



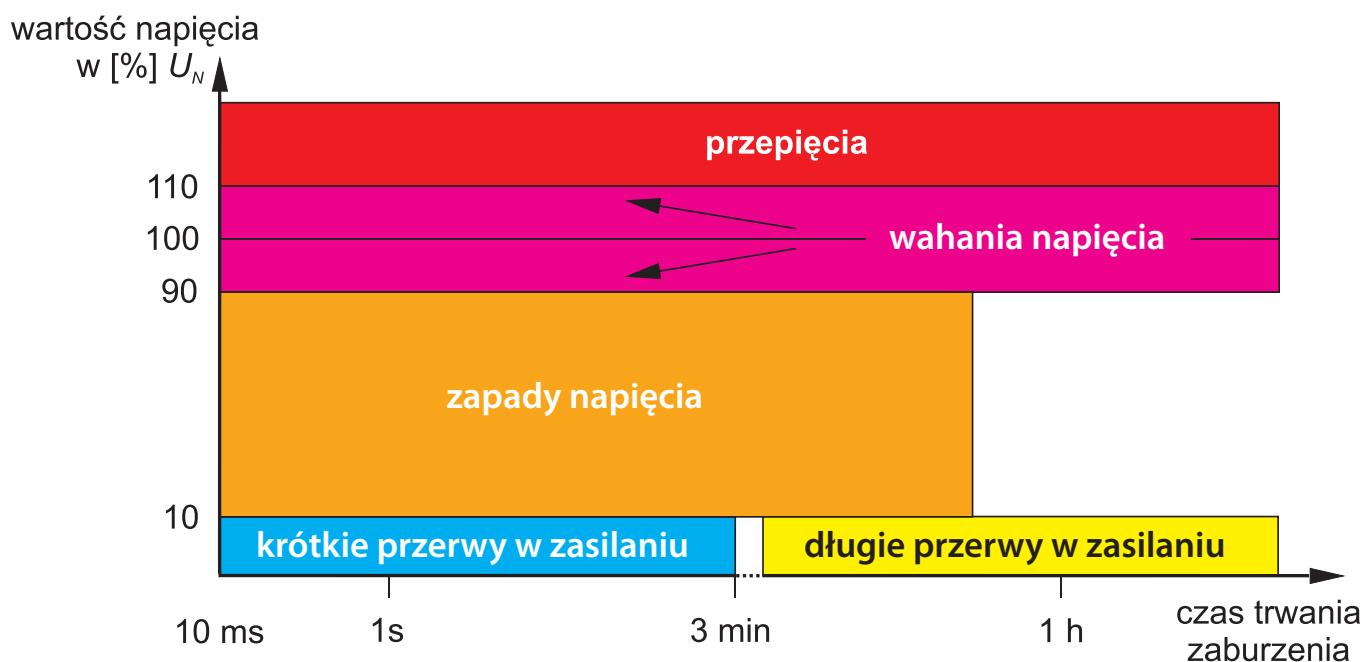
WAHANIA NAPIĘCIA

dr hab. inż. Zbigniew HANZELKA

W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące wahań napięcia w sieciach elektroenergetycznych i migotania światła. Opisano przyrząd pomiarowy służący do ilościowej oceny zaburzenia. Podano wskaźniki charakteryzujące wahania napięcia i wymagania norm dotyczące ich dopuszczalnych wartości. Rozwój energoelektroniki, a głównie technologii elementów półprzewodnikowych, pozwala obecnie na stosowanie, oprócz tradycyjnych sposobów redukcji skutków migotania światła, również przekształtnikowych, dynamicznych stabilizatorów napięcia o bardzo dużej szybkości działania i o znaczących mocach jednostkowych.

1. WPROWADZENIE

Na rysunku 1 przedstawiono klasyfikację wybranych zjawisk wpływających na wartość skuteczną napięcia. Różowym kolorem zaznaczono obszar zmian, będący przedmiotem rozważań w niniejszym artykule.



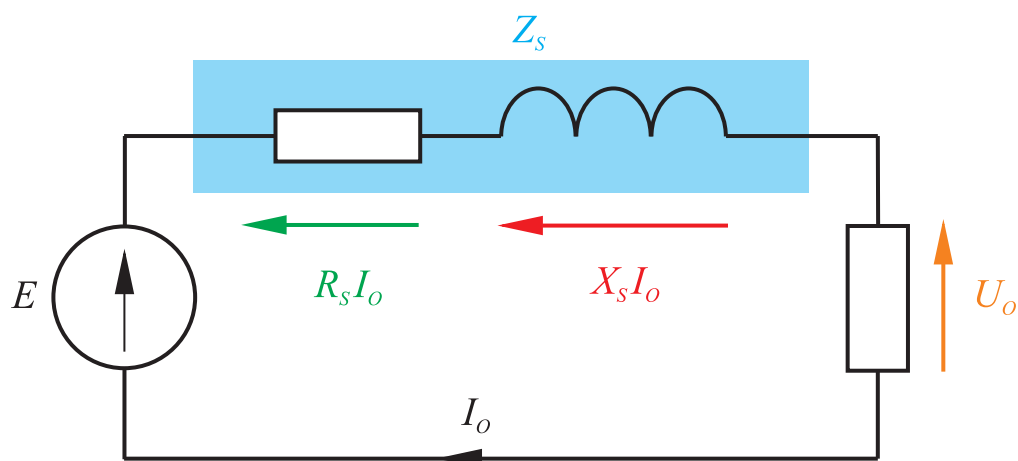
Rys. 1. Zjawiska wpływające na wartość skuteczną napięcia (U_N – napięcie znamionowe)

Napięcia na początku i końcu linii zasilającej różnią się pomiędzy sobą. Można to wykazać na podstawie prostego jednofazowego schematu zastępczego jak na rysunku 2, na którym: E jest napięciem źródłowym, U_0 – napięciem na zaciskach rozważanego odbiornika, I_0 – prądem, a Z_S , X_S , R_S – odpowiednio impedancją, reaktancją i rezystancją zastępczą linii zasilającej. Na podstawie wykresu wskazowego oraz prostych zależności geometrycznych można wyprowadzić zależność (1) określającą wartość różnicy napięć ΔU zdefiniowaną jak na rysunku (2b):

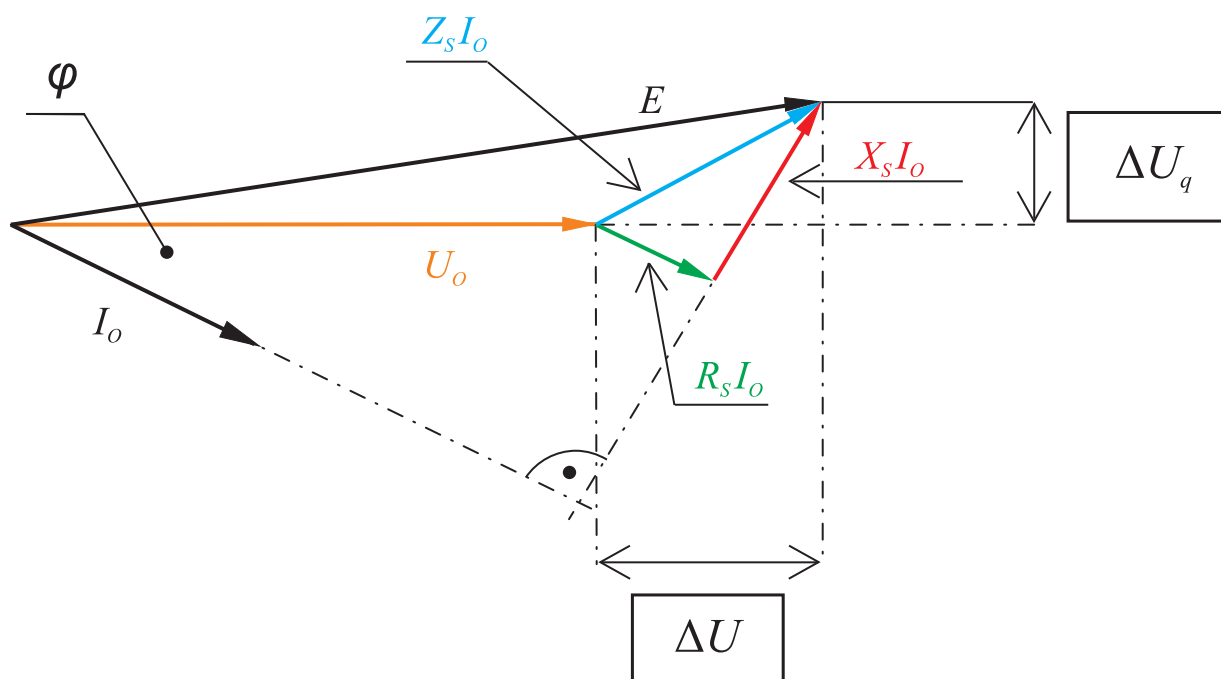
$$\frac{E - U_0}{U_0} \approx \frac{\Delta U_0}{U_0} = R_S \frac{P}{U_0^2} + X_S \frac{Q}{U_0^2} \quad (1)$$

gdzie P , Q są odpowiednio mocą czynną i bierną odbiornika.

a)



b)

