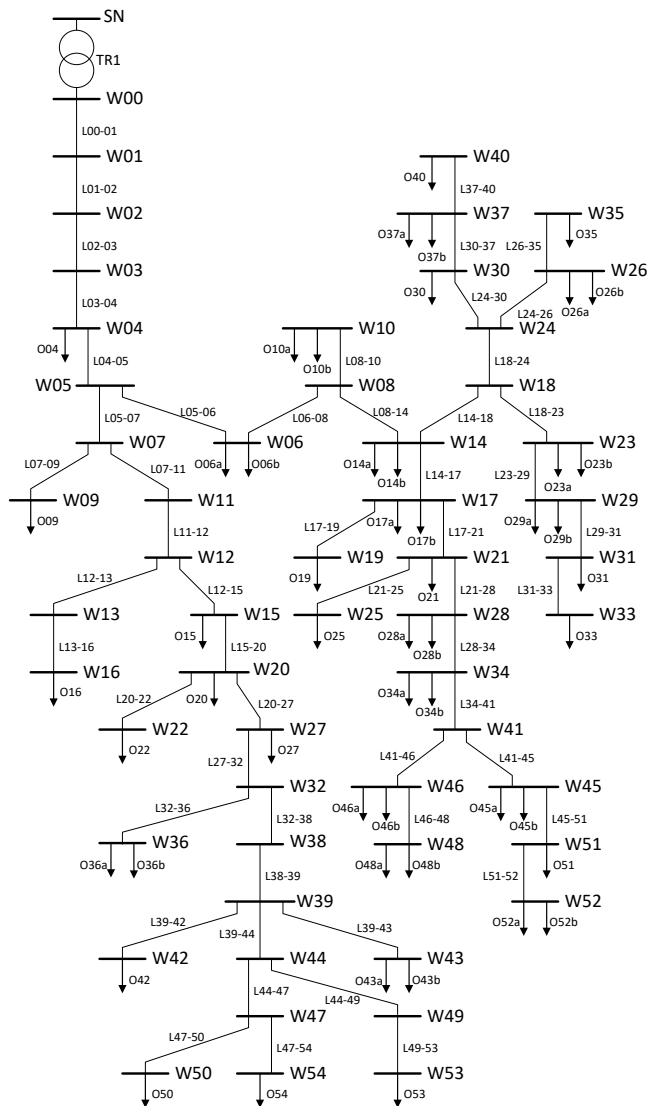
Badania przeprowadzono w oparciu o opracowany model sieci niskiego napięcia przy wykorzystaniu oprogramowania DiGSilent PowerFactory®. Do zamodelowania wytypowano większą sieć nn zlokalizowaną na terenie województwa pomorskiego. Jest to sieć napowietrzno-kablowa promieniowa z rozgałęzieniami zasilana z transformatora SN/nn o mocy 160 kVA, w skład której wchodzi 20 odcinków napowietrznych wykonanych za pomocą przewodów typu AsXS<sub>n</sub> o przekrojach 70, 35, 25 i 16 mm<sup>2</sup> oraz 33 odcinków kablowych wykonanych kablami YAKY o przekroju 120 mm<sup>2</sup> i jednego odcinka kablowego wykonanego kablem YAKXS również o przekroju 120 mm<sup>2</sup>. Do sieci przyłączeni są odbiorcy o mocach przyłączeniowych 10,5 (14 odbiorców); 12,5 (23 odbiorców) i 16,5 kVA (15 odbiorców). Sieć ta charakteryzuje się znaczną długością, ponieważ najdalej zlokalizowany względem stacji transformatorowej SN/nn odbiór znajduje się w odległości 713 metrów od niej. Strukturę zamodelowanej sieci przedstawiono na rysunku 1.

W modelowanej sieci sprawdzono kształtowanie się poziomów napięć w funkcji odległości węzła od stacji transformatorowej SN/nn zasilającej sieć dla kilku wariantów obciążenia i generacji. Spodziewane obciążenia w modelowanej sieci określono w oparciu o wartości mocy przyłączeniowych oraz na podstawie profili obciążenia dla roku 2017 zawartych w załączniku nr 5 do IRiESD [7]. Przyjęto, że na danym terenie przeważają odbiorcy charakteryzujący się profilami obciążenia typu A i B.

