ZAŁĄCZNIK 7: Przykładowe miary liczbowe stosowane do oceny zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu

Formułowanie liczbowych wskaźników zapadów napięcia jest kompromisem pomiędzy prostotą obliczeń, matematyczną poprawnością oraz odzwierciedleniem złożoności fizycznej zjawiska. Bez względu na to, jaki wskaźnik zostanie wybrany, nie odtworzy on całej natury zaburzenia. Najczęściej jest on miarą uśrednioną, informacja o indywidualnych cechach zjawiska jest często gubiona. A oto kilka wybranych przykładów [Z7.10]:

Wskaźniki oparte na zmianie napięcia [Z7.1]

Strata napięcia:

$$S = \int (1 - U(t))\mathrm{d}t \qquad \text{(Z7.1)}$$

gdzie U jest wartością skuteczną napięcia zmieniającą się w czasie (w jednostkach względnych, w odniesieniu np. do napięcia znamionowego U_N) i podlegającą całkowaniu w czasie trwania zaburzenia (rys. Z7.1). Czas ten wymaga zdefiniowania. Różne czasy całkowania (istotne przy wolno narastających napięciach podczas końca zapadu) dadzą znacząco różne rezultaty. Jednostką wskaźnika są miary czasu.

W przypadku prostokątnego zapadu napięcia o względnej wartości napięcia resztkowego R ($=U_{resz}/U_N$) i czasie trwania T ($=\Delta t$):

$$S=(1-R)T \qquad \text{(Z7.2)}$$

Wadą tego indeksu jest to, że pojedynczy zapad napięcia o długim czasie trwania może zdominować wiele krótkotrwałych zaburzeń.

Wskaźniki odniesione do charakterystyk odpornościowych (ang. *voltage-sag severity index*)

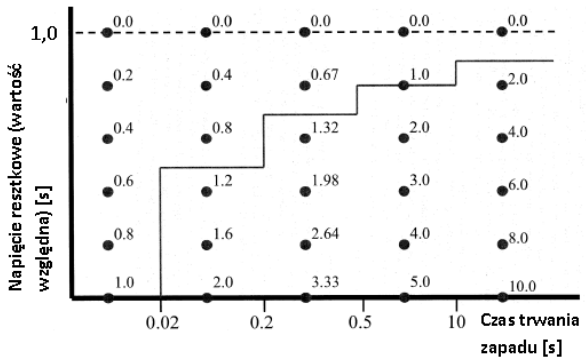
Indeks (S_e), zdefiniowany zależnością Z7.3 jest wyznaczany na podstawie znanych: względnej wartości napięcia U_{resz} i czasu trwania zaburzenia d. W oryginalnej propozycji charakterystyką odniesienia jest CBEMA, ITIC lub SEMI[Z7.2]:

$$S_e = \frac{1 - U_{resz}}{1 - U_{ref}(d)} \qquad \text{(Z7.3)}$$

gdzie: U_{resz} - wartość resztkowa napięcia podczas zapadu o czasie trwania d
$U_{ref}(d)$ - wartość zapadu na charakterystyce referencyjnej dla czasu trwania zaburzenia d.