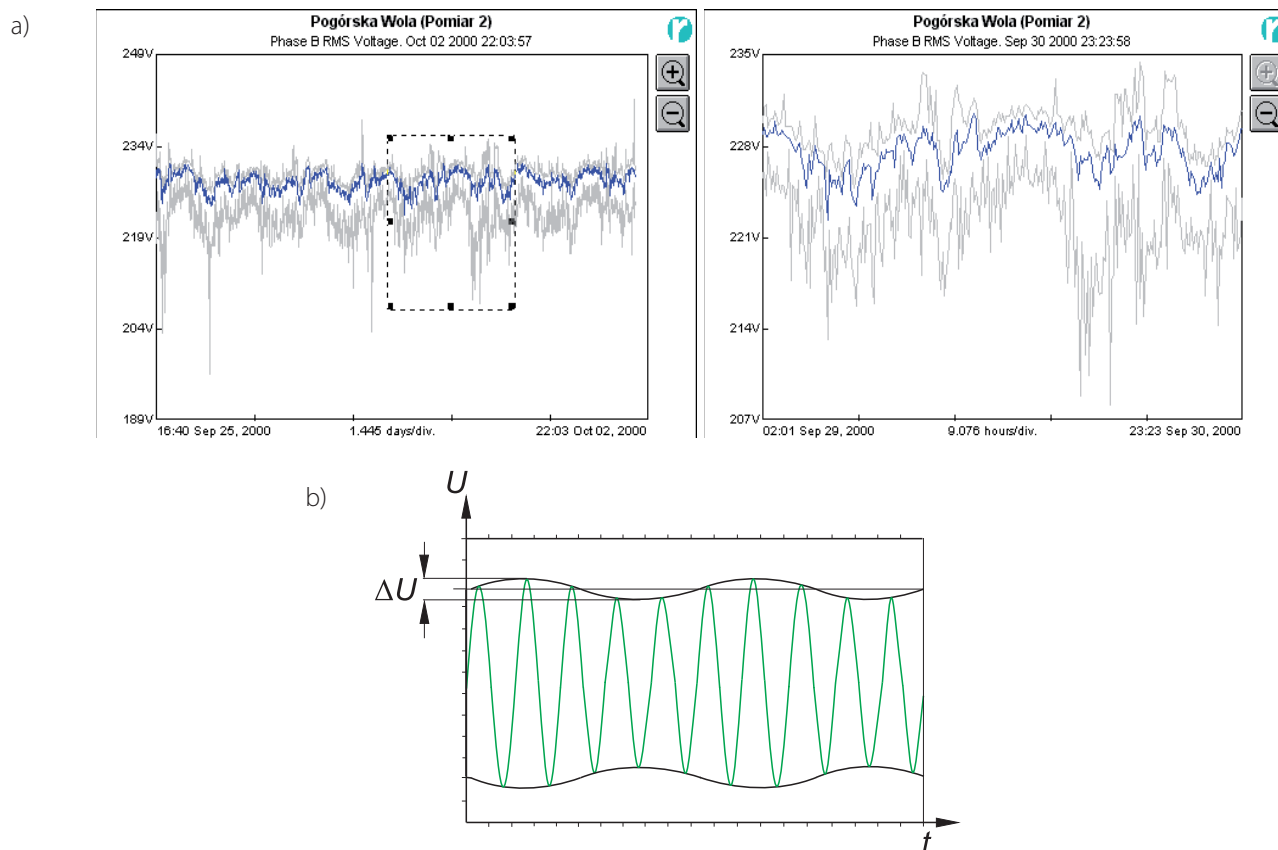


Rys. 2. a) Jednofazowy schemat zastępczy sieci zasilającej; b) wykres wskazowy dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego (ind.) - $E \geq U_0$,
dla odbiornika rezystancyjno-pojemnościowego (poj.) - $E \leq U_0$

Przyjmując, że wartość zastępczej rezystancji linii jest pomijalnie mała w porównaniu z jej reaktancją ($X_s \gg 10R_s$), co w praktycznych systemach zasilających wysokiego napięcia (WN) jest założeniem prawdziwym, otrzymuje się uproszczoną zależność opisującą względną wartość zmiany napięcia na odbiorczym końcu linii:

$$\frac{\Delta U}{U_0} \cong \frac{Q}{S_{ZW}} \quad (1a)$$

gdzie S_{ZW} jest mocą zwarciovą w punkcie przyłączenia odbiornika. Zmianę napięcia można sklasyfikować (ze względu na dynamikę przebiegu i przyczynę powstania), na: -odchylenie (spadek napięcia) mający stałą wartość w dłuższej skali czasu -oraz wahania napięcia. **Wahania napięcia to**, według międzynarodowego słownika elektrotechnicznego oraz polskiej normy terminologicznej [17], **seria zmian wartości skutecznej lub obwiedni przebiegu czasowego napięcia** (rys. 3).

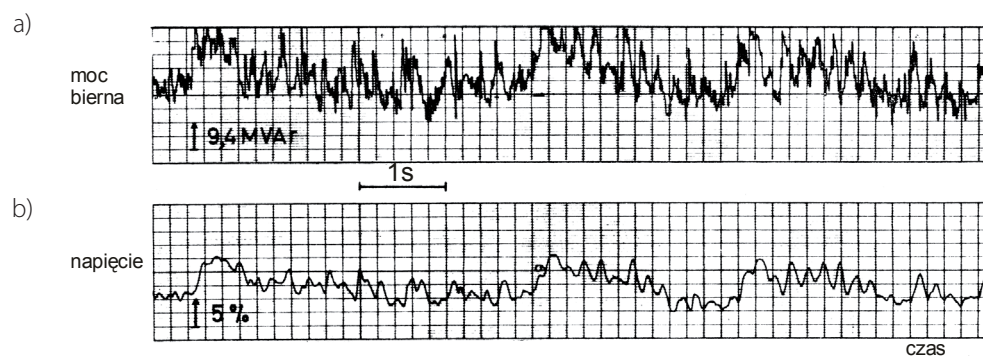


Rys. 3. Przykład wahań napięcia: a) w przebiegu wartości skutecznej; b) w przebiegu wartości chwilowej (modulacja 10 Hz)

W przypadku tego zaburzenia można mówić o **kształcie wahań napięcia** (obwiednia wartości szczytowych napięcia przedstawiona w funkcji czasu), **amplitudzie zmian napięcia** (różnica maksymalnej i minimalnej wartości skutecznej lub szczytowej napięcia występująca podczas zaburzenia) oraz **częstości** (częstotliwości dla przebiegów okresowych) **zmian napięcia** (liczba zmian napięcia występująca w jednostce czasu).

2. ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA

Podstawową przyczyną zmian napięcia, w tym również wahań, jest - jak wynika z zależności (1) - zmienność w czasie głównie mocy biernej odbiorników, określanych ogólnie mianem niespokojnych. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe zmiany wartości mocy biernej oraz wywołane tą mocą zmiany napięcia dla jednego z najbardziej zaburzających odbiorników, jakim jest piec łukowy. Podobny charakter mają zmiany wywołane pracą napędów elektrycznych dużej mocy, np. napędów walcowniczych, maszyn wyciągowych itp. Wahania napięcia są powodowane także przez procesy łączeniowe baterii kondensatorów, nieprawidłowości w pracy przełącznika zaczepów transformatora, rozruchy silników asynchronicznych, spawarki elektryczne (rys. 5), bojler, regulatory mocy, piły i młoty elektryczne, pompy i kompresory, windy, dźwigi, a więc ogólnie przez źródła o zmiennym obciążeniu, których moc jest znaczna w relacji do mocy zwarciowej w punkcie ich przyłączenia do systemu zasilającego. Źródłem wahań napięcia mogą być także w pewnych przypadkach (oświetlenie fluorescencyjne) interharmoniczne napięcia.



Rys. 4. Zmiany mocy biernej (a) i wahania napięcia (b) na szynach elektroinstalacji

3. SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA

Wahania napięcia występujące w sieciach elektroenergetycznych powodują szereg ujemnych skutków o charakterze techniczno-technologicznym i ergonomicznym. W sferze produkcyjnej jedne i drugie wywołują dodatkowe koszty. W dalszej części przedstawiono przykładowo kilka wybranych negatywnych efektów występowania wahań napięcia. Prócz wyszczególnionych, należy wspomnieć także o nieprawidłowościach w pracy aparatury stycznikowo-przełącznikowej, których ekonomiczne skutki bywają niekiedy ogromne.

3.1. Maszyny elektryczne

Wahania napięcia na zaciskach silnika asynchronicznego powodują zmiany momentu, w konsekwencji mają wpływ na poślizg silnika i proces technologiczny. W skrajnych przypadkach mogą prowadzić do wzmożonych drgań mechanicznych, a więc do obniżenia wytrzymałości mechanicznej i skrócenia czasu eksploatacji silnika. Wahania napięcia na zaciskach silników i prądnic synchronicznych prowadzą do kołysań i wcześniejszego zużycia wirników tych maszyn, wywołują dodatkowe momenty obrotowe, zmiany mocy i wzrost strat.

3.2. Przekształtniki

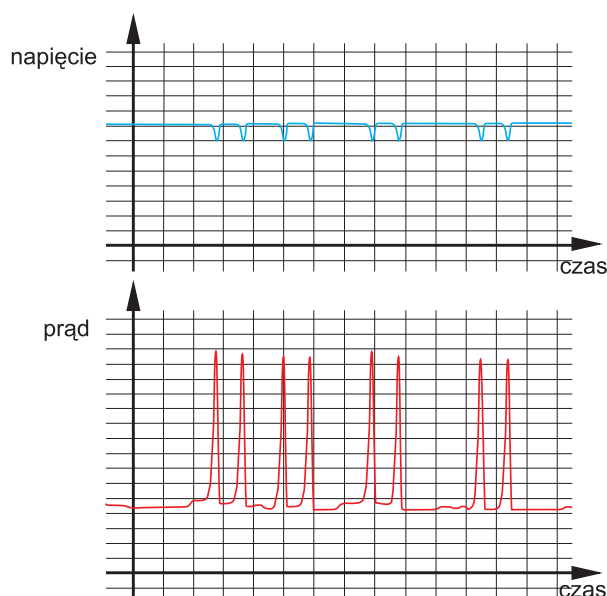
Zmiana napięcia zasilającego w przekształtnikach sterowanych fazowo z układem stabilizacji parametrów po stronie prądu stałego powoduje zmniejszenie współczynnika mocy i generację harmonicznych niecharakterystycznych i interharmonicznych. W przypadku napędu podczas hamowania zmiana napięcia może prowadzić do przerzutu falownikowego.

3.3. Urządzenia do elektrolizy

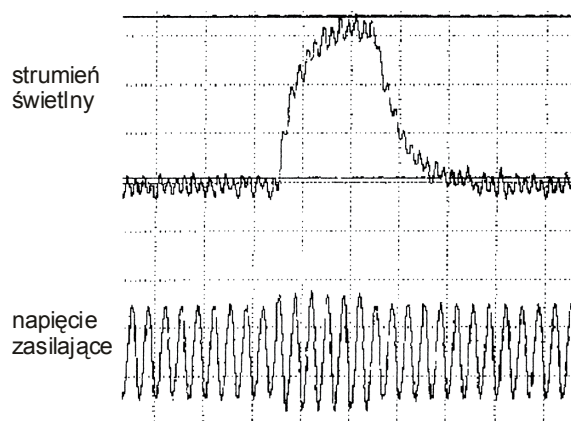
Występuje skrócenie czasu eksploatacji elektrod oraz zmniejszenie wydajności procesu technologicznego.

3.4. Urządzenia elektrotermiczne

W każdym przypadku następuje zmniejszenie wydajności - w przypadku pieca łukowego w następstwie wydłużenia czasu wytopu - lecz z reguły zauważalne jest to dopiero przy znaczących amplitudach wahań napięcia.



Rys. 5. Zmiana wartości skutecznej napięcia oraz prądu podczas procesu spawania



Rys. 6 Zmiana strumienia świetlnego żarówki wywołana zmianą napięcia zasilającego [7]

3.5. Źródła światła

Zmiana napięcia zasilającego wywołuje jako skutek zmianę strumienia świetlnego źródła światła, znaną jako zjawisko migotania światła (ang. *flicker*). Jest to subiektywne odczucie zmian strumienia świetlnego, którego luminancja lub rozkład spektralny podlega zmianom w czasie.

