

Wpływ zaburzeń parametrów łuku na stopień odkształcenia sygnałów w obwodzie elektrycznym

Streszczenie. Opisano czynniki wpływające na odkształcenia przebiegów na wejściach wybranych odbiorników energii elektrycznej oraz wskazano na ich skutki eksploatacyjne. Ocenę ilościową tych efektów wyrażono za pomocą współczynników zawartości harmonicznych. Dokonano tego symulacyjnie bez uwzględniania zaburzeń, z zaburzeniami deterministycznymi oraz z zaburzeniami losowymi. Jako obciążenie nieliniowe wybrano łuk elektryczny opisany modelem hybrydowym Mayra-Cassiego. Zamieszczono charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne oraz obliczono wartości wielkości elektrycznych z wykorzystaniem współczynników THD.

Abstract. The factors influencing waveform distortions at the inputs of selected electric energy receivers were described and their operational effects were indicated. The quantification of these effects was expressed using harmonic content factors. This was done by simulation without taking into account disturbances, with deterministic disturbances and with random disturbances. The electric arc described by the Mayr-Cassie hybrid model was selected as the non-linear load. The dynamic voltage-current characteristics have been included and the values of electrical quantities have been calculated using the THD coefficients. (Influence of disturbances of arc parameters on the degree of deformation of signals in an electric circuit).

Słowa kluczowe: łuk elektryczny, model hybrydowy, współczynniki zawartości harmonicznych.

Keywords: electric arc, hybrid model, harmonic content factors.

Wstęp

Duże zniekształcenia przebiegów na wejściu wybranych odbiorników energii elektrycznej mogą wynikać z:

- nieliniowości charakterystyk elementów układu elektrycznego,
- działania dodatkowych źródeł energii wprowadzających przebiegi odkształcone do układu;
- dużej impedancji źródła zasilającego;
- odkształceń przebiegów sygnałów pomiarowych.

Źródłami nieliniowości charakterystyk układów mogą być elementy nieliniowe czynne lub bierne. Efekty ich działania zależą od częstotliwości źródła wymuszającego oraz od struktury i parametrów układu odbiornika, czyli występowania warunków rezonansu, w tym także stopnia jego tłumienia.

Wszystkie składowe harmoniczne są umownie dzielone według następujących kryteriów [1]:

- na podstawie drogi rozchodzenia się - na przestrzenne lub konduktancyjne,
- na podstawie prognozowanego czasu powstawania - na losowe lub systematyczne,
- na podstawie długotrwałości - na krótko czasowe (impulsowe) lub długotrwałe.

Powszechne stosowanie układów energoelektronicznych, zwłaszcza przekształtników dużej mocy, zwiększyło w sieciach emisję harmonicznych i interharmonicznych o szerokim zakresie częstotliwości. W sieciach o częstotliwości 50 Hz za harmoniczne niskiej częstotliwości uznaje się zakres od 0 do 2 kHz. Do harmonicznych wysokich częstotliwości zalicza się składowe od 2kHz do 150 kHz. Zniekształcenia niskiej częstotliwości mają tendencję do rozprzestrzeniania się w sieci zasilającej. Natomiast zniekształcenia wysokiej częstotliwości krążą głównie w obiekcie.

Skutkami występowania harmonicznych i interharmonicznych, zarówno o niskich, jak i wysokich częstotliwościach, są takie niepożądane efekty, jak [2]:

- nagrzewanie towarzyszące pracy urządzeń generujących zniekształcenia i jednocześnie nagrzewania równoległe pracującego wyposażenia, co wywołuje dodatkowe straty energii i szybsze ich starzenie,

- falszywe zadziałania automatyki w sieciach rozdzielczych prowadzące do wyłączenia urządzeń lub do zmiany ich reżimów pracy;
- wywoływanie asymetrii w sieciach trójfazowych na skutek pojawienia się harmonicznych nawet w jednej fazie;
- wpływ zakłóceń na sąsiednie kable sygnalizacyjne i łączności;
- migotanie oświetlenia;
- potrzeba zwiększenia przekrojów przewodów zerowych w związku z sumowaniem się trzecich harmonicznych w sieciach trójfazowych.