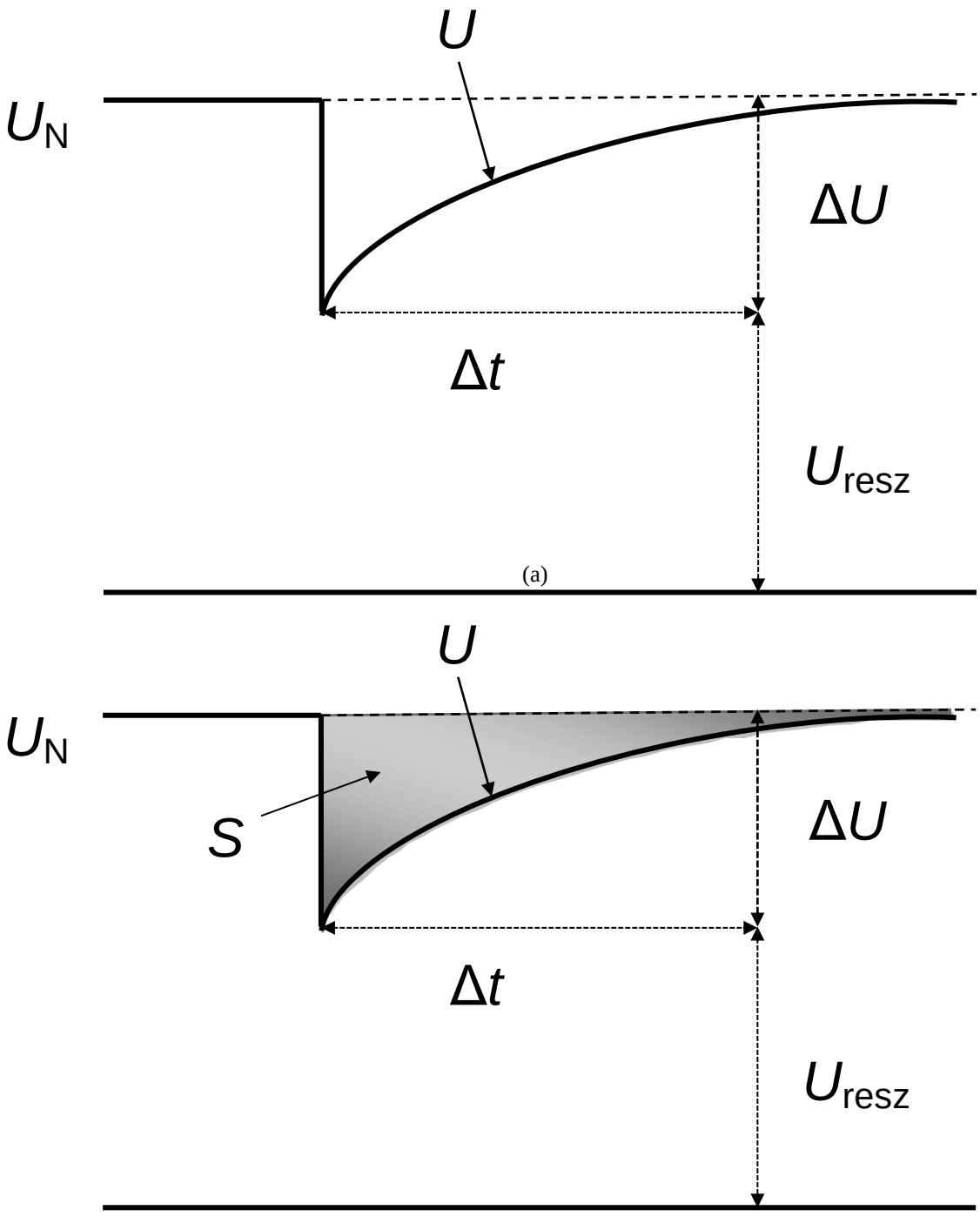
[Z7.1] Zachowano oryginalne oznaczenia.
[Z7.2] Wg [Z7.10] algorytm wyznaczania wskaźnika jest następujący:

Czas trwania zaburzenia	Współczynnik S_e
$d \leq 20$ ms	$S_e = 1-U_{resz}$
20 ms < $d \leq$ 200 ms	$S_e=2(1-U_{resz})$
200 ms < $d \leq$ 500 ms	$S_e=3.3(1-U_{resz})$
500 ms < $d \leq$ 10 s	$S_e = 5(1-U_{resz})$
d > 10 s	$Se = 10(1-U)$