W tej grupie odbiorników na zmiany napięcia zasilającego szczególnie wrażliwe są żarowe źródła światła. W ich przypadku strumień świetlny Φ jest proporcjonalny do napięcia zgodnie z zależnością: $\Phi \sim U^\gamma$, gdzie wykładnik γ przyjmuje wartość z przedziału: 3,1-3,7 [9]. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowo zmianę strumienia świetlnego żarówki w reakcji na krótkotrwałą zmianę napięcia zasilającego.

Migotanie światła, spowodowane wahaniami napięcia, wpływa istotnie na ograniczenie zdolności widzenia i zmęczenie organizmu, powoduje pogorszenie samopoczucia i obniżenie jakości pracy. W skrajnych przypadkach może stać się bezpośrednią przyczyną wypadków przy pracy.

4. POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA

4.1. Metody pomiaru

Pomiar wahań napięcia jest potrzebny do:

- (a) sprawdzenia zgodności istniejących poziomów zjawiska z normami dot. kompatybilności elektromagnetycznej;
- (b) określenia poziomu emisji danego odbiornika i porównania go z wartościami dopuszczalnymi w normach.

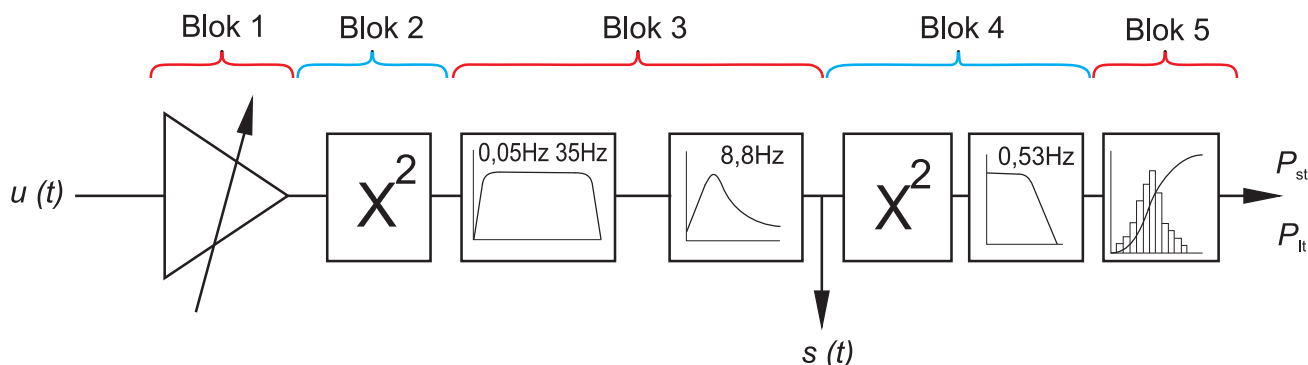
Można wyróżnić dwie podstawowe metody pomiarowe. Pierwsza polega na ilościowej ocenie zjawiska na podstawie czasowej zmiany wartości skutecznej lub obwiedni napięcia (zgodnie z klasycznymi wskaźnikami). Druga - na pomiarze pośrednim, tzn. pomiarze parametrów migotania światła będącego bezpośrednim skutkiem wahań napięcia. Badania związane z procesem percepcji wzrokowej liczą już ponad 40 lat [7]. W pierwszym okresie polegały głównie na przeprowadzaniu testów w wybranych grupach ludzi, reprezentatywnych dla populacji, z zastosowaniem różnych źródeł światła i różnych kształtów czasowych zmian napięcia. Wyznaczono na tej podstawie krzywą dostrzegania i krzywą uciążliwości (irytacji) zmian strumienia świetlnego. Udział fizjologów i psychologów w tych eksperymentach umożliwił opracowywanie coraz doskonalszych modeli matematycznych procesu neurofizjologicznego. Eksperymenty de Lange [7] pozwoliły po raz pierwszy postawić tezę o podobieństwie pomiędzy wrażliwością oka ludzkiego na bodźce świetlne a charakterystyką częstotliwościową analogu elektrycznego. Dalsze badania prowadzone przez Kelly'ego uwzględniały nie tylko amplitudę zmian, lecz także poziomy adaptacji oka do średniej luminancji. Duży wkład w rozwój tej gałęzi wiedzy wnieśli Rashbass, Koenderink i Van Doorn [7]. Ich badania doprowadziły bezpośrednio do opracowania miernika migotania UIE. W mierniku tym przyjęto jako sygnał wejściowy zmiany napięcia zasilającego źródło światła, a nie bezpośrednio zmiany strumienia świetlnego. To wymagało odtworzenia w przyrządzie procesu fizjologicznego postrzegania i tę rolę pełni model Rashbassa i Koenderinka (rys. 7, blok 3 i 4). Przeprowadzone przez nich badania wykazały, że oko ludzkie ma charakter filtru pasmowego (o paśmie 0,05 - 35 Hz), z maksymalnym współczynnikiem wzmocnienia (maksymalną czułością na zmiany strumienia świetlnego) dla częstotliwości 8-9 Hz. Dla żarowych źródeł światła odpowiada to wahaniom napięcia o amplitudzie około 0,3% wartości średniej. Skutki fizjologiczne zależą od amplitudy zmian strumienia świetlnego (amplitudy zmian napięcia zasilającego źródło światła), sekwencji powtórzeń, spektrum częstotliwościowego oraz czasu występowania zaburzenia. Reakcja mózgu na pobudzenie bodźcem świetlnym ma charakter całkujący z okresem całkowania około 300 ms. Oznacza to, że występuje śledzenie wolnych i „wygładzanie” szybkich zmian strumienia świetlnego. Np. dwie krótkie zmiany strumienia występujące w czasie 300 ms są postrzegane jako jedna zmiana. Bardziej dokuczliwe są zmiany strumienia świetlnego, dające krótki impuls świetlny, po którym występuje dłuższa przerwa. Zjawisko migotania światła jest bardziej dominujące w bocznych niż w bezpośrednich obrazach, na których skoncentrowana jest uwaga patrzącego. Zmiany strumienia świetlnego są wywoływane w taki sam sposób, niezależnie od rodzaju napięcia zasilającego źródło światła - zmiennego lub stałego.

4.2. Miernik migotania światła

W przypadku, gdy zmiany napięcia nie mają regularnego kształtu (typowego dla większości odbiorników przemysłowych), przyjmuje się jako wskaźnik wahań napięcia migotanie strumienia świetlnego żarowych źródeł światła. Celem pomiarowej oceny tego zjawiska jest określenie stopnia ludzkiej irytacji wywołanej zmianami strumienia świetlnego. W tym procesie można wyróżnić trzy zasadnicze elementy: źródło napięcia o zmiennej wartości, oko ludzkie i realizujący się w nim proces postrzegania oraz mózg z jego nieliniowymi (w funkcji częstotliwości) reakcjami. Dostępny do pomiarowej oceny jest tylko pierwszy składnik. Pozostałe muszą być modelowane. Tylko wówczas, gdy modelowanie tego złożonego układu będzie prawidłowe, możliwe będzie dedukowanie relacji pomiędzy zmianami napięcia (o różnych kształtach) a stopniem ludzkiej irytacji.

Te fakty, oraz cała złożoność procesu fizjologicznego postrzegania, zostały uwzględnione przy tworzeniu miernika migotania Międzynarodowej Unii Elektrotechnologii (UIE). Umożliwia on ocenę zjawiska migotania światła (wiarygodne wskazania reakcji obserwatora) niezależnie od kształtu wahań napięcia i źródła zaburzenia. Opracowana specyfikacja techniczna została poddana międzynarodowej dyskusji w ramach IEC i opublikowana jako norma IEC 61000-4-15 (w Polsce PN EN 61000-4-15). Miernik UIE

powstał jako rezultat międzynarodowej współpracy i wynik doświadczeń uzyskanych przy konstrukcji i eksploatacji innych wcześniejszych przyrządów. Rysunek 7 przedstawia jego uproszczony schemat blokowy. W strukturze przyrządu można wyróżnić pięć bloków funkcjonalnych.



Rys. 7. Schemat blokowy miernika migotania światła UIE

Blok 1

W bloku tym z sygnału proporcjonalnego do zmiennej w czasie skutecznej wartości napięcia zasilającego $u(t)$ uzyskiwana jest informacja o względnych zmianach (wahaniach) napięcia - $d(t) = U/U_{sr}$ - przy czym U_{sr} jest uśrednioną wartością skuteczną napięcia wyznaczoną w trakcie każdej ostatniej minuty podczas realizacji pomiaru. Pozwala to na śledzenie wolnych zmian spowodowanych np. procesami regulacji napięcia realizowanymi w systemie zasilającym. Nie są one postrzegane jako migotanie, ponieważ oko ludzkie może je śledzić poprzez zmianę średnicy źrenicy. Układ wejściowy w bloku 1 zapewnia również odpowiedni poziom izolacji przyrządu oraz skalowanie sygnału wejściowego do bloku 2. Zawiera również generator sygnałów dla kalibracji miernika.

Kolejne bloki: 2, 3 i 4 stanowią model układu: żarowe źródło światła - oko ludzkie - mózg.

Blok 2 (demodulator)

Użytecznym sygnałem dla przyrządu jest względna zmiana napięcia, która może być interpretowana jako sygnał modulujący nałożony na 50 Hz przebieg nośny. Zachodzi potrzeba wyznaczenia sygnału modulującego, stąd obecność demodulatora w schemacie blokowym miernika. Podnoszenie do kwadratu sygnału wejściowego jest równoznaczne z odtworzeniem kwadratu wartości skutecznej sygnału, co w sposób bezpośredni można odnieść do mocy żarowego źródła światła. Użycie „kwadratowego” demodulatora jest uzasadnione łatwością jego technicznej realizacji oraz zadowalającą skutecznością działania.

Blok 3

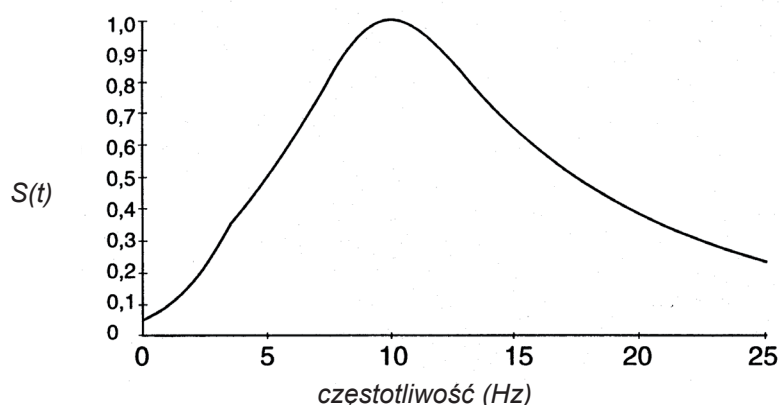
Pierwszy filtr eliminuje składową stałą oraz inne niepożądane składowe sygnału wyjściowego demodulatora. Charakterystyka częstotliwościowa układu: żarowe źródło światła (230 V, 60 W – parametry, które uznano za najbardziej powszechne), oko ludzkie, została odtworzona w przyrządzie za pomocą filtru pasmowoprzepustowego 4. rzędu o transmitancji operatorowej określonej zależnością (2) i charakterystyce częstotliwościowej przedstawionej na rysunku 8.

$$H_{230V}(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)}, \quad (2)$$

gdzie:

$$k = 1,74802, \quad \lambda = 2\pi 4,05981, \quad \omega_1 = 2\pi 9,15494, \\ \omega_2 = 2\pi 2,27979, \quad \omega_3 = 2\pi 1,22535, \quad \omega_4 = 2\pi 21,9.$$

Postać tej transmitancji i przebieg jej charakterystyki częstotliwościowej jest właściwy wyłącznie dla lamp żarowych o napięciu 230V. Dla innych rodzajów źródeł światła np. lamp fluorescencyjnych, należy stosować inną postać transmitancji.



Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa filtra ważonego miernika migotania światła UIE; $S(t)$ – sygnał wyjściowy bloku 3 na rysunku 7

Blok 4 (nieliniowa reakcja mózgu)

Model percepcji wzrokowej Rashbassa zawiera, prócz filtra ważonego, również funkcję podnoszenia do kwadratu oraz funkcję całkowania tak otrzymanego sygnału realizowaną za pomocą filtra dolnoprzepustowego pierwszego rzędu o stałą czasowej, wynoszącej około 300 ms. Wyjście z bloku 4 – sygnał proporcjonalny do zmian napięcia, ważonych przez czułość układu: żarówka - oko - mózg, reprezentuje chwilowy poziom migotania. Jest on przekształcony w wartość względną w efekcie podzielenia przez wartość odpowiadającą progowi postrzegania migotania światła. Większa od 1 wartość sygnału wyjściowego bloku 4 oznacza, że intensywność migotania przekroczyła poziom postrzegania i może być uciążliwa lub nawet nietolerowana.

Blok 5 (statystyczna ocena uciążliwości migotania)

Ze znajomości mechanizmu postrzegania wynika, że migotanie powinno być oceniane w odpowiednio znaczącym okresie. Dodatkowo, ze względu na losowy charakter zjawiska, należy założyć, że w czasie obserwacji chwilowa wartość będzie się zmieniała w szerokim przedziale w sposób losowy. Wynika stąd potrzeba oceny statystycznej i kontroli nie tylko maksymalnego poziomu, lecz także, w jakim procentowo czasie obserwacji dany poziom migotania jest przekroczony. Analiza statystyczna wymaga zatem ustalenia relacji pomiędzy liczbowymi wartościami określającymi poziom migotania i czasami ich występowania. W tym celu, na podstawie sygnału wyjściowego $S(t)$ z bloku 4, miernik wyznacza dwa statystyczne wskaźniki: tzw. wskaźnik krótkookresowego migotania (ang. *short-term flicker severity value*) - P_{st} , i wskaźnik długookresowego migotania (ang. *long-term flicker severity value*) - P_{lt} . Te dwie wielkości tworzą bezwymiarowe jednostki zaakceptowane przez międzynarodową społeczność naukową. Wskaźnik $P_{st} = 1$ odpowiada progowi postrzegania, granicy migotania, która nie powinna być przekroczona, aby nie powodować dyskomfortu psychicznego obserwatora. Ustalenie wartości wskaźnika P_{st} wymaga:

1. Pomiaru chwilowych poziomów migotania i ich klasyfikacji wg wartości - rysunek 9a.
2. Wyznaczenia tzw. funkcji skumulowanego prawdopodobieństwa CPF (ang. *cumulative probability function*) - rysunek 9b. Rysunek przedstawia przykładowy przebieg funkcji CPF, gdzie dla czytelności prezentacji wyróżniono niewielką liczbę klas wartości. Funkcja CPF jest typową krzywą uporządkowanych prawdopodobieństw nieprzekroczenia określonych wartości (poziomów), występujących w odpowiednim czasie. Kształty krzywych CPF znacznie różnią się pomiędzy sobą dla rozmaitych rodzajów wahań napięcia, stąd wynika potrzeba sformułowania jednoznacznej, obiektywnej, a zarazem prostej metody ich interpretacji i wartościowania.
3. Określenia wartości wskaźnika krótko- i długookresowego migotania światła.

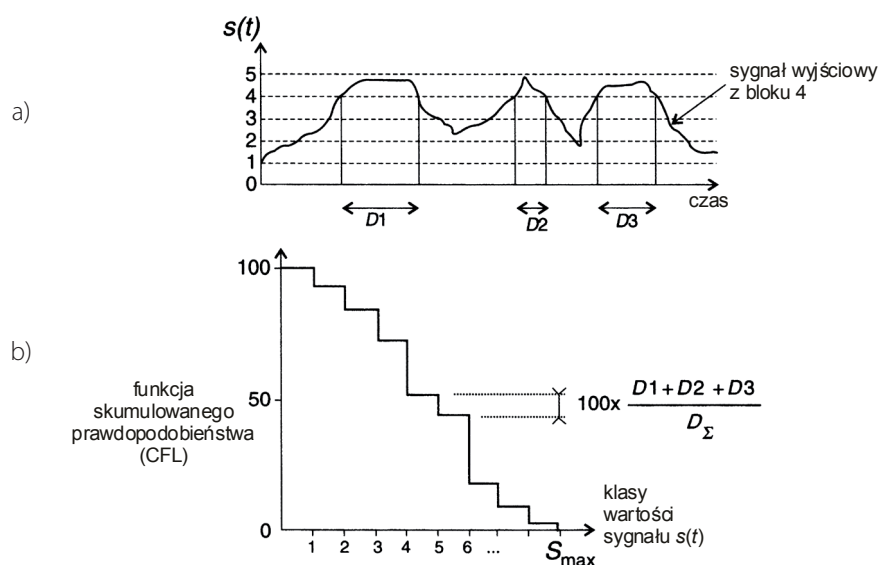
Czas obserwacji

Podstawą określenia wartości wskaźników migotania może być cykl pracy zaburzającego odbiornika. Uwzględniając jednakże dużą ich różnorodność należało znaleźć pewną wspólną miarę czasu. Po uwzględnieniu podstaw fizjologicznej percepcji wzrokowej oraz na podstawie testów wrażliwości przeciętnego obserwatora, przyjęto dwa przedziały obserwacji:

- **krótki okres obserwacji wynoszący dziesięć minut; jest to czas dostatecznie długi, aby krótkotrwałe, sporadycznie występujące zmiany napięcia nie miały zbyt znaczącego wpływu na ostateczny wynik pomiaru, a wystarczająco krótki, aby umożliwić szczegółowy opis odbiornika zaburzającego o długim cyklu pracy;**

- długi czas obserwacji wynoszący dwie godziny; jest to czas dostatecznie długi, aby umożliwić analizę odbiorników przemysłowych charakteryzujących się z reguły długim cyklem pracy, szczególnie o losowym jego charakterze.

Te dwa wskaźniki dają bardzo różny wgląd w zjawisko migotania światła i gwarantują komplementarność oceny zaburzenia w punkcie pomiarowym.



Rys. 9: (a) ilustracja sposobu wyznaczania czasu występowania migotania na różnych poziomach wartości - jako przykład wyróżniono 4 klasę wartości ($T_4 = \sum_{i=1}^3 t_i$); (b) Funkcja skumulowanego prawdopodobieństwa (CPF) sygnału o wartościach zawartych w wyróżnionych klasach (D_{Σ} - całkowity czas pomiaru)

Wskaźnik krótkookresowego migotania światła (P_{st})

Wyznaczany jest zgodnie z zależnością:

$$P_{st} = \sqrt{k_{0,1}P_{0,1} + k_1P_1 + k_3P_3 + k_{10}P_{10} + k_{50}P_{50}} \quad (3)$$

gdzie:

$k_{0,1} \dots k_{50}$ współczynniki wagowe, których wartości wynikają z przyjętych procedur obliczeniowych;

$P_{0,1} \dots P_{50}$ poziomy migotania (wartości sygnałów wyjściowych z bloku 4), dla których określone jest prawdopodobieństwo ich przekroczenia.

Jako wystarczające (z praktycznego punktu widzenia) uznano 5 poziomów lub inaczej percentyli (ang. *gauge points*). Są to:

$P_{0,1}$ - poziom przekroczony w trakcie 0,1% czasu obserwacji; współczynnik wagi $k_{0,1} = 0,0314$

P_1 - poziom przekroczony w trakcie 1% czasu obserwacji; współczynnik wagi $k_1 = 0,00525$

P_3 - poziom przekroczony w trakcie 3% czasu obserwacji; współczynnik wagi $k_3 = 0,0657$

P_{10} - poziom przekroczony w trakcie 10% czasu obserwacji; współczynnik wagi $k_{10} = 0,28$

P_{50} - poziom przekroczony w trakcie 50% czasu obserwacji; współczynnik wagi $k_{50} = 0,08$

Wszystkie współczynniki wagowe są dodatnie, co gwarantuje stabilność wyznaczonych na ich podstawie wskaźników migotania. Badania praktyczne wykazały, że w pewnych przypadkach, w następstwie głównie operacji łączeniowych, w systemie może wystąpić skokowa, znacząca zmiana wartości jednego z percentyli i w konsekwencji znacząca zmiana wartości wskaźnika migotania. Mimo że takie przypadki w praktyce są mało prawdopodobne, uwzględniono je również w metodzie pomiarowej. W tym celu dla wyznaczenia przyjętych poziomów uwzględniono dodatkowe punkty pomocnicze na krzywej skumulowanego prawdopodobieństwa, uzyskując w ten sposób tzw. „gładzone” wartości, a więc o większym stopniu odporności na nagłe zmiany stanu pracy źródeł wahań napięcia.

Uwaga: percentyl oznacza " $\leq$ "

Indeks (s) wskazuje, że dany percentyl podlega operacji wygładzenia na podstawie następujących zależności:

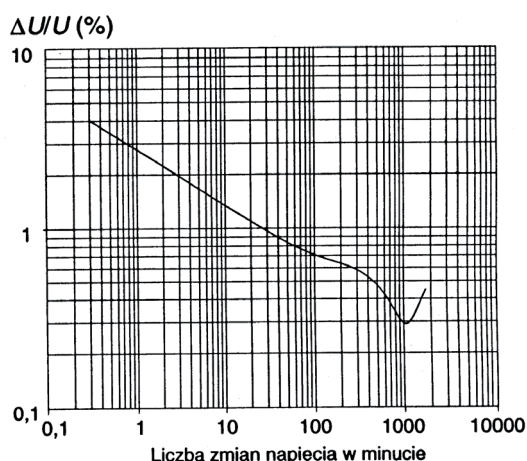
$$\begin{aligned} P_{50} &= P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3, \\ P_1 &= P_{1s} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3, \\ P_{10} &= P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5, \\ P_3 &= P_{3s} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3, \end{aligned} \quad (4)$$

przy czym $P_{0,7} \dots P_{80}$ oznaczają poziomy migotania, których wartości nie są przekroczone odpowiednio w ciągu 0,7 ... 80% czasu obserwacji. Percentyl $P_{0,1}$ nie może zmieniać w sposób nagły swojej wartości ze względu na 0,3-sekundową stałą czasową, przyjętą w mierniku. Nie wymaga więc dodatkowej operacji gładzenia.

