

Mateusz MICHALSKI*

ODTWARZANIE ZMIENNOŚCI NAPIĘCIA W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH Z ZASTOSOWANIEM WSKAŹNIKÓW WAHAŃ NAPIĘCIA

W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań nad możliwością odtwarzania zmienności napięcia w sieci elektroenergetycznej na podstawie zarejestrowanych wartości wskaźników zmienności. Jest to zagadnienie złożone ponieważ zmiany napięcia występujące w rzeczywistych sieciach mają charakter losowy. Zaproponowano trzy algorytmy odtwarzania i zweryfikowano jakość ich działania za pomocą otrzymywanych wartości wskaźnika krótkookresowego migotania światła. Opis algorytmów i analizę wyników poprzedza wprowadzenie, przybliżające wybrane wskaźniki zmienności napięcia.

SŁOWA KLUCZOWE: jakość energii elektrycznej, wahania napięcia, wskaźnik P_{st}

1. WSTĘP

Jakość napięcia w sieciach elektroenergetycznych jest weryfikowana za pomocą szeregu wskaźników. Ich wartości mają znaczenie nie tylko informacyjne, ale ujęte są w uregulowaniach prawnych i normatywnych wyznaczających dopuszczalne parametry napięcia. Jedną z najważniejszych grup takich miar stanowią te odnoszące się do zmienności napięcia. Taka zmienność dzielona jest na dwie grupy: szybkie i wolne. Szybkie zmiany napięcia to takie, dla których zmiana wartości skutecznej w czasie jest większa od wartości granicznej (np. 1% wartości znamionowej U_c napięcia na sekundę). Zmiany napięcia nie spełniające tego warunku zaliczane są do wolnych. Szybkie zmiany napięcia, występujące w postaci serii zmian napięcia lub ciągłych zmian wartości skutecznej lub szczytowej napięcia [1], nazywane są wahaniami napięcia. Najprostszą miarą zmienności są maksymalne i minimalne wartości skuteczne napięcia (w przypadku układów trójfazowych zarówno napięć fazowych jak i przewodowych) rejestrowane w następujących po sobie równych okresach. Inną miarą odnoszącą się bezpośrednio do wartości skutecznej napięcia są wskaźniki wahań napięcia [2]. Wskaźniki te przyjmują postać zbioru wartości, w skład którego wchodzi: amplituda δU i częstości f_{xy} wahań, również rejestrowane co pewien ustalony okres dyskrymi-

* Politechnika Poznańska.

nacji. Stosowane są także miary pośrednio odnoszące się do wartości skutecznej, szacujące raczej potencjalne skutki występowania wahań napięcia. Ponieważ najczęstszym efektem występowania wahań jest migotanie światła wytwarzanego przez źródła zasilane takim napięciem, stosuje się wskaźniki szacujące uciążliwość migotania światła (z ang. *flicker*). Najpopularniejszymi są tu wskaźnik krótkookresowego migotania światła, P_{st} [3, 4], (stosowany powszechnie w Europie) i wskaźnik ΔV_{10} [5] (stosowany w Japonii i niektórych krajach Azji). Do pomiaru wskaźnika P_{st} wykorzystuje się mierniki migotania światła potocznie zwane flickermetrami, których działanie opisuje norma IEC 61000-4-15 [4].

W niniejszym artykule skupiono się nad zagadnieniem możliwości odtworzenia zmienności napięcia w sieci elektroenergetycznej na podstawie zarejestrowanych wartości wskaźników zmienności. Jest to zagadnienie złożone ponieważ zmiany napięcia występujące w rzeczywistych sieciach mają charakter losowy, zarówno co do czasu ich występowania, częstotliwości powtórzeń, jak i amplitudy. Przyjęto więc założenie, że zmienność napięcia jest wynikiem modulacji amplitudy sygnału harmonicznego prostokątnym sygnałem modulujący. Dla tak określonej zmienności napięcia, za pomocą samodzielnie opracowanych narzędzi numerycznych, wyznaczono wartości wskaźników wahań (wykorzystane później jako dane wejściowe w procesach odtwarzania) oraz wartości wskaźnika P_{st} (traktowane jako wartości poprawne). Aby ocenić jakość odtworzenia zmienności napięcia, uzyskany w procesie odtwarzania przebieg czasowy napięcia podano na wejście flickermetru, a wynik tego działania porównano z poprawnymi wartościami wskaźnika P_{st} .