Jednym z najważniejszych wskaźników pomiarowych służących do określania jakości energii elektrycznej jest całkowite zniekształcenie harmoniczne THD (Total Harmonic Distortion) [3]. Oprócz tego stosuje się zestaw limitów ustalonych w stosunku do poszczególnych harmonicznych napięcia lub prądu.

Limity harmonicznych napięcia (normy międzynarodowe, to amerykańska IEEE 519, IEC 61000-2-2, IEC 61000-2-12 oraz norma europejska EN 50160) zależą od wielkości sieci. Dla małych obciążeń i niskich napięć nie są one bardzo restrykcyjne.

Limity harmonicznych prądu dotyczą odbiorców pracujących z dużymi obciążeniami i wysokimi napięciami. Są one bardziej restrykcyjne w porównaniu z małymi obciążeniami. W stosunku do wytwórców stosuje się surowsze wymagania jakościowe niż w stosunku do odbiorców energii elektrycznej. Wymagania w stosunku do ciągłych zniekształceń są bardziej ostre niż w stosunku do zdarzeń krótkotrwałych [2].

Obie normy IEC, podobnie jak IEEE 519 i EN 50160 ustalają w sieciach nN i SN limit całkowitych harmonicznych napięcia na poziomie 8%, a także określają limity dla poszczególnych harmonicznych napięcia, w tym przypadku aż do 40-tej harmonicznej. To zależy od możliwej krotności harmonicznych względem 3 i ich parzystości [4].

W sieciach publicznych stosuje się 5% dla całkowitego zniekształcenia harmonicznych prądu i 2% całkowitego zniekształcenia harmonicznych napięcia, z maksimum 1% dla poszczególnych harmonicznych napięcia.

Jeśli poziomy zakłóceń losowych są stosunkowo wysokie, to mogą znacząco wpływać na błędy pomiarów

wskaźnika THD. Zakłócenia losowe na wyjściu układu elektrycznego mogą pochodzić z:

- losowych zmian parametrów elementów układów elektrycznych,
- losowych zakłóceń sygnałów wejściowych lub źródeł zasilających.

Natura fizyczna zakłóceń losowych, to działanie czynników: termicznych, gazodynamicznych, elektromagnetycznych, optycznych, akustycznych itd.

W badaniach symulacyjnych będzie założone, że źródłami zniekształceń sygnałów są elementy nieliniowe o charakterystykach dynamicznych $u(i)$. Działające wymuszenia prądowe będą przebiegami sinusoidalnymi bez składowych stałych.

Określenia współczynników zawartości harmonicznych bez uwzględniania zaburzeń losowych

Współczynnik zawartości i -tego rzędu jest zdefiniowany m.in. w różnych częściach normy IEC 60268 jako stosunek napięcia skutecznego i -tej harmonicznej do całkowitego napięcia skutecznego sygnału

$$(1) \quad THDr_i = \frac{V_i}{V_{total}} 100\%$$

Natomiast całkowite zniekształcenie harmoniczne (THD) definiuje się jako stosunek napięcia skutecznego wszystkich produktów zniekształceń (oprócz składowej stałej) do całkowitego napięcia skutecznego sygnału

$$(2) \quad THDr_n = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_{total}} 100\%$$

THD jest miarą energii wszystkich harmonicznych (lub kilku wybranych) generowanych przez system w stosunku do sygnału wejściowego. Często odnosi się go do harmonicznej podstawowej

$$(3) \quad THDf_i = \frac{V_i}{V_1} 100\%$$

lub

$$(4) \quad THDf_n = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} 100\%$$