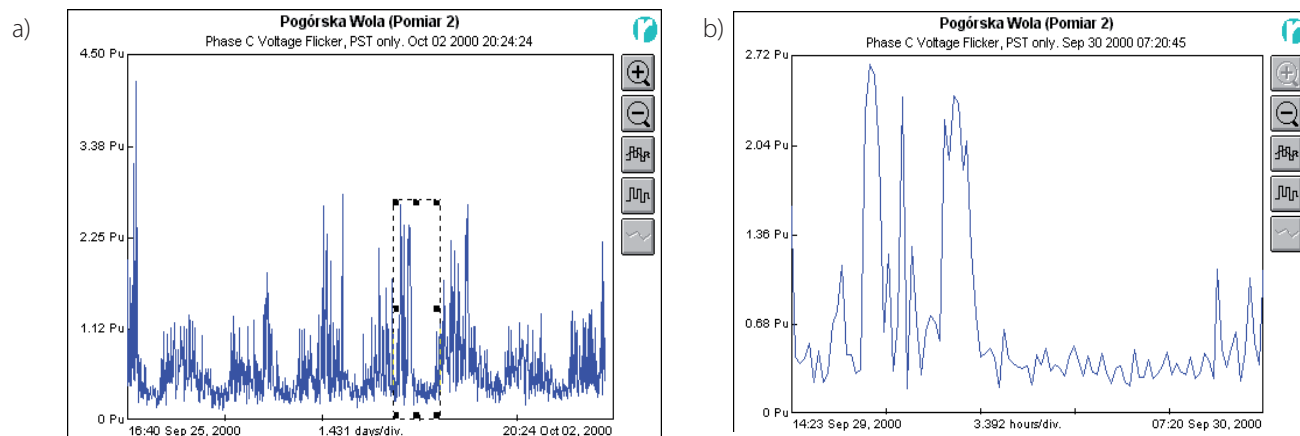
Należy zauważyć, że nie jest rozważana maksymalna wartość migotania, może być ona bowiem zbyt restrykcyjna. Szczytowa wartość występująca w krótkim czasie nie niesie prawdziwej informacji o szkodliwości zjawiska. Punkt referencyjny 50% określa poziom migotania, który może być przekroczony w trakcie połowy czasu obserwacji, charakteryzując w ten sposób średni poziom uciążliwości zjawiska i informując o rzędzie wartości zaburzenia.

Algorytm został wykorzystany do określenia przebiegu krzywej $P_{st}=1$ w przypadku prostokątnych, równo odległych zmian napięcia. Jest ona przedstawiona na rysunku 10. Badania przeprowadzone przez UIE wykazały, że większość ich uczestników uznała wahania napięcia odpowiadające współczynnikowi $P_{st} \geq 1$ za uciążliwe.

Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe tygodniowe zmiany wartości współczynnika P_{st} dla odbiorcy komunalnego zasilanego z sieci niskiego napięcia.



Rys. 10 Krzywa $P_{st} = 1$ (dla prostokątnych, równo odległych zmian napięcia) [13]



Rys. 11. a) Przykładowe, tygodniowe zmiany wartości wskaźnika P_{st} dla odbiorcy komunalnego; b) powiększenie wybranego fragmentu, na którym wyraźnie widać zmianę wartości współczynnika w okresach 10 minutowych

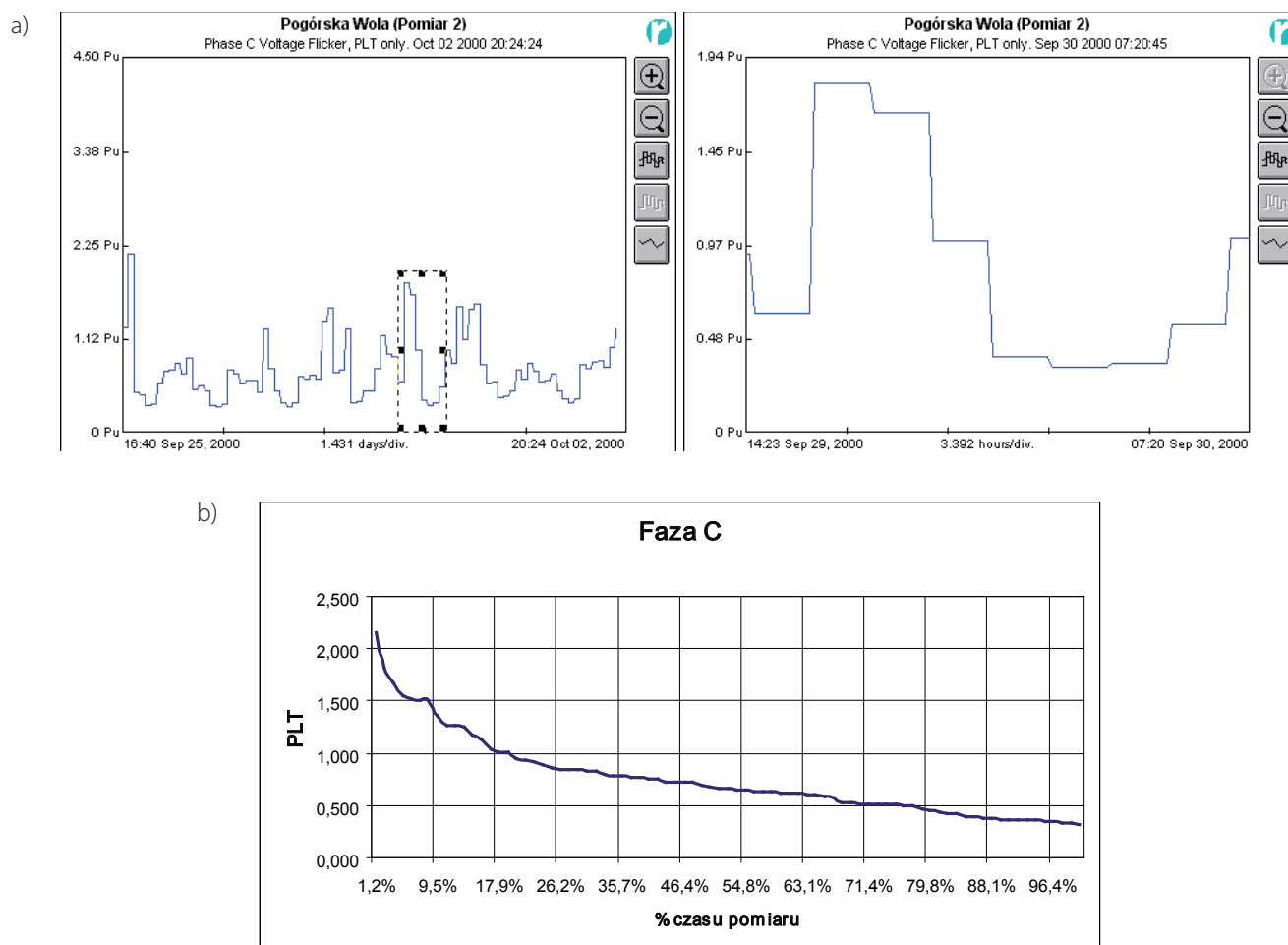
Wskaźnik długookresowego migotania światła (P_{lt})

Dziesięciominutowy okres, będący podstawą wyznaczania wskaźnika krótkookresowego migotania, jest odpowiedni do oceny zaburzeń powodowanych pracą pojedynczych odbiorników, tj. walcowni, pomp, sprzętu domowego itp. W przypadku, gdy ocenie poddawany jest sumaryczny zaburzający efekt pracy kilku odbiorników, o losowym charakterze, lub gdy rozważany jest odbiornik o długim cyklu pracy (np. piec łukowy) niezbędny jest wskaźnik długookresowej oceny zaburzenia. Wykorzystano do tego celu technikę opartą na analizie zbioru dziesięciominutowych wartości P_{st} przyjmując jako wskaźnik długookresowego migotania następującą wielkość:

$$P_{lt} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N P_{st,i}^3}{N} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

gdzie $P_{st,i}$ są kolejnymi wartościami P_{st} w rozważanym czasie obserwacji zjawiska. Powszechnie przyjmuje się wartość $N=12$. Oznacza to, że wskaźnik uciążliwości migotania wyznaczany jest na podstawie pierwiastka trzeciego rzędu z 12 kolejnych wskaźników krótkookresowego migotania w ciągu 2 godzin.

Na rysunku 12a przedstawiono tygodniowe zmiany wartości współczynnika P_{lt} dla odbiorcy komunalnego (jak na rys. 11). Rysunek 12b przedstawia charakterystykę uporządkowaną. Widać, że w ciągu 95% czasu obserwacji (95% tygodnia) wartość współczynnika przekroczyła 1, co zgodnie np. z normą PN EN 50160 jest wartością graniczną. W świetle tej normy, z punktu widzenia wahań napięcia, warunki zasilania rozpatrywanego odbiorcy są nieprawidłowe.



Rys. 12. Zmiany w czasie wartości współczynnika (a), P_{lt} oraz charakterystyka uporządkowana (b)

5. NORMALIZACJA

Migotanie światła jest szczególnym zaburzeniem, szczególnym ze względu na fakt, że uwidacznia się ono jedynie w oświetleniu na poziomie niskiego napięcia. Ta konstatacja znajduje swoje odzwierciedlenie w dwóch zasadach przyjętych w standaryzacji:

- obligatoryjne jest rozważanie migotania światła na poziomie niskiego napięcia, dla którego definiowane są poziomy emisji i kompatybilności;
- nie jest rozważany poziom migotania w sieciach zasilających nie zawierających czułych na wahania napięcia źródeł światła. Dotyczy to w szczególności niektórych przemysłowych sieci rozdzielczych, w przypadku których wskaźnik P_{st} może przekraczać wartość 1. Istotny, z normalizacyjnego punktu widzenia, jest poziom migotania w punkcie przyłączenia najbliższego (w stosunku do źródła zaburzenia) odbiornika, który jest wyposażony w oświetlenie żarowe.

Standaryzacja dopuszczalnych poziomów rozważanego zjawiska wprowadza trzy różne pojęcia: poziom emisji, poziom kompatybilności i poziom odporności.