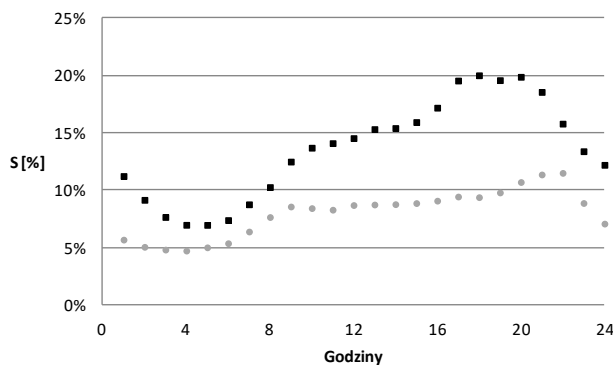
Na rysunku 2 zaprezentowano maksymalne i minimalne wartości obciążenia dla poszczególnych godzin doby wynikające z podanych profili obciążenia. Na ich podstawie przyjęto, że przy maksymalnym obciążeniu każdy z odbiorców pobiera z sieci równowartość 20% wartości swojej mocy przyłączeniowej, a dla obciążenia minimalnego 4,7%. Dla okresu najsilniejszego nasłonecznienia w czasie doby przyjęto jako największe obciążenie poziom 15,3%, a jako najmniejsze 8,3%.

W badaniach uwzględniono również różne poziomy generacji, a także rozpatrzono jako źródła energii oba wymienione wcześniej typy mikroźródeł. Należy tu zaznaczyć, że zarówno elektrownie wiatrowe, jak i ogniwa fotowoltaiczne charakteryzują się dużą zmiennością i tym samym pewną nieprzewidywalnością generacji.

W przypadku elektrowni wiatrowych związane to jest ze zmiennością warunków wietrznych. W jej wyniku maksymalna generacja, jak i jej całkowity brak, mogą wystąpić praktycznie w dowolnej porze doby. Przykładowe przebiegi zmienności generacji elektrowni wiatrowej można znaleźć w [10, 11].



Rys. 1. Struktura zamodelowanej sieci nn



Rys. 2. Wartości obciążenia w czasie doby przyjęte na podstawie profili obciążenia dla roku 2017:

■ maksymalne obciążenie, ● minimalne obciążenie

W przypadku ogniwa fotowoltaicznych mamy do czynienia z mniejszą nieprzewidywalnością generacji. W okresie nocnym występuje brak jakiegokolwiek generacji, natomiast największą moc można uzyskać w tych źródłach w czasie dnia w godzinach 11-13 [3, 10, 12, 13]. Jednakże o wartości generacji w ciągu dnia decydować będzie i tak pogoda, a przede wszystkim poziom nasłonecznienia.

Do przeprowadzenia badań przyjęto, że moc znamionowa rozpatrywanych źródeł pracujących w sieci nn będzie na poziomie 5 kW. Rozpatrzono dwa warianty

generacji OZE: tylko źródła wiatrowe oraz tylko ogniwa fotowoltaiczne. Dla analizy pracy źródeł wiatrowych przyjęto generację na poziomie 100% wartości mocy znamionowej oraz rozpatrywano stan maksymalnego i minimalnego obciążenia w sieci. Dla źródeł fotowoltaicznych uwzględniono również generację maksymalną oraz najmniejszą i największe spodziewane obciążenie w sieci dla przedziału czasowego doby, kiedy taki poziom generacji jest możliwy do uzyskania.

Węzły, w których zamodelowano źródła zestawiono w tabeli 1, w nawiasach podano liczbę mikroźródeł w węźle, jeżeli jest większa od 1. Jako wariant 1 przyjęto w miarę równomierne rozmieszczenie źródeł w sieci. W wariantach 2 i 3 źródła zostały skupione w odgałęzieniach sieci, w wariantach 2 w najdłuższym, w wariantach 3 w tym, gdzie skupionych jest najwięcej odbiorów. W wariantach 4 mikrogeneracja została skupiona przy odbiorach od strony transformatora zasilającego SN/nn.