Wartości THD (zarówno THDf, jak i THDr) wyrażone w procentach można przeliczać na decybele i odwrotnie, np.

$$(5) \quad THD_{dB} = 20 \log \frac{THD\%}{100}$$

Znajomość wartości skutecznej składowej podstawowej i wskaźnika THD konkretnej wielkości elektrycznej umożliwia obliczanie wartości skutecznej napięcia [5, 6]

$$(6) \quad U = U_1 \sqrt{1 + THDf_U^2}$$

Podobnie można obliczyć wartość skuteczną prądu

$$(7) \quad I = I_1 \sqrt{1 + THDf_I^2}$$

Moc czynna może być określona z zależności

$$(8) \quad P = U_1 I_1 (1 - THDf_U \cdot THDf_I)$$

Natomiast moc pozorna wyraża się wzorem

$$(9) \quad S = UI = U_1 \sqrt{1 + THDf_U^2} I_1 \sqrt{1 + THDf_I^2}$$

Określenia współczynników zawartości harmonicznych z uwzględnieniem zakłóceń losowych

Całkowite zniekształcenia harmoniczne sygnału wraz z szumem można określić ze wzorów

$$(10) \quad THDr_n + N = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2 + V_{noise}^2}}{V_{total}} 100\%$$

lub

$$(11) \quad THDf_n + N = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2 + V_{noise}^2}}{V_1} 100\%$$

Wielkość V_{noise}^2 odpowiada energii (RMS) całkowitego szumu na wyjściu układu oprócz składowych harmonicznych. Wartość zniekształcenia można także wyrazić w decybelach

$$(12) \quad (THD + N)_{dB} = 20 \log(THD + N)$$

Normy zalecają przeprowadzanie pomiarów harmonicznych do 40 rzędu (THD40) w przebiegu napięciowych sieci zasilania o częstotliwości znamionowej 50 Hz. Szerokość okna czasowego analizy DFT jest również określona i wynosi 200 ms, tym samym rozdzielczość częstotliwościowa wynosi 5 Hz. Normy zalecają także przeprowadzenie uśredniania wyznaczonych wartości amplitud w bardzo krótkim (3 s), krótkim (10 min.) i długim (2 godz.) czasie pomiaru.

Modele łuku z zaburzonymi losowo parametrami

W urządzeniach elektrotechnologicznych łukowych i plazmowych wykorzystuje się łuki elektryczne różnej mocy. Na potrzeby analiz różnych urządzeń elektrotechnologicznych, aparatów elektrycznych i lamp oświetleniowych opracowano modele łuków małej mocy i modele łuków dużej mocy.

Zmodyfikowany model Mayra z określonym napięciem zapłonu może być zapisany w postaci [7]

$$(13) \quad \theta_M \frac{dg}{dt} + g = \frac{i^2 + I_M^2}{P_M} = \frac{i^2}{P_M} + G_{M0}$$

gdzie: θ_M – stała czasowa modelu Mayra lub jego modyfikacji; P_M – moc modelu Mayra lub jego modyfikacji; G_{M0} – konduktancja charakterystyczna modelu; I_M – odcięta punktu odpowiadająca napięciu zapłonu $U = P_M / (2I_M)$, ($I_M > 0$ A). Jeśli wartość prądu I_M wynosi zero, to otrzymuje się klasyczny model Mayra z nieokreślonym napięciem zapłonu.

Zmodyfikowany model Cassiego ze zredukowanym napięciem zapłonu ma postać [8]

$$(14) \quad \theta_C \frac{dg^2}{dt} + g^2 = \frac{(|i| + I_C)^2}{U_C^2} = \left(\frac{|i|}{U_C} + G_{C0} \right)^2$$

gdzie: θ_C – stała czasowa modelu Cassiego lub jego modyfikacji; U_C - napięcie modelu Cassiego lub jego modyfikacji; G_{C0} – konduktancja charakterystyczna modelu. Jeśli wartość prądu I_C wynosi zero, to otrzymuje się klasyczny model Cassiego z napięciem zapłonu równym U_C .