5.1. Poziomy kompatybilności

PN EN 50160	1998	CHARAKTERYSTYKI NAPIĘCIA W PUBLICZNYCH SIECIACH ZASILAJĄCYCH
-------------	------	--

Dokument (analogiczne Rozporządzenie systemowe ... do Prawa Energetycznego) nakłada ograniczenia jedynie na długookresowy wskaźnik migotania P_{lt} . Warto podkreślić dwie jego cechy:

- Wskaźnik P_{lt} jest wyznaczany w ciągu dwóch godzin na podstawie 12 kolejnych wartości P_{st} (zależność 5). Oznacza to, że w wymaganym tygodniowym czasie pomiarów otrzymuje się zbiór 84 wartości P_{lt} . Dokument określa wartość graniczną, która nie powinna być przekroczona w trakcie 95% okresu pomiaru. Oznacza to, że długookresowy wskaźnik migotania może przekroczyć (nawet bardzo znacznie) wymaganą wartość 1 podczas 8 godzin w tygodniu. Postanowienie to jest rezultatem kompromisu, który musiał również uwzględnić obszary Europy o gorszych warunkach dostawy energii.
- Teoretycznie jest możliwa sytuacja w której P_{st} może osiągnąć wartość 12 w pierwszych 10 min. pomiaru i zero podczas następnych 110 min. Obliczona dla takiego okresu wartość P_{lt} będzie spełniać wymogi normy ($P_{lt} = 1$). Z tego punktu widzenia postanowienia normy są łagodne.

Określone w dokumencie wartości nie mogą być traktowane jako graniczne wartości emisji migotania dla odbiorcy energii, w tych bowiem przypadkach standard powinien być znacznie bardziej restrykcyjny i przyjmować za podstawę decyzji zarówno wskaźnik krótko-, jak i długookresowego migotania.

Dokument dotyczy jedynie normalnych warunków pracy sieci zasilającej. W innych przypadkach można się spodziewać przekroczenia poziomów kompatybilności i wówczas dostawca energii określa graniczne wartości w zależności od okoliczności i stosowanych preferencji.

5.2. Wytyczne UIE „Przyłączenie odbiorników niespokojnych”

W wielu krajach istnieją narodowe wytyczne, których postanowienia są często oparte na wytycznych UIE - tablica 1. Istnieje opinia, że wymagania te są w praktyce zbyt restrykcyjne.

Tablica 1.

Sieć	nn	SN	WN
P_{st} (max)	1,0	1,0	0,79
P_{lt} (max)	0,74	0,74	0,58

Według wytycznych UIE rekomendowane są następujące procedury przyłączenia odbiorników niespokojnych do sieci zasilającej:

- bez zastrzeżeń przyłączane są odbiorniki małej mocy (mniejszej od 1/1000 mocy zwarciowej w PWP, lub które wywołują wahania napięcia o wartości mniejszej niż 0,2%);
- przyłączenie odbiorników większej mocy jest uzależnione od istniejących warunków zasilania;
- istnieje możliwość wydania warunkowej zgody na przyłączenie w przypadku odbiorników przekraczających w niewielkim stopniu obowiązujące wartości graniczne.

W odniesieniu do sieci wysokiego napięcia dokument proponuje wprowadzenie tzw. poziomów planowanych. Nie są one bezpośrednio odniesione do poziomów odporności, mają jedynie służyć koordynacji pracy różnych elementów systemu zasilającego. Są ustalane przez dostawcę energii w zależności od istniejących, lokalnych warunków pracy systemu

i przewidywanych zmian. Proponowane wartości to: $P_{st} = 0,8$ i $P_{lt} = 0,6$. Przy przeliczaniu tych wartości na inne poziomy napięcia należy uwzględnić odpowiednie współczynniki tłumienia.

6. SPOSOBY REDUKCJI WAHAŃ NAPIĘCIA

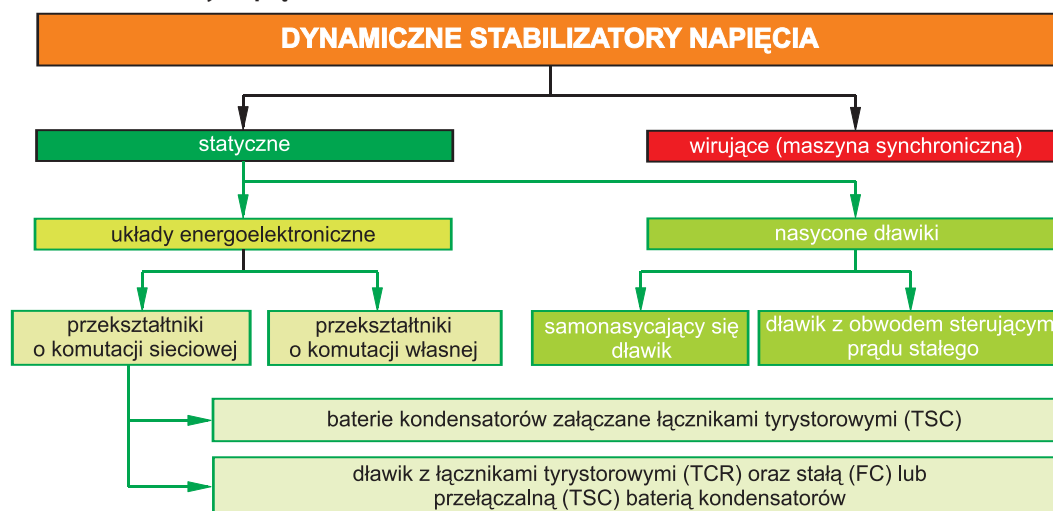
Skutki oddziaływania wahań napięcia zależą przede wszystkim od ich amplitudy oraz od częstości występowania. O ile na amplitudę ma wpływ między innymi układ zasilający odbiorniki niespokojne, o tyle częstość występowania wahań zależy od rodzaju odbiornika i charakteru jego pracy. O częstości występowania wahań decyduje więc proces technologiczny. Jak dotychczas, stosuje się przede wszystkim metody ograniczania amplitud wahań napięcia, w mniejszym stopniu ingeruje się w proces technologiczny. Przykładem tych ostatnich działań mogą być przykładowo:

- w przypadku pieca łukowego – dodanie szeregowego dławika (również o zmiennym stopniu nasycenia), właściwa praca automatyki przesuwu elektrod, segregacja i wstępne przygotowanie wsadu, domieszkowanie elektrod itp.: są to sposoby dobrze znane technologom-metallurgom;
- w przypadku linii spawalniczej – wydzielanie dla zasilania linii odrębnego transformatora, przyłączenie wielu jednofazowych agregatów spawalniczych do sieci trójfazowej z symetrycznym rozdziałem obciążeń pomiędzy poszczególne fazy, przyłączenie jednofazowej spawarki do fazy, która nie jest obciążona odbiornikami oświetleniowymi itp.

Jak wynika z zależności (1a) amplitudę wahań napięcia można ograniczyć dwoma sposobami:

- **zwiększając moc zwarciovą** w punkcie przyłączenia odbiornika niespokojnego (w stosunku do mocy odbiornika); w praktycznych działaniach oznacza to: (a) przyłączanie odbiornika do szyn o coraz wyższym napięciu znamionowym, (b) wydzielanie specjalnych, dedykowanych linii bezpośrednio z sieci WN do zasilania tej kategorii odbiorników, zasilanie odbiorników spokojnych i niespokojnych z oddzielnych uzwojeń transformatorów trójzwojennych lub oddzielnych transformatorów (separacja odbiornika niespokojnego), (c) zwiększanie mocy transformatora zasilającego odbiornik niespokojny, (d) instalowanie kondensatorów szeregowych itp.
- **zmniejszając zmiany mocy biernej** w sieci zasilającej poprzez instalację tzw. kompensatorów/ stabilizatorów dynamicznych.

6.1. Dynamiczne stabilizatory napięcia



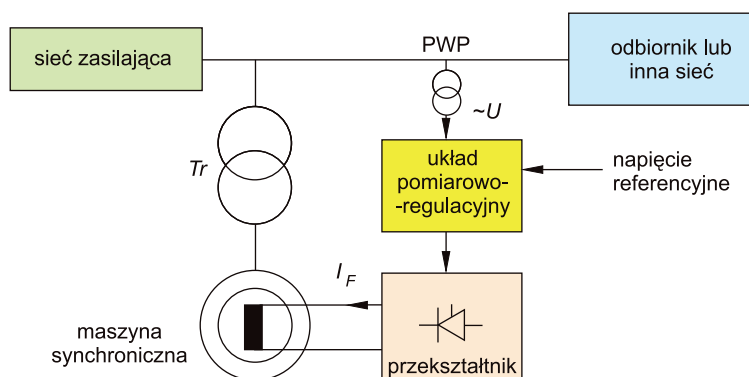
Rys. 13. Klasyfikacja dynamicznych stabilizatorów napięcia

Dynamiczne stabilizatory są jednym z technicznie możliwych sposobów eliminacji zmian napięcia lub redukcji ich wartości. Skuteczność działania zależy głównie od ich mocy znamionowej oraz amplitudy zmian napięcia (przy założeniu okresowości ich występowania). Powodując przepływ prądu/mocy biernej podstawowej harmonicznej wywołują spadki napięcia na impedancjach sieci zasilającej. W zależności od charakteru prądu biernego (indukcyjny lub pojemnościowy) powoduje to wzrost lub zmniejszenie wartości skutecznej napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP).

Rysunek 13 przedstawia klasyfikację różnych rozwiązań dynamicznych stabilizatorów napięcia. Są to głównie układy trójfazowe o znacznej mocy znamionowej, przeznaczone do stabilizacji napięcia w punkcie węzłowym sieci rozdzielczej lub stabilizacji napięcia wyróżnionego odbiornika/grupy odbiorników w PWP. Ponieważ układy te bardzo często pełnią także funkcję dynamicznych kompensatorów mocy/prądu biernego podstawowej harmonicznej, pojęcia: stabilizator i kompensator używane bywają zamiennie.

6.1.1. Maszyna synchroniczna

Maszyny synchroniczne są tradycyjnym źródłem regulowanej w sposób ciągły mocy biernej podstawowej harmonicznej (indukcyjnej lub pojemnościowej). Mogą być równocześnie źródłem energii mechanicznej w przypadku pracy maszyn nie tylko jako kompensator, lecz również jako napęd. Przykładowy schemat instalacji, w której wykorzystano maszynę synchroniczną do stabilizacji napięcia, przedstawia rysunek 14. Stosowanie maszyny synchronicznej bez układów regulacji prądu wzbudzenia jest niecelowe, dla osiągnięcia bowiem dopuszczalnego normami poziomu zmian napięcia niezbędna byłaby maszyna o znamionowej mocy wielokrotnie przekraczającej moc odbiornika, którego napięcie podlega stabilizacji. Ten fakt wraz z wymaganiem dobrej dynamiki procesu stabilizacji uzasadnia potrzebę pracy maszyny synchronicznej w zamkniętym układzie stabilizacji napięcia. Obwód wzbudzenia zasilany jest wówczas z trójfazowego nawrotnego układu przekształtnikowego (rys. 14).