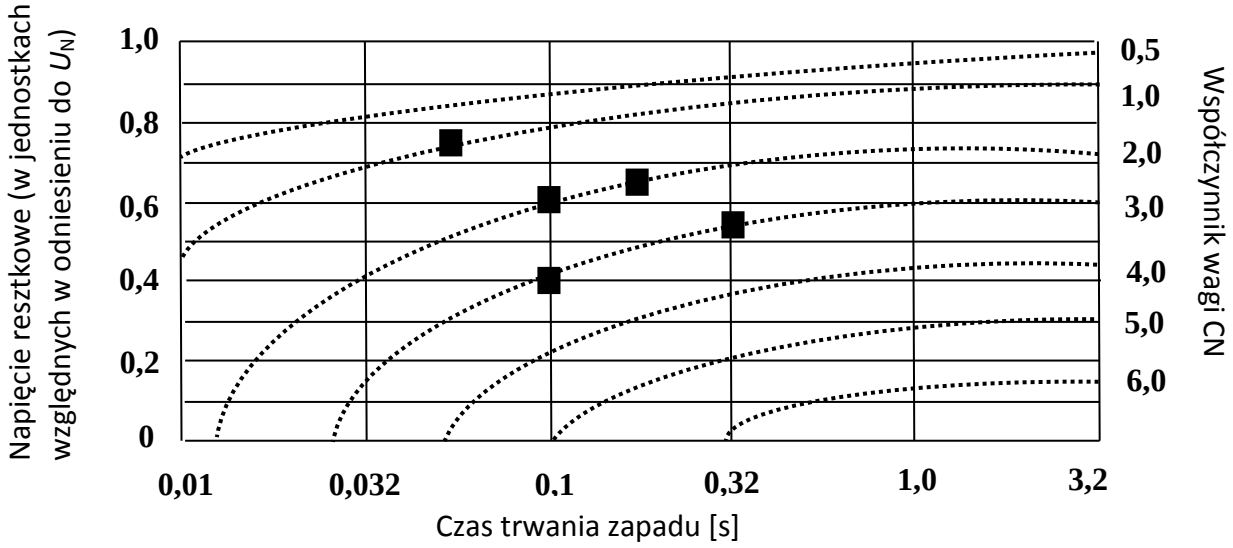


Indeks „ostrości" zapadu odniesiony do charakterystyki referencyjnej (linia ciągła) dla zaburzeń o różnym czasie trwania i różnym napięciu resztkowym

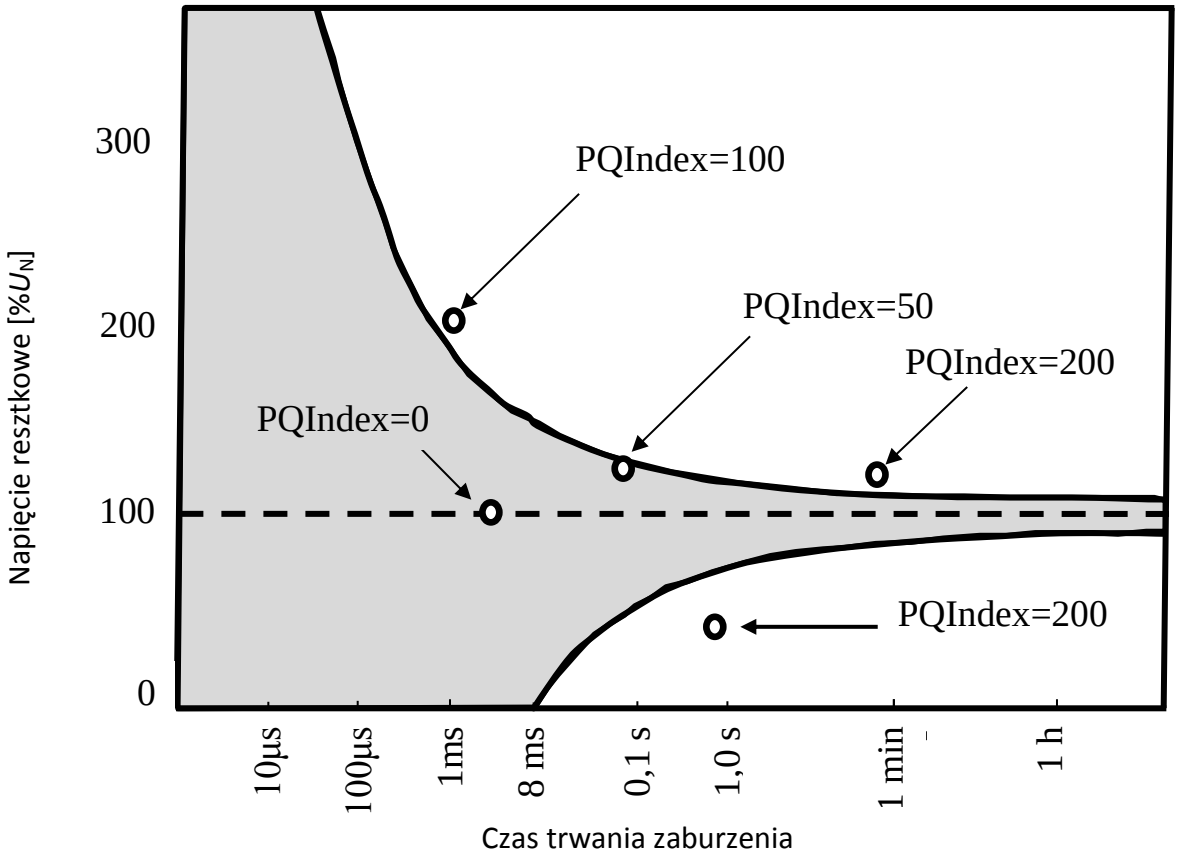
Dla zaburzeń na charakterystyce referencyjnej indeks przyjmuje wartość 1. Dla zaburzeń powyżej charakterystyki wartość indeksu jest mniejsza niż 1, powyżej - większa od 1. Dla zaburzeń o względnej wartości napięcia równej jeden indeks ma wartość zero. Im dłuższy czas trwania zaburzenia i mniejsza wartość napięcia resztkowego, tym większa wartość indeksu.