W wyniku działań prowadzących do integracji tych modeli otrzymuje się bardziej ogólny model hybrydowy Mayra -Cassiego w postaci [7]

$$(15) \quad g = \varepsilon(i) \frac{i^2 + I_M^2}{P_M} + [I - \varepsilon(i)] \frac{i^2}{g U_C^2} - \theta(i) \frac{dg}{dt}$$

Ze względu na działanie funkcji wagowej w modelu hybrydowym pominięto zmienną I_C . Funkcję wagową można określić zależnością

$$(16) \quad \varepsilon(i) = \exp\left(\ln(k_i) \frac{i^2}{I_0^2}\right)$$

Wartość k_i określa rzędną punktu przełączania funkcji $\varepsilon(I_0) = k_i$, gdzie $0 < k_i < 1$, $I_0 > I_M$. Funkcja tłumienia może być zadana w postaci nieliniowej zależnej od prądu

$$(17) \quad \theta(i) = \theta_{iC} + \theta_{iM} \exp(-\alpha_i |i|)$$

gdzie $\theta_M \gg \theta_C$. Bardziej uzasadniona [8] jest

$$(18) \quad \theta(g) = \theta_{gC} + \theta_{gM} \exp(-\alpha_g g)$$

gdzie $\theta_{gM} \gg \theta_{gC}$.

W niektórych publikacjach [10] z zakresu modelowania łuku można znaleźć przykłady wprowadzania zaburzeń losowych. Wtedy zamiast stałych parametrów można użyć zależności określające wielkości stochastyczne, np.

$$(19) \quad U_{st}(t) = U_C + \xi_C(t) \cdot U_C = (I + \xi_C(t)) U_C$$

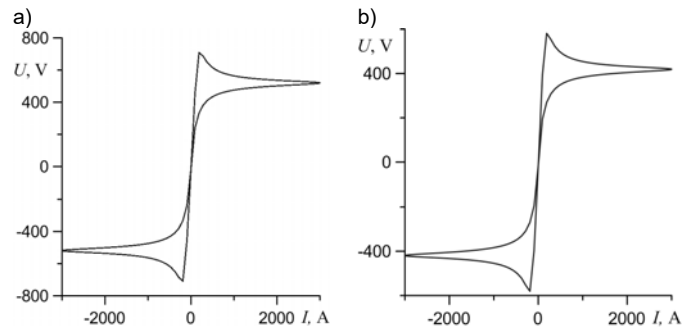
gdzie $\xi_C(t)$ – bezwymiarowe zaburzenia stochastyczne.

Badania symulacyjne procesów w obwodzie z łukiem elektrycznym o harmonicznych i stochastycznych zaburzeniach parametrów

Na początku dokonano symulacji procesów w obwodach z łukiem niezaburzonym i z wymuszeniem prądowym sinusoidalnym $i = 3000 \sin \omega t$, A o częstotliwości 50 Hz. Na drugim etapie badań symulacyjnych uwzględniono występowanie zakłóceń deterministycznych. W takim wyidealizowanym przypadku założono, że wynikają one z działania prądów w sąsiednich fazach urządzenia trójfazowego. W rzeczywistości zarówno w sąsiednich fazach, jak i w fazie z modelowanym łukiem występują zaburzenia stochastyczne. Takie symulacje przeprowadzono na trzecim etapie badań. Wyniki badań pokazano na rysunkach i zamieszczono w tabeli 1.