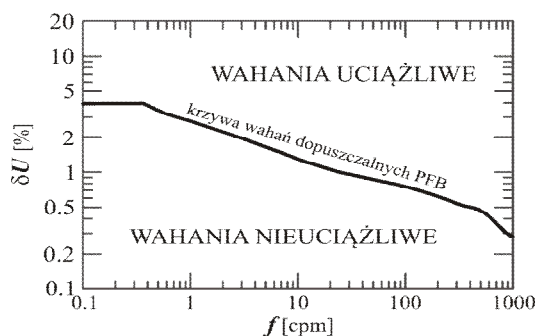
Układ pracy jest następujący: rozdział drugi poświęcony zostanie opisowi wskaźników wahań napięcia; rozdział trzeci zawierał będzie informacje przybliżające sposób działania flickermetru; rozdział czwarty omówienie zastosowanych algorytmów odtwarzania napięcia; w rozdziale piątym przedstawione zostaną przykładowe wyniki pozwalające na ocenę jakości odtworzenia zmienności napięcia; w rozdziale szóstym zawarte zostaną wnioski i przedstawione plany dalszych badań.

2. WSKAŹNIKI WAHAŃ NAPIĘCIA

Wskaźniki wahań napięcia to miara opisująca zmiany napięcia δV w ujęciu statystycznym, dająca informację o amplitudzie, δU , i częstotliwości wahań, f , zarejestrowanych w określonym przedziale czasu. Podstawą do wyznaczenia wartości tych wskaźników jest dyskryminacja zmian wartości skutecznej napięcia δV . Amplituda wahań δU to zwykle największa, lub druga co do wartości, zmiana δV zarejestrowana w danym okresie dyskryminacji T_w . Częstość wahań f to w najprostszym przypadku liczba zmian δV wartości skutecznej przypadająca na jednostkę czasu, zazwyczaj na minutę. Dlatego jednostką częstości f jest

jedna zmiana δV na minutę – 1 cpm (ang. *changes per minute*). Alternatywnie, częstość wahań f wyrażana jest jako częstotliwość sygnału modulującego f_m , przy czym zachodzi następujący związek: $f[\text{cpm}] = 120 [\text{cpm/Hz}] \cdot f_m [\text{Hz}]$. Dla zwiększenia możliwości diagnostycznych częstość wahań bywa przedstawiana za pomocą zbioru wartości, wyrażających częstości wystąpień wahań o amplitudach będących wybranymi podzakresami wartości δU . Zwiększanie liczby podzakresów prowadzi z jednej strony do zwiększenia możliwości diagnostycznych, z drugiej jednak zwiększa strumień danych konieczny do zapamiętania i odczytania z urządzenia pomiarowego. Producenci zazwyczaj przyjmują pewien kompromis, ograniczając liczbę podzakresów do kilku. W przykładowej implementacji [6] wykorzystano 7 podzakresów, w wyniku czego w każdym okresie rejestracji zachowywany jest zbiór składający się z ośmiu wielkości: amplitudy δU i częstości w zakresach $\langle 1,0; 0,9 \rangle \delta U$, $\langle 0,9; 0,8 \rangle \delta U$, $\langle 0,8; 0,7 \rangle \delta U$, $\langle 0,7; 0,6 \rangle \delta U$, $\langle 0,6; 0,5 \rangle \delta U$, $\langle 0,5; 0,4 \rangle \delta U$ oraz $\langle 0,4; 0,0 \rangle \delta U$ (oznaczonych dalej jako $f_{109}, f_{98}, f_{87}, f_{76}, f_{65}, f_{54}$ i f_{40}).