Rysunek Z7.1. Strata napięcia: (a) wersja uproszczona (zależność Z7.2) oraz (b) wyznaczanie pola powierzchni wg zależności (Z7.1)



Rysunek Z7.2. Przykładowe zapady napięcia na tle rodziny charakterystyk z "wagami" CBEMA. Współczynnik wagi równy 1 (CN=1) odpowiada oryginalnej charakterystyce CBEMA [Z7.4]



Rysunek Z7.3. Metoda RPM dla wyznaczania Wskaźnika Jakości Energii (WJE)

W [Z7.4] zaproponowano metodę wprowadzającą rozróżnienie pomiędzy zapadami napięcia w zależności od ich odległości od charakterystyki CBEMA. W efekcie skalowania charakterystyki stworzono rodzinę linii konturowych, których każda została opisana „wagą" CBEMA (CN). Indeks zapadu jest wyznaczany jako suma "wag" CBEMA, przykładowo dla zapadów jak na rysunku Z7.2 jego wartość wynosi 11 (=1+2+2+3+3).

Wskaźnik odniesiony do charakterystyki referencyjnej może być także stosowany jako wskaźnik systemowy wyznaczany na podstawie wskaźników opisujących wiele punktów pomiarowych, będąc przykładowo:

- sumą arytmetyczną tzw. całkowity wskaźnik odniesiony do charakterystyki referencyjnej (ang. *total voltage-sag severity*): $S_{\mathrm{SITE}} = \sum_{i=1}^{N} S_{\mathrm{e}-i}$
- wartością średnią tzw. średni wskaźnik odniesiony do charakterystyki referencyjnej (ang. *average voltage-sag severity*): $S_{\mathrm{average}} = S_{\mathrm{SITE}} / N$
- średnią ważoną lub
- percentylem CP95 itp.

Do zalet można zaliczyć możliwość stosowania pojedynczego wskaźnika, co ułatwia analizę porównawczą, uwzględnienie w opisie zarówno wartości napięcia jak i czasu trwania zaburzenia oraz łatwość wprowadzenia percentyla CP95. Wadą jest brak związku z charakterystykami odpornościowymi urządzeń.

Wskaźnik jakości RPM (ang. *RPM Power Quality index***)**

Amerykańska firma RPM zaproponowała procedurę wyznaczania "wartości" zapadu napięcia przedstawioną na rysunku Z7.3. Przyjęto koordynaty dla zapadu (T,V). Zdefiniowano napięcie $V_{\mathrm{CBEMA}}(T)$ jako napięcie wyznaczone na podstawie charakterystyki CBEMA (także charakterystyk ITEC lub SEMI) dla czasu trwania zaburzenia T. Wskaźnik Jakości RPM dla danego zaburzenia dany jest związkiem:

$$PQ\ Index = \left(\frac{100\% - V}{100\% - V_{\mathrm{CBEMA}}(T)} \right) x100\% \qquad \text{(Z7.4)}$$

Jeżeli dla zapadu wartość współczynnika PQIndex wynosi 100 wówczas dany zapad leży na charakterystyce referencyjnej. Współczynniki przyjmują wartość zero dla zapadów o napięciu resztkowym równym znamionowemu. Im większa wartość współczynnika tym zapad jest bardziej uciążliwy dla odbiorcy.
Wskaźnik zapadów może być wyznaczony jako suma wskaźników RPM dla całego okresu pomiarowego. Należy zauważyć, że jego wartość będzie znacząca dla „płytkich", długich zapadów, a te mają z reguły niewielki wpływ na urządzenia. Wiele takich zapadów może dać w efekcie dużą wartość wskaźnika mimo braku znaczących negatywnych skutków.