Na rysunku 1 pokazano charakterystyki dynamiczne łuku płonącego w warunkach braku zaburzeń deterministycznych i stochastycznych. Do symulowania procesów w obwodzie z łukiem wykorzystano model hybrydowy (15) z funkcją tłumienia (17). Wartości parametrów modelu łuku są następujące: $P_M = 500$ W, $I_M = 5$ A, $\theta_M = 1 \cdot 10^{-3}$ s, $U_C = 500$ V, $\theta_C = 2 \cdot 10^{-4}$ s, $k_i = 0,4$, $I_0 = 10$ A, $\alpha_i = 0,2$ A⁻¹, $U_{AK} = 16$ V. W celu porównania wykorzystano także model hybrydowy (15) ale z funkcją tłumienia (18). Ten model różni się od poprzedniego tylko dwoma parametrami: $U_C = 400$ V, $\alpha_g = 500$ S⁻¹. Na podstawie zebranych danych obliczono współczynniki zawartości harmonicznych i wartości skuteczne napięcia

oraz moce sygnałów pomiarowych określone wzorami (6)-(9).

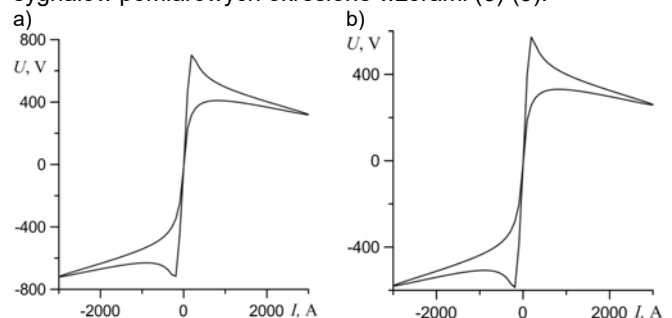


Rys. 1. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków z wymuszeniem prądowym sinusoidalnym opisanych modelem hybrydowym: a) z funkcją tłumienia (17), b) z funkcją tłumienia (18)

Na rysunku 2 pokazano charakterystyki dynamiczne łuku płonącego w warunkach występowania zaburzeń deterministycznych.

$$(20) \quad U_{st}(t) = (I + \alpha_{23} \sin \omega t) U_C$$

Oddzielnie były rozpatrzone przypadki modelu łuku z funkcją tłumienia (20) i z funkcją tłumienia (21). W obu przypadkach $\alpha_{23} = -0,4$. Jak widać zaburzenia deterministyczne o takiej samej częstotliwości jak częstotliwość prądu badanego obwodu z łukiem prowadzą do deformacji dynamicznych pętli histerezy. Wyznaczono również wartości współczynników zawartości harmonicznych. Na ich podstawie obliczono wartości skuteczne napięcia i moce sygnałów pomiarowych określone wzorami (6)-(9).



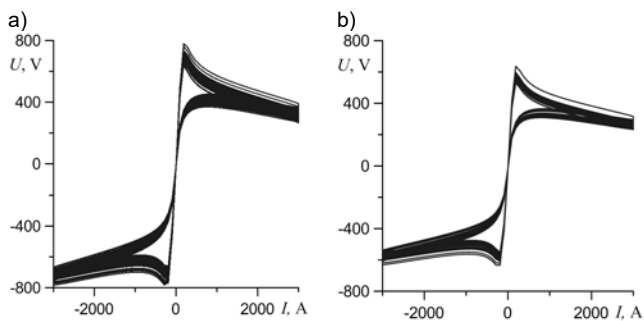
Rys. 2. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków z zaburzeniami deterministycznymi: a) z funkcją tłumienia (17), b) z funkcją tłumienia (18)

Na rysunku 3 pokazano charakterystyki dynamiczne łuku płonącego w warunkach jednoczesnego występowania zaburzeń deterministycznych i stochastycznych

$$(21) \quad U_{st}(t) = (I + \alpha_{23} \sin \omega t + \alpha_s \xi(t)) U_C$$

gdzie $\alpha_s = 0,01$. Dla takich samych parametrów jak poprzednio wyznaczono wartości współczynników zawartości harmonicznych z udziałem zaburzeń losowych. Przez to ich wartości powinny być większe od zawartych w opisie rysunków 1 i 2.