Dużą zaletą wskaźników wahań jest możliwość ich bezpośredniego wykorzystania do oszacowania uciążliwości wahań. W tym celu wykorzystuje się charakterystyki częstościowo-amplitudowe $\delta U = f(f)$. Po naniesieniu na współrzędne $(f, \delta U)$ punktów pomiarowych sprawdza się ich położenie w odniesieniu do tzw. krzywych wahań dopuszczalnych, PFB (z ang. *Permissible Fluctuation Borderlines*). Położenie punktu powyżej krzywej PFB świadczy o wystąpieniu uciążliwych wahań napięcia. Krzywe PFB wyznacza się dla różnych rodzajów źródeł światła, co znacząco rozszerza zakres stosowalności tej miary. Przykładową charakterystykę częstościowo-amplitudową $\delta U = f(f)$ pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowa charakterystyka częstościowo-amplitudowa $\delta U = f(f)$ z naniesioną krzywą wahań dopuszczalnych PFB

Wskaźniki wahań napięcia, właściwie zastosowane [6], pozwalają na określenie parametrów zmian odbiorników energii wprowadzających zakłócenia do sieci, co umożliwia ich lokalizację, oraz wyeliminowanie lub ograniczenie ich wpływu poprzez zmianę warunków ich pracy.

3. WSKAŹNIK KRÓTKOOKRESOWEGO MIGOTANIA ŚWIATŁA

Jak wspomniano, wartość wskaźnika P_{st} stanowi oszacowanie uciążliwości migotania światła wywołanego wahaniami napięcia. Normatywne oszacowanie wskaźnika zakłada, że źródłem światła jest żarówka inkadescencyjna o mocy 60 W [4]. Do pomiaru tego wskaźnika stosowane są mierniki nazywane flickermetrami, budowane na podstawie normatywnej specyfikacji mającej odzwierciedlać procesy zachodzące na drodze źródło światła – oko – mózg obserwatora migotania światła. Wartości parametrów flickermetru dobierane są oddzielnie dla częstotliwości znamionowej 50 lub 60 Hz oraz dla poszczególnych napięć znamionowych U_c (120 V, 230 V, 220 V). Charakterystyki filtrów wchodzących w skład flickermetru określone zostały na podstawie badań testowych reprezentatywnej grupy osób, w trakcie których wartością progową było odczuwanie wahań przez 50% badanych dla każdej analizowanej częstotliwości wahań. Wynik pomiaru wskaźnika P_{st} zależy w ogólności od kształtu sygnału modulującego, głębokości i częstotliwości modulacji, a dla wybranych częstotliwości także od fazy początkowej sygnału modulującego. W każdym okresie rejestracji wynikiem pomiaru wskaźnika P_{st} będzie pewna nieujemna liczba, wyrażająca stopień uciążliwości wahań. Brak wahań reprezentowany jest przez wartość bliską zeru ($P_{st} \cong 0,01$). Większe wartości wskaźnika świadczą o większej uciążliwości wahań. Norma EN 50160 określa dwie dopuszczalne wartości wskaźnika P_{st} w zależności od wartości napięcia znamionowego U_c sieci: dla U_c w granicach $\langle 0,23-35 \rangle$ kV wynosi ona 1,2; a dla $U_c > 35$ kV wartość progowa równa się 1,0 [2].

Mimo powszechnego stosowania tego wskaźnika, jego główną wadą jest odniesienie jego normatywnej struktury tylko do jednego określonego rodzaju źródła światła. Może to prowadzić do nieprawidłowości w określaniu uciążliwości wahań dla innych źródeł. Dodatkowo możliwości diagnostycznego wykorzystania wartości wskaźnika P_{st} są bardzo ograniczone, ponieważ wszystkie zjawiska występujące w sieci wyrażane są w postaci pojedynczej wartości rejestrowanej z okresem 10 minut.