Wskaźniki oparte na energii[Z7.3]

Energia zapadu napięcia (ang**.** *voltage-sag energy index*)

$$E_{\mathrm{VS}} = \int_0^T \left[1 - \left\{ \frac{U(t)}{U_{\mathrm{ref}}} \right\}^2 \right] \mathrm{d}t \qquad \text{(Z7.5)}$$

gdzie U jest względną wartością skuteczną napięcia podczas zapadu w V, T czasem trwania zaburzenia, a U_{ref} napięciem referencyjnym (często znamionowym). Im większa amplituda zapadu i dłuższy czas jego trwania tym większa wartość wskaźnika. Jednostką wskaźnika jest jednostka czasu. W przypadku gdy dostępne są jedynie: napięcie resztkowe oraz czas trwania zapadu przyjmowana jest stała wartość skuteczna napięcia podczas trwania zaburzenia i wówczas stosowana jest zależność (Z7.6):

$$E_{\mathrm{VS}} = \left[1 - \left(\frac{U_{\mathrm{resz}}}{U_{\mathrm{ref}}} \right)^2 \right] T \qquad \text{(Z7.6)}$$

Energia zapadu napięcia E_{VS} może być interpretowana jako energia rozważanego zdarzenia. Dla zdarzeń występujących równocześnie w kilku kanałach pomiarowych wskaźnik zapadu napięcia jest definiowany jako suma wskaźników wyznaczonych dla poszczególnych kanałów:

$$E_{\mathrm{VS}} = \left(E_{\mathrm{VS-L1}} + E_{\mathrm{VS-L2}} + E_{\mathrm{VS-L3}} \right) \qquad \text{(Z7.7)}$$

[3] W systemach przesyłowych proponuje się wykorzystanie także energii nie dostarczonej jako miary zaburzenia.

Należy zauważyć, że w tej metodzie pojedynczy zapad napięcia o długim czasie trwania może dominować nad wieloma krótkimi zdarzeniami.
Zaproponowano także tzw. wskaźnik energii zapadu (ang. *sag energy index* - SEI), który jest sumą energii zapadów napięcia dla wszystkich zapadów kwalifikowanych - *n*, które wystąpiły w danym punkcie pomiarowym w zadanym czasie. Wskaźniki te z reguły są wyznaczane dla miesiąca lub roku:

$$SEI = \sum_{i=1}^{n} E_{\mathrm{VS}-i} \tag{Z7.8}$$

SEI, wyrażony w jednostkach czasu, może być interpretowany jako długość zastępczej przerwy o stracie energii (energii niedostarczonej) równej stracie energii, która wystąpiła dla wszystkich zapadów w całym okresie pomiarowym.
Do zalet można zaliczyć możliwość stosowania pojedynczego wskaźnika, co ułatwia analizę porównawczą, oraz łatwość wprowadzenia percentyla CP95. Wadą natomiast jest brak związku z charakterystykami odpornościowymi urządzeń oraz fakt, że jedno duże zaburzenie może przesądzić o wartości indeksu. Metoda jest nieodpowiednia jako indeks punktowy.
Do tej kategorii wskaźników można zakwalifikować także propozycję przedstawioną w [Z7.8][Z7.9], a wykorzystującą charakterystykę CBEMA, traktowaną – w dolnej gałęzi dotyczącej zapadów – jako zbiór punkt (zaburzeń) o stałej wartości utraconej przez odbiorcę energii. Zgodnie z tą propozycją wskaźnik dla jednej fazy wyznaczany jest na podstawie zależności:

$$W = \left(1 - \frac{U_{\mathrm{reszt.}}}{U_{\mathrm{N}}}\right)^{3.14} T \tag{Z7.9}$$

Dla układu trójfazowego:

$$W_{\Sigma} = \left(1 - \frac{U_{\mathrm{reszt.L1}}}{U_{\mathrm{N}}}\right)^{3.14} T_{\mathrm{L1}} + \left(1 - \frac{U_{\mathrm{reszt.L2}}}{U_{\mathrm{N}}}\right)^{3.14} T_{\mathrm{L2}} + \left(1 - \frac{U_{\mathrm{reszt.L3}}}{U_{\mathrm{N}}}\right)^{3.14} T_{\mathrm{L3}} \tag{Z7.10}$$

Średni wskaźnik energii zapadów (ang. *average sag energy index – ASEI*)

Średnia energia zapadu z wszystkich zaburzeń zmierzonych w danym punkcie sieci zasilającej w zadanym czasie pomiarów:

$$ASEI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} E_{\mathrm{VS}-1} \tag{Z7.11}$$

Wartość wskaźnika jest silnie zależna od chwili rozpoczęcia pomiaru tzn. od wartości progowej zaburzenia.
Stosują wskaźniki energetyczne zapadów jako wskaźniki systemowe można przyjąć wartość średnią z wskaźników punktowych. Wartości SEI dla systemu są wyznaczane dzieląc sumę wskaźników punktowych przez liczbę punktów *N*:

$$SEI_{\mathrm{system}} = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^{N} SEI_{s} \tag{Z7.12}$$

Wskaźniki oparte na składowych symetrycznych [Z7.1][Z7.2]

Na podstawie wartości napięcia oraz jego kąta fazowego dla każdej fazy układu zasilającego, można uzyskać informację o rodzaju zapadu oraz trzech jego wskaźnikach:

- napięciu charakterystycznym *V* (ang. c*haracteristic voltage*)
- współczynniku *PN*[Z7.4]
- wartości składowej kolejności zerowej.