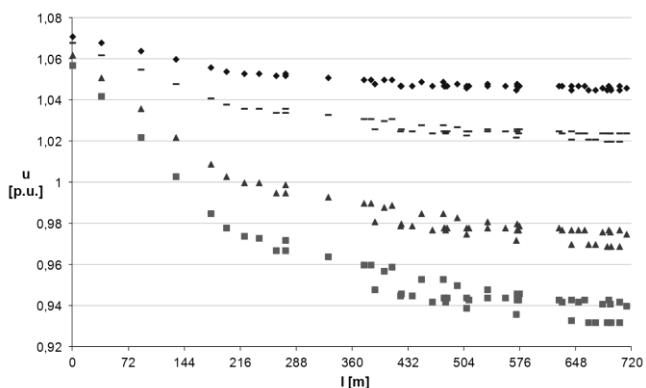
Tablica 1. Zestawienie węzłów, w których zamodelowano mikroźródła

Wariant	Węzły z mikroźródłami
1	W06, W14, W17, W23, W27, W30, W35, W40, W45, W50, W54
2	W20, W22, W27, W36(2), W42, W43(2), W50, W53, W54
3	W34(2), W45(2), W46(2), W48(2), W51, W52(2)
4	W04, W06(2), W09, W10(2), W14(2), W15, W16, W17

#### 4. WYNIKI BADAŃ

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania pozwalające określić poziomy napięcie w badanej sieci przy braku jakiegokolwiek generacji, natomiast dla różnych poziomów obciążenia. Badania te pozwoliły również na odpowiednie ustawienie napięć zasilających (przekładnia transformatora) tak, aby w sieci nie występowały przekroczenia dopuszczalnych poziomów napięcia. Stanowiło to punkt wyjściowy do kolejnych analiz.

Wyniki obrazujące rozkład napięć w sieci bez generacji zaprezentowano na rysunku 3.

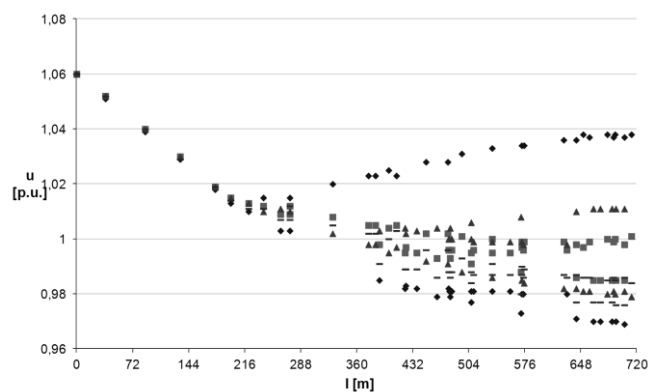


Rys. 3. Poziomy napięcie przy różnych wartościach obciążenia systemu: ■ maksymalne obciążenie sieci, ▲ największe obciążenie w godzinach 11 - 13, - najmniejsze obciążenie w godzinach 11 - 13, ◆ minimalne obciążenie sieci.

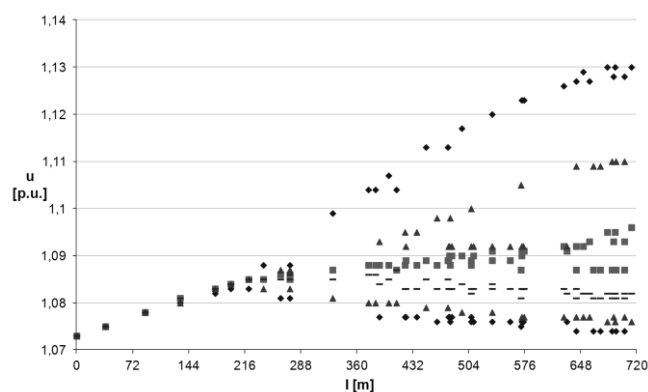
Dla analizowanej sieci wyznaczono znaczący zakres zmienności napięć. Dla maksymalnego obciążenia napięcia znajdują się w zakresie wartości 0,932 - 1,057 p.u., natomiast najniższy zakres napięć jest obserwowany dla najmniejszego

obciążenia: 1,045 - 1,071 p.u. Największe zmiany napięć dotyczą najbardziej położonych od transformatora zasilającego węzłów.