4. ALGORYTMY ODTWARZANIA ZMIENNOŚCI NAPIĘCIA

Jak wspomniano wcześniej, podstawą do prób odtworzenia zmienności napięcia w sieci będą zarejestrowane wartości wskaźników wahań napięcia. O ile na ich podstawie można bezpośrednio stwierdzić jaka była liczność zmian wartości skutecznej w okresie rejestracji, o tyle nie dają jednoznacznej informacji co do amplitudy tych zmian. Wartość δU informuje tylko o amplitudzie maksymalnej zmiany (w niektórych implementacjach [6] – drugiej co do wielkości)

– nie można jednak wnioskować o faktycznej liczbie zmian o takiej amplitudzie. Jeżeli wskaźniki rejestrowane są w postaci zbioru licznosci wahań w różnych przedziałach amplitudy δU , to pozyskuje się pełniejszą informację diagnostyczną. Jednak i w takim przypadku wiemy tylko, że wystąpiły zmiany napięcia δV w danych przedziałach amplitudy δU .

Na podstawie wskaźników wahań nie ma także możliwości stwierdzenia jaka była obwiednia napięcia w sieci, a co za tym idzie nie sposób wywnioskować w jaki sposób napięcie znamionowe było modulowane. Z drugiej strony, ze sposobu pozyskiwania wskaźników wynika, że tylko dostatecznie szybka zmiana wartości skutecznej zostanie zakwalifikowana jako wahanie napięcia. Pomiar napięć rzeczywiście występujących w sieciach energetycznych wskazują, że główną przyczyną występowania wahań są nagłe zmiany stanu odbiorników, takie jak wyłączenia czy załączenia. Szczególnymi przypadkami są przebiegi rejestrowane podczas pracy tzw. „niespokojnych” odbiorników takich jak piece łukowe lub spawarki.

Wartości wskaźników wahań dostarczają bezpośrednio informacji o liczbie zmian napięcia w okresie rejestracji, jednak, podobnie jak w przypadku amplitudy, nie informują precyzyjnie o momencie wystąpienia poszczególnych wahań.

Biorąc powyższe pod uwagę zaproponowano trzy algorytmy odtwarzania napięcia. We wszystkich założono, że napięcie odtwarzane będzie za pomocą skokowych zmian wartości skutecznej napięcia (co można interpretować jako wynik modulacji amplitudy przebiegiem prostokątnym). Dane wejściowe, czyli zbiór ośmiu wielkości: amplitudę δU i częstotliwości $f_{109}, f_{98}, f_{87}, f_{76}, f_{65}, f_{54}$ i f_{40} , pozyskano dla okresów rejestracji $T_w = 5$ min. Przyjęto, że wahania o częstotliwościach od f_{109} do f_{54} będą miały przypisaną amplitudę równą górnej granicy przedziału wartości δU , do której zostały zaliczone. Wahania z przedziału $(0,4; 0,0)\delta U$, jako zwykle najliczniejsze (do tego przedziału zaliczane są bowiem także zakłócenia i szumy), przyjęto amplitudę równą średniej wartości z tego przedziału, a więc $0,2 \cdot \delta U$. We wszystkich algorytmach wahania wprowadzane są naprzemiennie pod względem amplitudy: najpierw wprowadzane są wszystkie wahania wyrażone częstotliwością f_{40} , po ich wyczerpaniu te należące do przedziału częstotliwości f_{109} , później w kolejności f_{54}, f_{98}, f_{65} i f_{76} . Różnice występują jednak w sposobie uwzględniania tych wahań i chwilach ich wprowadzania:

A1) Założono, że wartość skuteczna powinna oscylować wokół wartości znamionowej napięcia. Dlatego kolejne zmiany napięcia wprowadzane są tak, aby wynikowa wartość skuteczna napięcia zmodulowanego zmieniała się w kierunku wartości znamionowej – jeżeli jest większa od znamionowej, to kolejna zmiana zostanie wprowadzona ze znakiem ujemnym; jeżeli aktualna wartość skuteczna jest mniejsza od znamionowej, to kolejna zmiana zostanie wprowadzona ze znakiem dodatnim. Przyjęto, że zmiany wartości napięcia będą wprowadzane równomiernie w całym przedziale

rejestracji – niezależnie od amplitudy kolejne zmiany napięcia dodawane są w równych odstępach w czasie, a wartość tego kroku wynika z podzielenia liczby sekund w przedziale rejestracji przez sumaryczną liczbę wszystkich wahań wykrytych w danym przedziale rejestracji.