[Z7.4] *PN* oznacza składowe symetryczne kolejności zgodnej i przeciwnej (ang. *positive and negative seguence voltage*).

Wszystkie trzy wskaźniki są liczbami zespolonymi zmieniającymi się w czasie. Rodzaj zapadu wskazuje na numer i liczbę zaburzonych faz. Na rysunku Z7.4 przedstawiono sześć podstawowych rodzajów zaburzeń. Rodzaj zapadu jest określany na podstawie kąta przesunięcia fazowego pomiędzy składowymi symetrycznymi: zgodną - U_1 i przeciwną - U_2.

$$k = \text{zaokrąglenie do liczby całkowitej} \left(\frac{\angle(\underline{U}_2 - \underline{U}_1) - 30^0}{60^0} \right) \qquad \text{(Z7.13)}$$

dla:

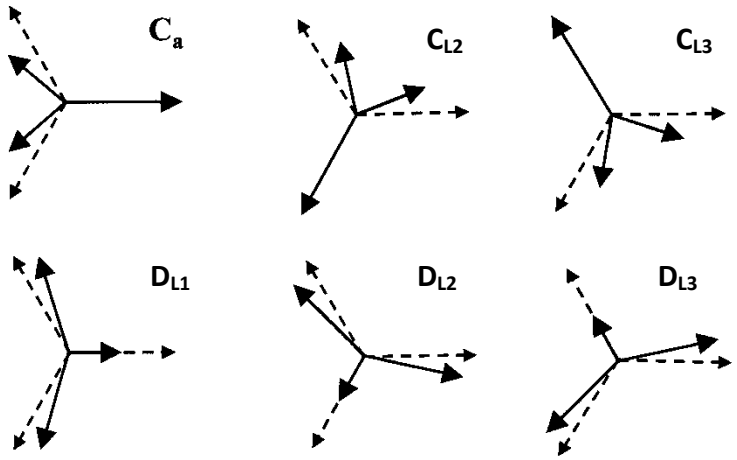
$k = 0$	zapad typu	C_{L1}
$k = 1$	zapad typu	D_{L3}
$k = 2$	zapad typu	C_{L2}
$k = 3$	zapad typu	D_{L1}
$k = 4$	zapad typu	C_{L3}
$k = 5$	zapad typu	D_{L2}

Grupa zaburzeń typu C to zapady napięcia w dwóch fazach układu zasilającego: C_{L1} – fazy L2 i L3 (faza L1 nie zaburzona), C_{L2} – fazy L1 i L3, C_{L3} – fazy L1 i L2.
Grupa zaburzeń typu D to zapady napięcia w jednej fazie układu zasilającego: D_{L1} – faza L1, D_{L2} – faza L2, D_{L3} – faza L3.

Znając rodzaj zapadu napięcia można wyznaczyć jego wartość charakterystyczną ($\underline{V}$) i współczynnik *PN* ($\underline{F}$) na podstawie zależności:

$$\underline{U}_2^* = \underline{U}_2 e^{-jk60^0} \qquad \underline{V} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2^* \qquad \underline{F} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2^* \qquad \text{(Z7.14)}$$

Podstawowe znaczenie ma napięcie charakterystyczne, pozostałe wskaźniki stanowią jego uzupełnienie. Moduł napięcia charakterystycznego porównywany z wartością skuteczną mierzonych napięć jest podstawą wyznaczania czasu i napięcia resztkowego zaburzenia. Napięcie charakterystyczne nie podlega zmianie przy przejściu przez transformator. Napięcie charakterystyczne wyznaczone dla odbiornika lub sprzętu pomiarowego połączonego w gwiazdę lub trójkąt ma taką samą wartość.