Rys. 14. Schemat układu stabilizacji napięcia z zastosowaniem maszyny synchronicznej

Napięcie zasilające obwód wzbudzenia, o odpowiednio dużej wartości w relacji do napięcia znamionowego, pozwala uzyskać dużą szybkość zmian prądu biernego maszyny synchronicznej. Możliwy jest również zwrot energii pola magnetycznego przy odwzbudzaniu.

W przeciwieństwie do kompensatorów statycznych, w przypadku maszyny synchronicznej nie należy przyjmować za kryterium jakości działania (w stanach dynamicznych) czasu reakcji, lecz szybkość zmian prądu/mocy biernej. Wielkość ta jest również miarą szybkości korygowania przez kompensator zmian napięcia w PWP. W przybliżeniu jest ona równa szybkości zmian prądu wzbudzenia i jest większa przy odwzbudzaniu niż przy dowzbudzaniu maszyn. Zależy od wielu różnych czynników, tj. cech konstrukcyjnych maszyny, dopuszczalnej maksymalnej wartości napięcia wzbudzenia, przyjętego współczynnika napięciowego forsowania itp.

6.1.2. Kompensatory statyczne

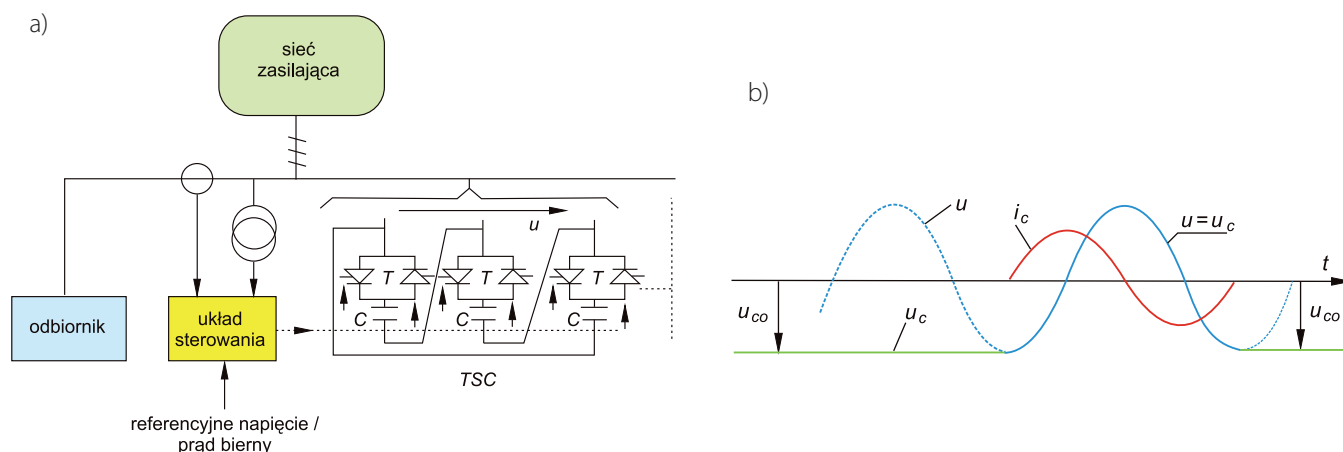
W większości przypadków (z wyłączeniem „energoelektronicznych” źródeł prądu biernego) statyczne kompensatory wykorzystują elementy bierne pojemnościowe i/lub indukcyjne załączane, sterowane fazowo lub o zmiennym stopniu nasycenia rdzenia. Wywołują one przepływ, wymaganego ze względów stabilizacyjnych, prądu biernego w sposób dyskretny lub częściej w sposób ciągły. W wielu publikowanych pracach, na podstawie udokumentowanych doświadczeń eksploatacyjnych, formułowany jest wniosek, że są one obecnie najbardziej korzystnym – z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia – sposobem poprawy warunków dostawy energii elektrycznej.

Układy z nasyconymi dławikami

Skonstruowano wiele urządzeń przeznaczonych do stabilizacji napięcia, w których wykorzystano zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego. Szersze, praktyczne zastosowanie znalazły głównie dwa rozwiązania: (a) dławik z obwodem sterującym prądu stałego, (b) samonasycający się dławik (SR).

Baterie kondensatorów załączane łącznikami tyrystorowymi (TSC)

W tym rozwiązaniu międzyfazowo łączone są baterie kondensatorów podzielone na sekcje, z których każda jest załączana (lub wyłączana) indywidualnie za pomocą łączników tyrystorowych prądu przemiennego. Wartość zastępczych susceptancji kompensatora zmienia się więc w sposób dyskretny w zależności od liczby przewodzących sekcji (rys. 15a). Poprzez wybór odpowiednio dużej ich liczba można uzyskać dowolnie małą zastępczą susceptancję pojedynczego stopnia. Synchronizacja momentu załączania łącznika oraz wstępne naładowanie baterii pozwala uniknąć przetężeń i przepięć, które towarzyszą zwykle łączeniu kondensatorów (rys. 15b). Czas reakcji przy pracy symetrycznej nie przekracza 20 ms.



Rys. 15: a) schemat kompensatora statycznego z bateriami kondensatorów załączanymi łącznikami tyrystorowymi; b) przebiegi napięcia i prądu przyłączeniu kondensatora

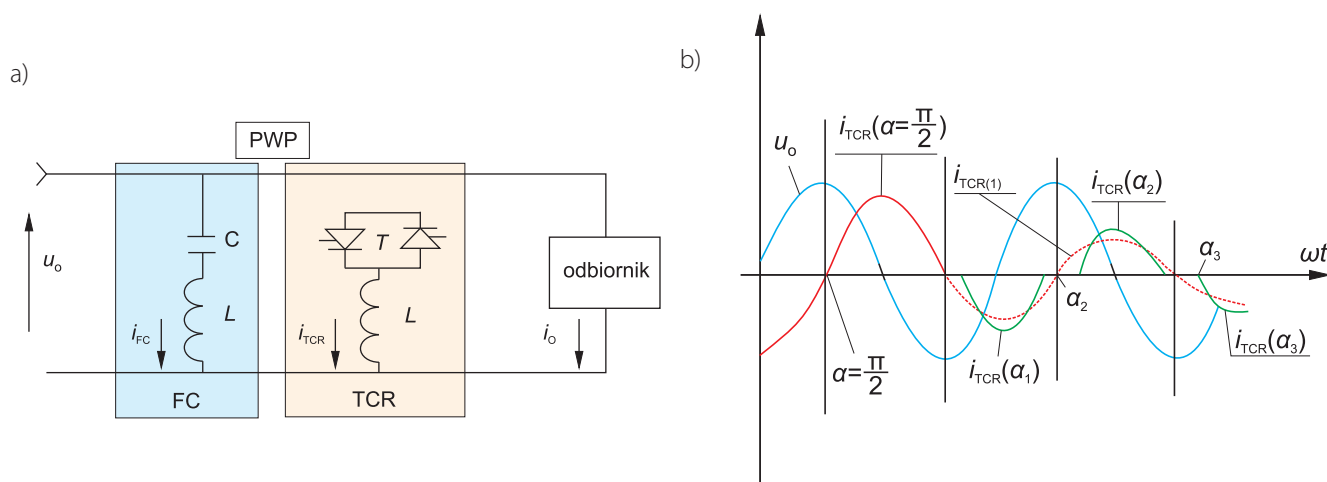
Układ ze stałą baterią kondensatorów (FC) oraz sterownikiem podstawowej harmonicznej prądu indukcyjnego (TCR)

Rozwiązanie to jest przykładem pośredniej metody kompensacji, w której, w zależności od potrzeb wynikających z funkcji stabilizatora napięcia lub kompensatora mocy biernej, regulowana jest wartość sumy dwóch składowych prądu (rys. 16):

- podstawowej harmonicznej prądu i_{FC} kondensatora, pracującego prawie zawsze jako filtr/filtry wch lub jako przełączalne stopnie kondensatorów (układ TCR/TSC);
- podstawowej harmonicznej prądu dławika i_{TCR} regulowanej poprzez sterowanie fazowe tyrystorowego łącznika prądu przemiennego (T).

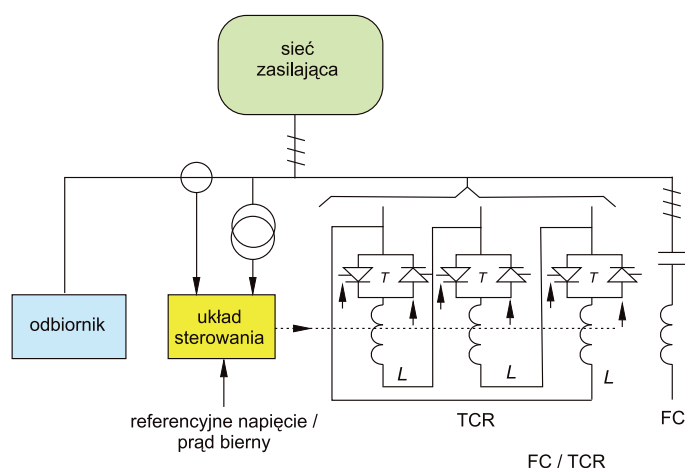
Rysunek 16a przedstawia jednofazowy schemat ideowy takiej instalacji, a rysunek 16b przebiegi czasowe prądu dławika dla różnych wartości kąta wysterowania α (odniesionego do punktów zerowania się napięcia). Kąt ten, a wraz z nim wartość podstawowej harmonicznej prądu dławika i podstawowej harmonicznej prądu kompensatora (również wartość i znak spadku napięcia na impedancji systemu), może zmieniać się w każdym półokresie napięcia zasilania przyjmując dowolne wartości z przedziału $(0,5\pi; \pi)$.

Na rysunku 16 nie uwzględniono niezbędnego na ogół dopasowania napięciowego - za pośrednictwem transformatora - poszczególnych elementów kompensatora. W klasycznej trójfazowej konfiguracji gałęzie dławikowe połączone są w trójkąt i wraz z równoległymi filtrami wch stanowią dla sieci zasilającej włączone międzyfazowo zastępcze susceptancje (rys. 17). Ich wartości zmieniają się na skutek zmiany kątów wysterowania ($\alpha_{12}, \alpha_{23}, \alpha_{31}$, 1, 2, 3 - numery porządkowe faz) w sposób od siebie niezależny i bezstopniowy. Rolę dławika mogą pełnić również reaktancje zastępcze transformatora o dużym napięciu zwarcia (tzw. układ *thyristor controlled transformer*).