- A2) Założono, że zmiany napięcia wprowadzane będą naprzemiennie z różnym znakiem, bez względu na wynikową wartość skuteczną napięcia zmodulowanego. Identycznie jak w algorytmie A1 przyjęto, że zmiany wartości napięcia będą wprowadzane równomiernie w całym przedziale rejestracji.
- A3) Podobnie jak w algorytmie A1 przyjęto, że wartość skuteczna powinna oscylować wokół wartości znamionowej. W odróżnieniu od algorytmów A1 i A2, zdecydowano wprowadzać zmiany tak, by wszystkie wahania dla danego okresu rejestracji, niezależnie od ich liczby, odtworzone były w czasie 120 sekund.

5. PRZYKŁADOWE WYNIKI ODTWARZANIA ZMIENNOŚCI NAPIĘĆ

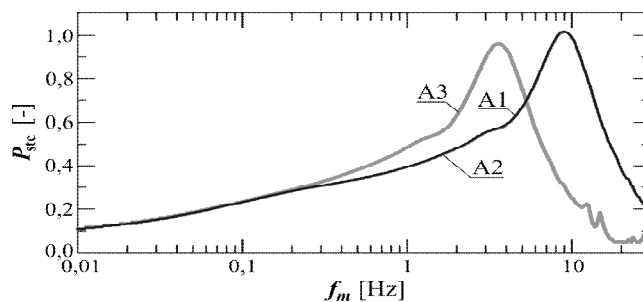
Do badania działania algorytmów odtwarzania zmienności napięć zastosowano deterministyczne sygnały, odwzorowujące wahania napięcia wywołane modulacją amplitudy przebiegiem prostokątnym o częstotliwości f_m o wybranych wartościach z przedziału od 0,01 Hz do 30 Hz (co odpowiada częstości od 1,2 cpm do 3600 cpm) – łącznie 347 wartości. Dla tak wygenerowanych sygnałów wyznaczono wartości wskaźników wahań napięcia, δU i f_{xy} , oraz, równoległe, poprawne wartości wskaźnika P_{st} . Wyznaczone wartości wskaźników wahań napięcia użyto jako dane wejściowe badanych algorytmów. Z kolei wartości poprawne wartości wskaźnika P_{st} wykorzystano do porównań z wynikami działania algorytmów odtwarzania zmienności napięć.

Pierwszym z tak przygotowanych przebiegów była modulacja amplitudy przebiegiem prostokątnym o stałej wartości głębokości modulacji, $(\Delta U/U) = \text{const}$. Drugim sygnał modulujący amplitudę ze zmienną głębokością modulacji dobieraną tak, by wynikowa wartość wskaźnika P_{st} wynosiła 1 dla każdej częstotliwości. W trzecim przypadku sygnał dobrano tak, by wartość wskaźnika P_{st} wynosiła 3, a w czwartym 10.

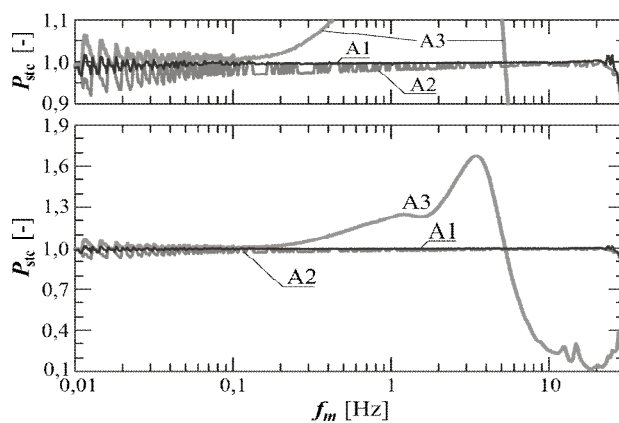
Dla napięć odtworzonych na podstawie wskaźników wahań z wykorzystaniem algorytmów opisanych w poprzednim rozdziale wyznaczono wartości wskaźnika P_{st} (oznaczone symbolem P_{stc}). Zależności $P_{stc} = f(f_m)$ przedstawiono na rysunkach 2–5.