Rysunek Z7.4. Wyróżnione rodzaje zaburzeń
Zmienić oznaczenia

Składowa zerowa wskazuje na istnienie lub brak połączenia układu z ziemią. Zmienia swoją wartość podczas przejścia przez transformator. Nie dotyczy odbiorników o połączeniu w trójkąt.
Współczynnik PN, wyznaczany na podstawie napięć kolejności zgodnej i przeciwnej jest wskaźnikiem asymetrii zaburzenia. Dla zapadów napięcia spowodowanych jednofazowymi i międzyfazowymi zwarciami współczynnik PN jest równy lub niewiele mniejszy niż napięcie składowej zgodnej poprzedzające zaburzenie. Różnica jest spowodowana dynamicznym wpływem odbiornika. Podobnie jak napięcie charakterystyczne definiowany jest w taki sposób, że jego wartość nie zmienia się podczas przejścia przez transformator. Jego wartość wyznaczona dla odbiornika lub sprzętu pomiarowego połączonego w gwiazdę lub trójkąt jest taka sama. Składowa zerowa rzadko występuje na zaciskach odbiornika. W większości przypadków może być pominięta.

ZAŁĄCZNIK 7: Przykładowe miary liczbowe stosowane do oceny zapadów napięcia i krótkich przerw w zasilaniu

Na podstawie znajomości rodzaju zapadu, zespolonej wartości napięcia charakterystycznego, współczynnika PN i składowej zerowej można w każdym przypadku uzyskać zespoloną wartość napięć fazowych.

Metoda oparta na pomiarze sześciu wartości skutecznych napięcia

Alternatywną metodę wyznaczania charakterystyk zaburzenia dla trójfazowych zapadów można zrealizować wg następującej procedury:

- wyznaczyć składową zerową napięcia:

$$u_0(t) = \frac{1}{3}\left(u_{L1}(t) + u_{L2}(t) + u_{L3}(t)\right) \qquad \text{(Z7.15)}$$

- wyznaczyć wartości napięć fazowych bez składowej zerowej

$$u^*_{L1}(t) = u_{L1}(t) - u_0(t) \quad u^*_{L2}(t) = u_{L2}(t) - u_0(t) \quad u^*_{L3}(t) = u_{L3}(t) - u_0(t) \qquad \text{(Z7.16)}$$

- wyznaczyć wartości napięć międzyfazowych

$$u_{L12}(t) = \frac{u_{L1}(t) - u_{L2}(t)}{\sqrt{3}} \quad u_{L23}(t) = \frac{u_{L2}(t) - u_{L3}(t)}{\sqrt{3}} \quad u_{L31}(t) = \frac{u_{L3}(t) - u_{L1}(t)}{\sqrt{3}} \qquad \text{(Z7.17)}$$

- wyznaczyć wartości skuteczne napięć fazowych i międzyfazowych

$$U_{L1}(t) = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t-T}^{t} [u_a(\tau)]^2 \, \mathrm{d}\tau} \qquad \text{itd.}$$

Wartość napięcia charakterystycznego jest najmniejszą, a współczynnik *PN* największą z sześciu wartości skutecznych.

Rodzaj zapadu jest identyfikowany na podstawie wyznaczonych wartości skutecznych:

jeżeli najmniejszą wartość ma napięcie fazy L1	- zapad typu D_{L1}
jeżeli najmniejszą wartość ma napięcie fazy L2	- zapad typu D_{L2}
jeżeli najmniejszą wartość ma napięcie fazy L3	- zapad typu D_{L3}
jeżeli najmniejszą wartość ma napięcie L23	- zapad typu C_{L1}
jeżeli najmniejszą wartość ma napięcie L31	- zapad typu C_{L2}
jeżeli najmniejszą wartość ma napięcie L12	- zapad typu C_{L3}

„Ważone" wskaźniki zapadów

W Tabeli Z7.1 przedstawiono za [Z7.3][Z7.7], koncepcję zastępczych, ważonych zapadów napięcia (w okresie np. roku), będącą podstawą wyznaczania wzajemnych zobowiązań finansowych pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii.

Tablica Z7.1. Koncepcja nr 1 zastosowania współczynników ważenia zapadów napięcia w odniesieniu do przykładowej liczby zaburzeń

Kategoria zaburzenia	Współczynniki ważenia dla potrzeb analizy ekonomicznej	Przykładowa liczba zaburzeń w ciągu roku	Zastępcze zaburzenia w ciągu roku
przerwa	1	5	5,0
zapad o wartości ⟨ 50%	1	1	1,0
(50-70)%	0,7	13	9,1
(70-80)%	0,4	10	4,0
(80-90)%	0,1	39	3,9
Wartość całkowita		68	**23,0**