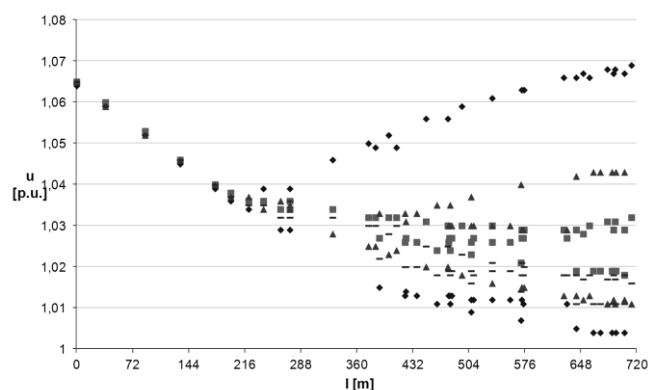
Następnie sprawdzono, jak na kształtowanie się poziomów napięć wpływać będzie lokalizacja mikroźródeł w sieci. Na kolejnych wykresach (rys. 4 - 7) zaprezentowano wyniki uzyskane dla zdefiniowanych wcześniej wariantów lokalizacji mikroźródeł w węzłach sieci.



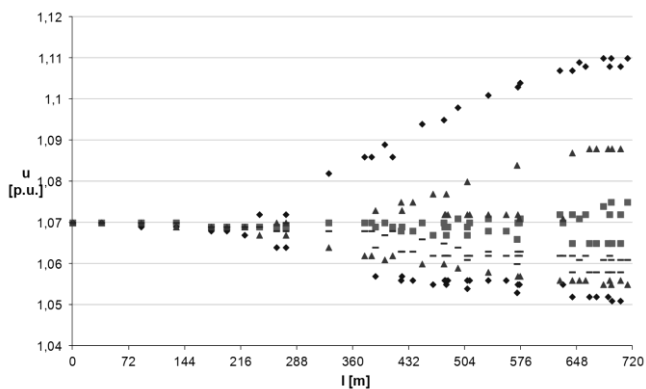
Rys. 4. Poziomy napięcie przy obciążeniu maksymalnym sieci i różnych wariantach rozmieszczenia generacji: ■ wariant 1, ◆ wariant 2, ▲ wariant 3, - wariant 4.



Rys. 5. Poziomy napięcie przy obciążeniu minimalnym sieci i różnych wariantach rozmieszczenia generacji: ■ wariant 1, ◆ wariant 2, ▲ wariant 3, - wariant 4.



Rys. 6. Poziomy napięcie przy największym obciążeniu sieci w godzinach 11 - 13 i różnych wariantach rozmieszczenia generacji: ■ wariant 1, ◆ wariant 2, ▲ wariant 3, - wariant 4.



Rys. 7. Poziomy napięć przy najmniejszym obciążeniu sieci w godzinach 11 - 13 i różnych wariantach rozmieszczenia generacji: ■ wariant 1, ◆ wariant 2, ▲ wariant 3, - wariant 4.

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że rozmieszczenie źródeł w sieci wpływa na kształtowanie się poziomów napięć w sieci. Tym samym ma też znaczenie z punktu widzenia występowania ich wartości skrajnych.

Szczególne uwagę przykuwają wyniki uzyskane dla wariantu 2 lokalizacji źródeł. Można zauważyć, że w gałęzi, w której jest skupiona generacja obserwowane są napięcia zdecydowanie wyższe, niż dla pozostałych odgałęzień. Taka lokalizacja źródeł dla analizowanego układu mogłaby być najbardziej niebezpieczna, ponieważ przy małym obciążeniu sieci obserwowane są w węzłach z generacją napięcia przekraczające najwyższe dopuszczalne wartości dla tej sieci.

Podobne obserwacje możemy poczynić w odniesieniu do wariantu 3 lokalizacji. W tym przypadku również cała generacja została skupiona w jednym z odgałęzień sieci, tym w którym równocześnie występuje największa liczba odbiorów, co wpłynęło na zmniejszenie skali zjawiska.