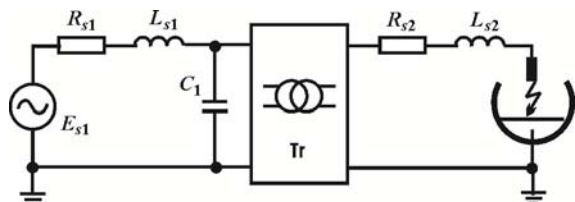
W przypadkach obwodów odpowiadających rysunkom 1 i 2 amplituda zaburzeń stochastycznych była zerowa. Wartości współczynników zawartości harmonicznych osiągały zawsze duże wartości. Takie dane mogą być wykorzystywane w działaniach systemów pomiarowych i regulacyjnych. Duża inercja układów zasilania (transformatorów, dławików, filtrów) powoduje, że w sieciach energetycznych byłyby one znacznie mniejsze.



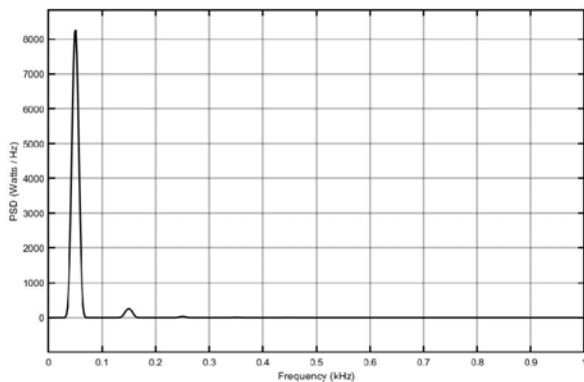
Rys. 3. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków z zaburzeniami deterministycznymi i losowymi: a) z funkcją tłumienia (17), b) z funkcją tłumienia (18)

Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów w obwodzie z łukiem

Rys.	THDf+N, %	THDr+N, %	U_{rms} , V	P, W	S, VA
1a	44,63	40,75	513,6	$9,63 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^6$
1b	44,67	40,79	414,6	$8,31 \cdot 10^5$	$8,79 \cdot 10^5$
2a	46,51	40,94	517,2	$9,90 \cdot 10^5$	$1,09 \cdot 10^6$
2b	46,51	40,97	417,5	$7,99 \cdot 10^5$	$8,82 \cdot 10^5$
3a	46,69	41,11	503,1	$9,67 \cdot 10^5$	$1,07 \cdot 10^6$
3b	46,68	41,12	406,1	$7,84 \cdot 10^5$	$8,61 \cdot 10^5$
5we	19,35	18,99	-	-	-
5wy	38,78	36,16	241,0	$2,64 \cdot 10^6$	$2,83 \cdot 10^6$



Rys. 4. Schemat obwodu jednofazowego zasilania łuku z sieci WN



Rys. 5. Widmowa funkcja gęstości mocy prądu na wejściu transformatora

Przykład bardziej złożonego obwodu zasilania łuku zaburzanego zrealizowanego w Simulinku pokazano na rysunku 4. Zawiera on: źródło zasilania ($E_1 = 10$ kV, $R_{s1} = 1 \cdot 10^{-3} \Omega$, $L_{s1} = 2 \cdot 10^{-4}$ H, $C_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ F), transformator ($P_n = 5 \cdot 10^6$ W, $U_1 = 10$ kV, $R_1 = 0,02$, $L_1 = 0,2$, $U_2 = 300$ V, $R_2 = 5 \cdot 10^{-3}$, $L_2 = 8 \cdot 10^{-3}$, $R_3 = 500$, $L_3 = 500$) i obciążenie ($R_{s2} = 2 \cdot 10^{-3} \Omega$, $L_{s2} = 2 \cdot 10^{-5}$ H) połączone z modelem hybrydowym łuku ($P_M = 500$ W, $I_M = 5$ A, $\theta_M = 1 \cdot 10^{-3}$ s, $U_C = 200$ V, $\theta_C = 2 \cdot 10^{-4}$ s, $k_i = 0,5$, $I_0 = 20$ A, $\alpha_i = 0,1$) zaburzonym losowo ($\xi = 1 \cdot 10^{-3}$). Wynik symulacji pokazano na rysunku 5. W tabeli 1 wiersz 5we oznacza wyniki

dotyczące prądu na wejściu transformatora, a 5wy wyniki dotyczące napięcia na wyjściu.