Analizując wykresy z rys. 2–5 łatwo zauważyć, że jakość odtworzenia zmienności napięcia jest najlepsza dla algorytmu A1, a najgorsza dla A3. Uzyskane wartości w przypadku algorytmu A1 zbliżone są do oczekiwanych, a

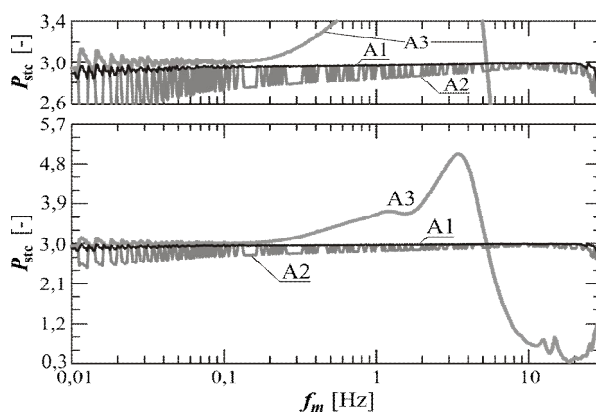
większe odstępstwa występują tylko dla najmniejszych i największych częstotliwości modulacji.



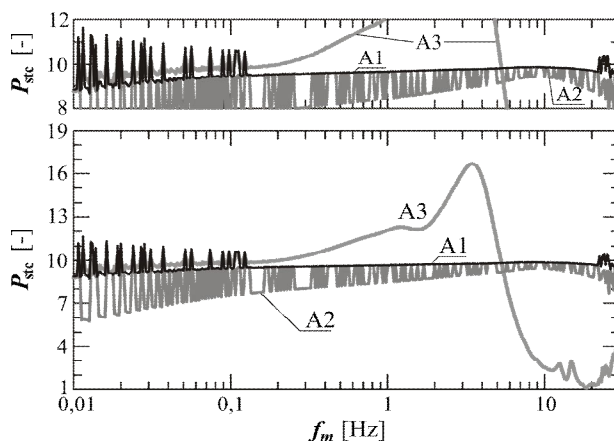
Rys. 2. Charakterystyki $P_{stc} = f(f_m)$ dla $(\Delta U/U) = 0,281\%$



Rys. 3. Charakterystyki $P_{stc} = f(f_m)$ dla $P_{st} = 1$



Rys. 4. Charakterystyki $P_{stc} = f(f_m)$ dla $P_{st} = 3$



Rys. 5. Charakterystyki $P_{stc} = f(f_m)$ dla $P_{st} = 10$

Dla testu ze stałą głębokością modulacji wykresy (rys. 2) odpowiadające algorytmom A1 i A2 praktycznie się pokrywają i prawidłowo wykazują największą wartość wskaźnika P_{stc} , wynoszącą około 1, dla częstotliwości 8,8 Hz (zgodnie z europejskimi badaniami, jest to częstotliwość odpowiadająca maksymalnej wrażliwości człowieka na migotanie oświetlenia). W przypadku algorytmu A3 uzyskano tylko podobny kształt wykresu, ale z zupełnie inną częstotliwością odpowiadającą maksymalnej wartości wskaźnika P_{stc} i większymi odkształceniami.

Szczególnie istotne są wyniki testu z napięciem referencyjnym typu drugiego (oraz dla częstotliwości w okolicy wartości 8,8 Hz dla sygnału typu pierwszego), ponieważ wartość $P_{st} = 1$ jest wartością graniczną rozdzielającą umownie wahania akceptowalne od uciążliwych. Błąd względny dla tych warunków w przypadku algorytmu A1 nie przekracza 3,4%, co uznać można za wynik satysfakcjonujący. Algorytm A2 prowadził do większych błędów – 8,2% (szczególnie dla mniejszych częstotliwości). Wynik otrzymany dla algorytmu A3 jest całkowicie nieakceptowalny. Odstępstwa od wartości poprawnej zwiększają się wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału modulującego, co może świadczyć, że przyjęty w tym algorytmie niezmienny czas wprowadzania wszystkich zmian był albo błędnym założeniem albo źle dobrany (zbyt krótkim).