W przypadku braku generacji w sieci napięcia w jej węzłach mieszczą się w przedziale 0,932 – 1,071 p.u. w całym cyklu zmienności obciążenia w sieci. Dla kolejnych wariantów lokalizacji generacji ten przedział uzależniony jest nie tylko od obciążenia, ale także zmienności generacji. Ponieważ generacja wpływa na podnoszenie się wartości napięć, to zmianie ulegać będzie tylko górny zakres tego przedziału, osiągając największe wartości dla maksimum generacji przy równocześnie najmniejszym obciążeniu. I tak ten górny pułap wyniesie dla wariantu lokalizacji odpowiednio: 1 – 1,096 p.u., 2 – 1,13 p.u., 3 – 1,11 p.u. i 4 – 1,087 p.u.

Jak należało oczekiwać, najwyższe wartości napięć w węzłach wystąpiły dla najmniejszego obciążenia sieci. Największy zakres zmienności napięć występuje w przypadku, gdy mamy do czynienia z elektrowniami wiatrowymi, co wynika głównie z pór, dla których możliwa jest korelacja pomiędzy największą generacją, a najmniejszym obciążeniem sieci.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Rozmieszczenie generacji w sieci nn ma wpływ na poziomy napięć, jaki w takiej sieci można obserwować w czasie jej pracy. Skupienie źródeł w jednej gałęzi może skutkować tym, że właśnie w tym miejscu sieci pojawiają się problemy ze zbyt wysokimi wartościami napięć. Co istotne, jak wykazały przeprowadzone badania, inne rozmieszczenie takiej samej liczby źródeł o takich samych mocach nie musi dać takiego efektu.

W najmniejszym stopniu napięcia były podnoszone w układzie, w którym generacja była skupiona blisko transformatora SN/nn, a w największym w tym układzie, gdzie w całości została skupiona w jednym odgałęzieniu sieci, w dodatku stanowiącym jedno z jej zakończeń.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Przygrocki M.: Generacja rozproszona jako aktywny uczestnik zarządzania pracą KSE, *Logistyka* nr 3, 2015.
2. Parola M. i inni: *Mikrosieci niskiego napięcia*, Warszawa 2013.
3. Horyń M.: *Zautomatyzowane systemy budynkowe w energetyce prosumenckiej*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 92 nr 6/2016.
4. *Dziennik Ustaw* 2017 poz. 220 z dnia 6.02.2017r.
5. *Dziennik Ustaw* 2015 poz. 478 z dnia 3.04.2015r.
6. *Dziennik Ustaw* 2007 nr 93, poz. 623 z dnia 29.05.2007r.
7. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, ENERGA Operator SA, z dnia 01 stycznia 2014 r.
8. Nalepa K., Miąskowski W., Pietkiewicz P., Piechocki J., Bogacz P.: *Poradnik małej energetyki wiatrowej*, Olsztyn 2011.
9. Wasiaś I., Pawełek R.: *Jakość zasilania w sieciach z generacją rozproszoną*, Warszawa 2015.
10. Hyrzyński R., Karcz M., Lemański M., Lewandowski K., Nojek S.: Complementarity of Wind and Photovoltaic Power Generation in Conditions Similar to Polish, *Acta Energetica* 4/17 (2013).
11. Mazur M., Partyka J., Marcewicz T.: Analiza zastosowania hybrydowego systemu zasilania odnawialnej energetyki wiatrowej i fotowoltaicznej w budynkach mieszkalnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 92 nr 8/2016.
12. Sobierajski M., Rojewski W.: Analysis of Energy and Power Generation in a Photovoltaic Micro installation Interconnected with a Low Voltage Grid, *Acta Energetica* 4/25 (2015).
13. Dąbrowski J., Krac E., Górecki K.: Analysis of long-time efficiency of photovoltaic installation, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 93 nr 2/2017

## CHANGES IN VOLTAGE LEVELS IN THE LOW VOLTAGE POWER NETWORK WITH DISTRIBUTED GENERATION

Distributed generation in the low voltage power network can cause voltage problems. In the article presents the impact of distributed generation on the voltage levels in the low voltage power network. Different points of connection sources were considered. The analysis for the real low voltage power network of considerable length was conducted. The power network supplies mainly residential buildings located in rural areas.

**Keywords:** microgeneration, renewable energy sources, voltage levels, low-voltage power net