Wnioski:

1. Skojarzenie prostych modeli matematycznych łuku elektrycznego (Mayra i Cassiego) w model hybrydowy rozszerza możliwości odwzorowania procesów w urządzeniach elektrotechnologicznych pracujących w różnych zakresach zmian natężenia prądu z jednoczesnym działaniem zaburzeń deterministycznych i losowych.
2. Zaburzenia deterministyczne pochodzące od oddziaływania sąsiednich faz układu trójfazowego wpływają na deformacje dynamicznych pętli histerezy łuku elektrycznego. Skutkiem jest wzrost współczynników zawartości harmonicznych w przebiegu napięcia.
3. Jednoczesne występowanie zaburzeń deterministycznych i stochastycznych powoduje nie tylko zdeformowania ale i rozmycie dynamicznych pętli histerezy łuku elektrycznego. Ponadto następuje wzrost współczynników zawartości harmonicznych w przebiegu napięcia.

Autorzy: dr inż. Marek Gała, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: marek.gala@pcz.pl; dr hab. inż. Antoni Sawicki, E-mail: sawicki.a7@gmail.com; dr hab. inż. Lubomir Marciniak, E-mail: lubmar2015@gmail.com.

LITERATURA

- [1] Коэффициент нелинейных искажений (КНИ, THD), коэффициент гармонических искажений (КГИ, Kr, THDr) – различные подходы к определению. 19.01.2012. <https://www.xn--80aacyeau1asblh.xn--p1ai/reference/tech-articles/231-thd-special>
- [2] Arranz-Gimón A.E., Zorita-Lamadrid A., Morinigo-Sotelo D., Duque-Perez O., A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems, *Energies*, 2021, 14, 6467. <https://doi.org/10.3390/en14206467>
- [3] Lechner T., Harmonic Distortion Measurements in the Presence of Noise, *Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG* Mühldorfstraße 15 | D - 81671 München, June 17, 2011.
- [4] Markiewicz H., Klajn A., Zaburzenia napięcia Norma EN 50160. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, *Politechnika Wroclawska*, Lipiec 2004.
- [5] Bandrowska-Kaim A., Kratiuk K., Problematyka pomiaru mocy czynnej w przypadku przebiegów odkształconych, *Autobusy* 2019, nr 6, s. 139-143.
- [6] Svensson S., Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions. The significance of harmonics for the measurement of power and other AC quantities, Diss. Göteborg Sweden 1999.
- [7] Sawicki A., Klasyczne i zmodyfikowane modele matematyczne łuku elektrycznego, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 2019, t. 63, nr 4, s. 73-76. (Classical and Modified Mathematical Models of Electric Arc, *Institute of Welding Bulletin*, pp. 67-73, doi: 10.17729/ebis.2019.4/7)
- [8] Sawicki A., Modele hybrydowe łuku elektrycznego z ulepszonymi charakterystykami dynamicznymi w szerokich zakresach zmian wartości prądu bipolarnego, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 2017, t. 61, nr 2, s. 40-42. (Hybrid Models of Electric Arc with Improved Dynamic Characteristics in Wide Ranges of Changes in Bipolar Current Value, *Institute of Welding Bulletin*, pp. 38-43, doi: 10.17729/ebis.2017.2/5)
- [9] Ghezzi L., Balestrero A., Modeling and Simulation of Low Voltage Arcs, Proefschrift 2010.