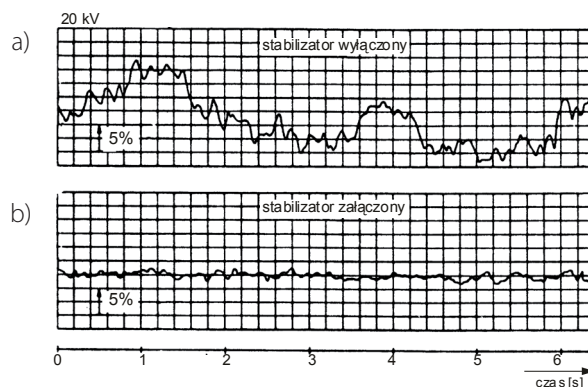


Rys. 16: a) jednofazowy schemat zastępczy układu FC/TCR; b) przebiegi czasowe napięcia i prądu ilustrujące zasadę działania

Na rysunku 18 przedstawiono przykładowe przebiegi ilustrujące zmiany wartości skutecznej napięcia na szynach elektrostalowni (20 kV) dla przypadku wyłączanego i załączanego kompensatora FC/TCR.



Rys. 17. Schemat ideowy zamkniętego układu sterowania kompensatora FC/TCR



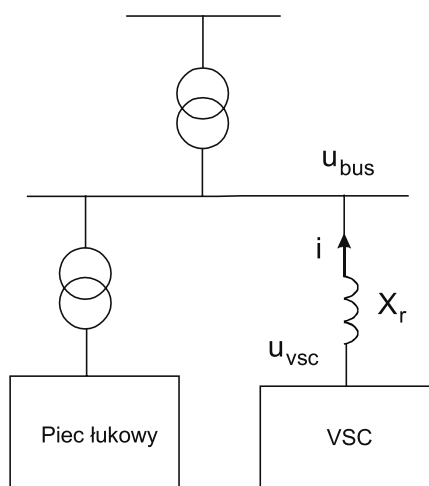
Rys. 18. Przykładowy przebieg napięcia na szynach elektrostalowni dla (a) wyłączanego i (b) załączanego kompensatora FC/TCR

Układ TSC/TCR

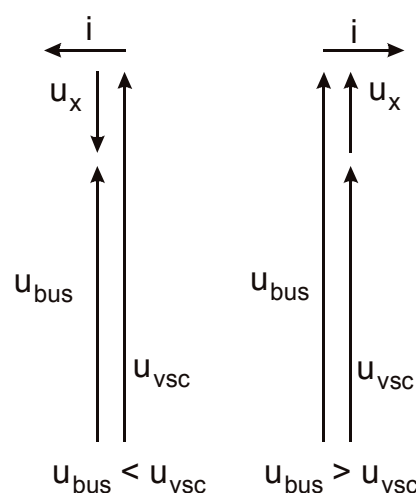
Rozwiązanie to, stosowane prawie wyłącznie w układach stabilizacji napięcia, łączy zalety układu TSC i FC/TCR. Pozwala minimalizować wartość wh prądów wytwarzanych podczas pracy TCR oraz minimalizować straty mocy czynnej w instalacji kompensacyjnej.

Kompensator statyczny typu STATCOM (ang. static synchronous compensator)

Kompensator ten może być rozważany jako kontrolowane źródło napięcia (przekształtnik VSI wykonany najczęściej w technologii IGBT) przyłączone do sieci zasilającej poprzez dławik powietrzny (rys. 19) lub jako bezinercyjna trójfazowa maszyna synchroniczna, której napięcia fazowe – ich amplituda, faza i częstotliwość – są niezależnie sterowane. Do kontrolowania przepływu mocy biernej wykorzystywana jest regulacja amplitudy napięcia. Kompensator posiada możliwość symetryzacji napięcia poprzez eliminację składowej przeciwnej prądu odbiornika. Wzajemna relacja wartości i faz napięć: sieci zasilającej (u_{bus}) i wyjściowych kompensatora (u_{VSC}) (przed i za dławikiem X_r – rys. 19) decyduje o wartości i charakterze (indukcyjny lub pojemnościowy) prądu (mocy) kompensatora. Przy zerowym kącie przesunięcia fazowego pomiędzy napięciami u_{bus} i u_{VSC} , płynie tylko prąd bierny. Jeżeli $u_{bus} < u_{VSC}$ będzie to prąd pojemnościowy, natomiast dla $u_{bus} > u_{VSC}$ prąd indukcyjny (rys. 20). W ten sposób kompensator jest źródłem lub odbiornikiem mocy biernej.



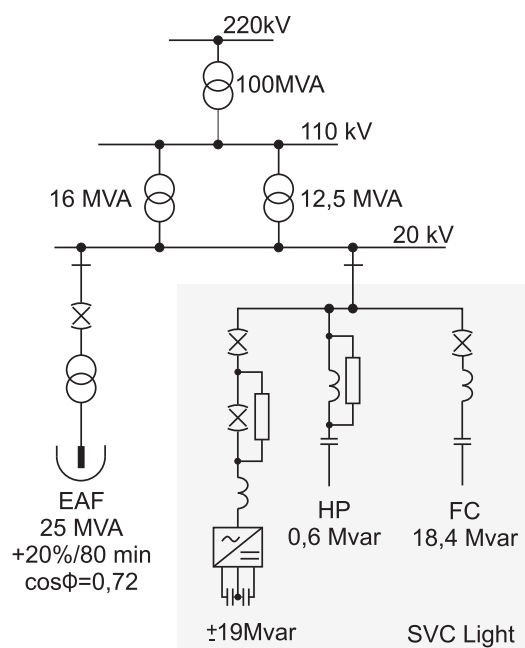
Rys. 19. Schemat ideowy kompensatora STATCOM przyłączonego do sieci zasilającej



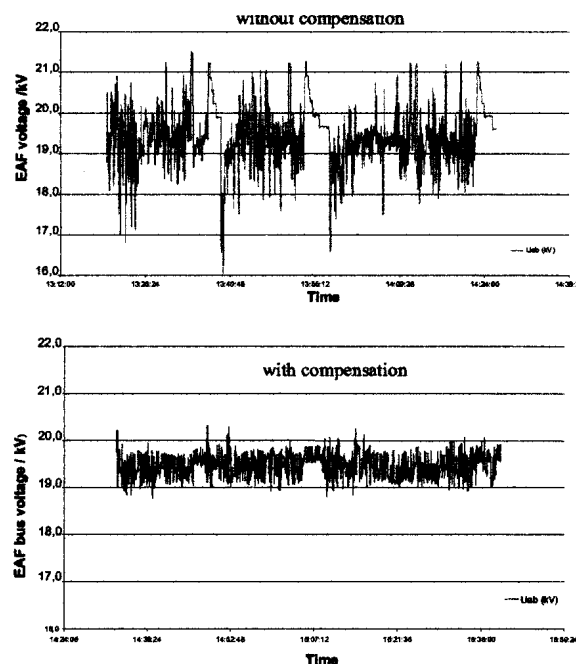
Rys. 20. Wykresy wskazowe dla różnych relacji pomiędzy u_{bus} i u_{VSC}

STATCOM jest szczególnie korzystnym rozwiązaniem dla redukcji wahań napięcia wywołanych pracą dużych niespokojnych odbiorników. Na rysunku 21 przedstawiono schemat ideowy kompensatora STATCOM współpracującego z piecem łukowym.

Zmiany napięcia na szynach elektrostalowni przy wyłączonym i załączonym kompensatorze przedstawia rysunek 22. Widać wyraźnie wysoką skuteczność działania urządzenia.



Rys. 21. Kompensator STATCOM do kompensacji pieca łukowego [19]



Rys. 22. Napięcie na szynach elektrostalowni przy wyłączonym (góra) i załączonym (dół) kompensatorze [19]

7. ZAKOŃCZENIE

W wielu krajach prowadzone są obecnie bardzo intensywne badania nad różnymi aspektami zjawiska migotania światła i wahań napięcia. Stan wiedzy o tym zaburzeniu w środowisku zarówno odbiorców, jak i dostawców energii elektrycznej jest niewystarczający. Brak technicznych możliwości realizacji pomiarów określonych w odpowiednich standardach. Nie jest również w szerszej skali rozpoznany stan krajowych sieci zasilających z punktu widzenia występujących w nich wahań napięcia i migotania światła.

Rozwój energoelektroniki, a głównie technologii produkcji elementów półprzewodnikowych, pozwala obecnie na realizację układów dynamicznej stabilizacji napięcia o coraz większych mocach jednostkowych przy równoczesnej minimalizacji ich kosztów zarówno inwestycyjnych, jak i eksploatacyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Arruda A. A., Cavalcant I. F. L.: Power system harmonics and flicker survey. CIGRE Session 1992, 36-202.
- [2] Ashizaki Y., Aoyama F.: A novel method for the voltage flicker estimation and suppression utilizing the active power filter. CIGRE Session 1992, 36-205.
- [3] Bisiach L., Campestrini L., Malaquti C.: Technical and operational experiences for mitigating interferences from high-capacity arc furnaces. CIGRE Session 1992, 36-204.
- [4] Couvreur M., De Jaeger E., Robert A.: Voltage fluctuations and the concept of short-circuit power. CIGRE Session 2000, 13(14)36-08.
- [5] De Jaeger E.: Measurement of flicker transfer coefficient from HV to MV and LV systems. UIEPQ-9630.
- [6] Grünbaum R., Gustafsson T., Olsson U.: SVC Light: Evaluation of first installation at Hagfors Sweden. CIGRE Session 2000, 13(14)36-03.
- [7] Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 5: Flicker, UIEPQ 1999.
- [8] Hanzelka Z.: Skuteczność statycznej kompensacji oddziaływania odbiorników niespokojnych na sieć zasilającą. Wydawnictwo AGH 1994.
- [9] Kowalski Z.: Wahania napięcia w układach elektroenergetycznych. WNT Warszawa, 1985.
- [10] Kowalski Z., Hanzelka Z.: Dopuszczalne wahania napięcia. JUEE 1997, 1, 3.
- [11] Koziół R., Hanzelka Z., Piróg S.: Dynamiczne stabilizatory napięcia. JUEE 1995, 1, 1, 17-25.
- [12] Mombauer W.: Flicker caused by interharmonics. etz Archiv 12, 12, 1990.
- [13] PN EN 1000-3-3: 1997. Kompatybilność elektromagnetyczna - Dopuszczalne poziomy - Ograniczanie wahań napięcia i migotania światła powodowanych przez odbiorniki o prądzie znamionowym ≤ 16 A w sieciach zasilających niskiego napięcia.

- [14] PN EN 61000-4-11: 1997. Kompatybilność elektromagnetyczna - Techniki badawcze i pomiarowe - Badania odporności na nagłe obniżenie napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia.
- [15] PN EN 50 160: 1998. Charakterystyki napięcia w publicznych sieciach zasilających.
- [16] PN-EN 61000-4-15: 1998. Miernik migotania światła - charakterystyka funkcjonalna i techniczna.
- [17] PN-T-01030: 1996. Kompatybilność elektromagnetyczna - Terminologia.
- [18] Povh D., Weinhold M.: Improvement of power quality by power electronic equipment. CIGRE Session 2000, 13(14)36-06
- [19] Beaulieu G. i in.: Power quality indices and objectives for MV, HV and EHV systems CIGRE WG 36.07/CIRED progress, CIRED 2003.