W przypadku sygnałów referencyjnych prowadzących do większych wartości wskaźnika P_{stc} (3 i 10) wartości błędów w uzyskanych wynikach wyraźnie się zwiększają. Ciekawą cechą algorytmów A1 i A2 można zauważyć szczególnie wyraźnie na rysunku 5, prezentującym wyniki dla $P_{st} = 10$. W przypadku algorytmu A2 występuje tendencja do uzyskiwania zakłóconych wartości wyraźnie niższych od poprawnej, a w przypadku A1 wyraźnie wyższych.

6. PODSUMOWANIE

Przedstawione przykłady odtwarzania zmienności napięcia, zweryfikowane uzyskiwaną wartością wskaźnika P_{stc} , wskazują, że generalnie konwersja wartości wskaźników wahań do krótkookresowego wskaźnika wahań światła jest możliwa. Uzyskane wyniki nie odpowiadają dokładnie wartościom poprawnym, jednak ogólnie można stwierdzić, że jakość odwzorowań dla algorytmów A1 i A2 jest dobra. Przy uwzględnieniu faktu, że wskaźniki wahań napięcia stanowią stratną reprezentację faktycznie występujących wahań w sieci, taki rezultat należy uznać za satysfakcjonujący.

Zaprezentowane wyniki wskazują, iż wybór algorytmu odtwarzania wpływa znacząco na różnice w uzyskiwanych wynikach. Wydaje się, że głównym czynnikiem prowadzącym do różnic w wynikach jest sposób rozkładu wahań w przedziale czasu równym okresowi rejestracji. Lepsze wyniki uzyskano dla rozkładu równomiernego, choć wydaje się celowe sprawdzenie jakości odtwarzania przy innych rozkładach punktów wprowadzania wahań w czasie.

Najlepsze wyniki uzyskano dla algorytmu A1. Nie należy jednak wyciągać z tego wniosku o jego ogólnej niezawodności, pamiętając, że przedstawione wyniki są tylko przykładowe i na pewno nie wyczerpują wszystkich zjawisk mogących potencjalnie wystąpić w sieciach elektroenergetycznych. Stanowią one raczej tylko dobry punkt wyjścia do dalszych testów i badań przy poszukiwaniu optymalnego algorytmu odwzorowywania napięcia, który będzie prowadził do poprawnych wyników niezależnie od typu sygnału modulującego.

Takie prace planowane są w najbliższej przyszłości. Wydaje się, że poprawę jakości odwzorowania napięcia modulującego przyniesie uwzględnienie w algorytmach wartości również innych wskaźników, takich jak zarejestrowane maksymalne i minimalne wartości skuteczne napięcia.

LITERATURA

- [1] Electropedia, 161–08–05, Voltage fluctuation, <http://www.electropedia.org/>, 25.11.2016.
- [2] Owen E.L., Power Disturbance And Power Quality – Light Flicker Voltage Requirments, Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver, pp. 2303–2309, 1994.
- [3] PN–EN 50160, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, 2010.
- [4] PN–EN 61000–4–15, Metody badań i pomiarów, Miernik migotania światła, Specyfikacja funkcjonalne i projektowa, 2015.
- [5] M. Aoki, Standard method for measurement of voltage fluctuations, Proc. of 9th Int. Congress UIE, Cannes, France, 1980, pp. 3–12.

- [6] Wiczyński G., Analysis of voltage fluctuations in power networks, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Volume 57, Number 11, pp. 2655–2664, ISSN 0018–9456, 2008.

REGENERATION OF POWER GRIDS' VOLTAGE VARIATION WITH VOLTAGE FLUCTUATION INDICES

The paper presents result of preliminary research on possibility to recreate a variation of voltage in power grid on the basis of registered values of indicators for the variation. This is a complex issue because the voltage changes that occur in real networks are random. Three algorithms have been proposed and their quality has been verified using the obtained values of short-term flicker index. Description of the algorithms and results analysis has been preceded by the introduction that aims at short description of selected voltage variation indices.

(Received: 09. 02. 2017, revised: 20. 02. 2017)