Zgodnie z tą koncepcją nie jest uwzględniany czasu trwania zaburzenia. W rozważanym przypadku przyjmując przykładowo wartość jednego zaburzenia jako X-PLN, roczny koszt wyniesie 23xPLN. Takie podejście daje dużą łatwość szacowania korzyści wynikających z zastosowania jednego z urządzeń służących eliminacji

zapadów. Znając podstawę jego działania można określić, które zapady (o jakiej amplitudzie i czasie trwania) zostaną w efekcie jego pracy wyeliminowane. Tworzona jest wiec nowa kolumna zapadów po zainstalowaniu rozważanego urządzenia. Obliczana jest nowa wartość całkowitych zastępczych zapadów i jest ona porównywana z wartością wyjściową, a różnica wskaźników jest mnożona przez koszt jednego zaburzenia. Tak otrzymany wynik jest porównywany z ceną urządzenia dając podstawę wnioskowania odnośnie opłacalności ekonomicznej inwestycji (z uwzględnieniem czasu eksploatacji urządzenia, jego kosztów eksploatacyjnych, stopy dyskontowej itp.). Analiza wykonana dla różnych urządzeń służących poprawie warunków zasilania ułatwia wybór z pośród różnych możliwych rozwiązań.

Zgodnie z inną propozycją (umożliwiającą uwzględnienie także czasu trwania zaburzenia) współczynniki ważenia podane w Tabeli Z7.2 są efektem mnożenia średniego czasu trwania i amplitudy dla każdej komórki. Przykładowo, dla zadanego przedziału czasowego (0,5-1,0) s i amplitudy (0,3-0,6)U_{ref}, wartość współczynnika ważenia wynosi 0,3375 = 0,75x0,45. Przyjmując, że negatywny skutek zapadów napięcia o czasie trwania dłuższym niż 1 s zależy prawie wyłącznie od amplitudy zapadu, dla ostatnich czterech kolumn przyjęto jednakowy średni czas trwania zaburzenia – 0,875 s.

Przyjęte w Tabelach Z7.1-2 współczynniki ważenia mogą podlegać zmianie w zależności od odbiorcy.

Tabela Z7.2. Koncepcja nr 2 zastosowania współczynników ważenia [Z7.5]

		Czas trwania					
amplituda zapadu u%		20 ms ≤ t < 100 ms	100 ms ≤ t < 500 ms	500 ms ≤ t < 1 s	1 s ≤ t < 3 s	3 s ≤ t < 20 s	20 s ≤ t < 60 s
	wartość średnia	0,06	0,3	0,75	0,875	0,875	0,875
15 > u ≥ 10	0,125	0,0075	0,0375	0,0938	0,1094	0,1094	0,1094
30 > u ≥ 15	0,225	0,0135	0,0675	0,1688	0,1969	0,1969	0,1969
60 > u ≥ 30	0,45	0,0270	0,1350	0,3375	0,3938	0,3938	0,3938
99 > u ≥ 60	0,795	0,0477	0,2385	0,5963	0,6956	0,6956	0,6956
0> u ≥ 99	0,995	0,0597	0,2985	0,7463	0,8706	0,8706	0,8706

Literatura

[Z7.1] Ahang L.D., Bollen M.: Characteristics of voltage dips (sags) in power systems, IEEE Trans. on Power Delivery, 15, 2, 2000, 827-832.

[Z7.2] Bollen M.H.J.: Understanding power quality problems – voltage sags and interruptions, IEEE Press Series on Power Engineering 2000.

[Z7.3] Bollen M.: Time aggregation of voltage dips, Discussion in the CIGRE working group, June 2003.

[Z7.4] Gosbell V.J., Robinson D., Perera S.: The analysis of utility voltage sag data, Electricity 2002 – Winners and Losers from Reforms and Innovations.

[Z7.5] IEC 61000-2-8: Voltage dips and short interruptions on public supply systems with statistical measurement results.

[Z7.6] Rivier J., Gomez T.: Critical analysis of Spanish power quality regulation design. www.cdec-sign.cl.

[Z7.7] Robert A., Hoeffelman J., De Jaeger E.: CIRED 2001 – Session 2: Power Quality & EMC, Presentations and Contributions for Thursday 21 June 2001 (materiał otrzymany od autorów).

[Z7.8] Thallam R.S., Heydt G.T.: Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense, IEEE PES Summer Meeting, Seatle, July 2000.

[Z7.9] Thallam R.S.: Power quality indices based on voltage sag energy values, Power Quality 2001 Proceedings, Sep. 2001.

[Z7.10] Voltage sag indices – draft 4, working document for IEEE P1564, August 2003.