

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

CZĘŚĆ 3 – Wahania napięcia

Zbigniew Hanzelka

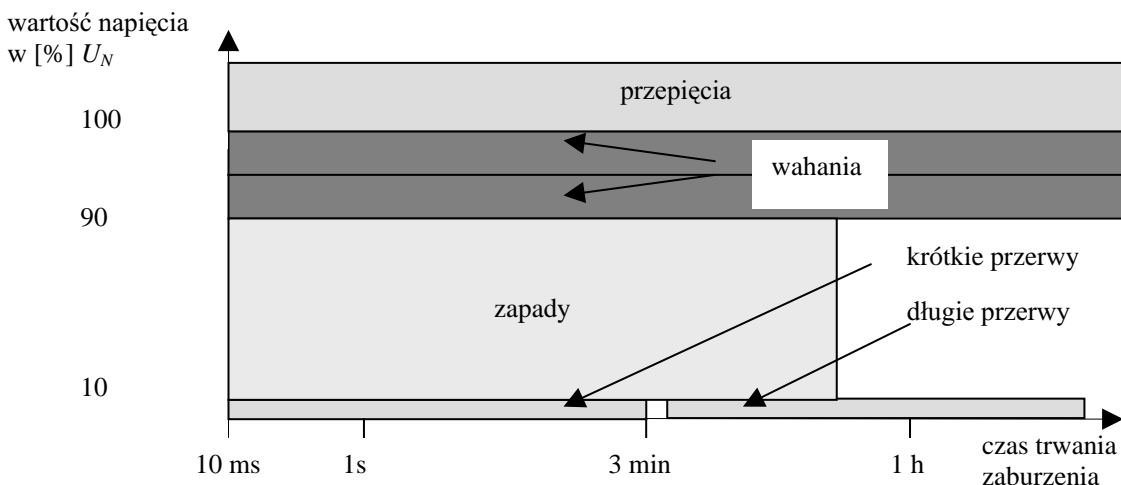
Akademia Górniczo-Hutnicza, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30
tel: (012) 617 28 78, tel/fax: (012) 633 22 84, e-mail: hanzel@uci.agh.edu.pl
Konsultant techniczny Twelve Electric.

Streszczenie: Przedstawiono podstawowe informacje dotyczące wahań napięcia i migotania światła w sieciach elektroenergetycznych. 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, prócz tradycyjnych sposobów redukcji skutków migotania światła, również przekształtnikowych, dynamicznych stabilizatorów napięcia o bardzo dużej szybkości działania i o znaczących mocach jednostkowych. Wybrane rozwiązania takich stabilizatorów zostały omówione w artykule.

1. WPROWADZENIE

Na rysunku 1 przedstawiono, w układzie współrzędnych: wartość-czas trwania zaburzenia klasyfikację zjawisk wpływających na wartość skuteczną napięcia. Ciemniejszym kolorem zaznaczono obszar zmian, będący przedmiotem rozważań w niniejszym artykule.



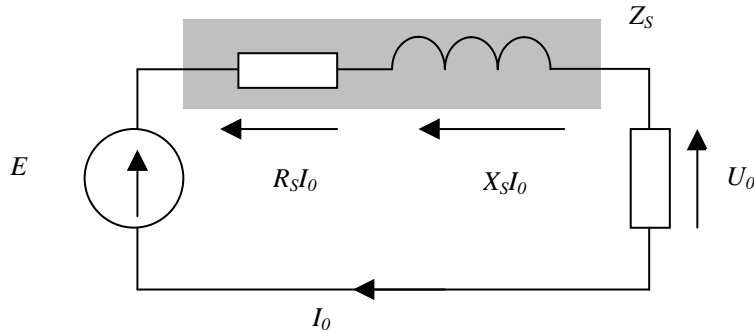
Rys. 1. Zjawiska wpływające na wartość skuteczną napięcia (U_N – napięcie znamionowe)

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

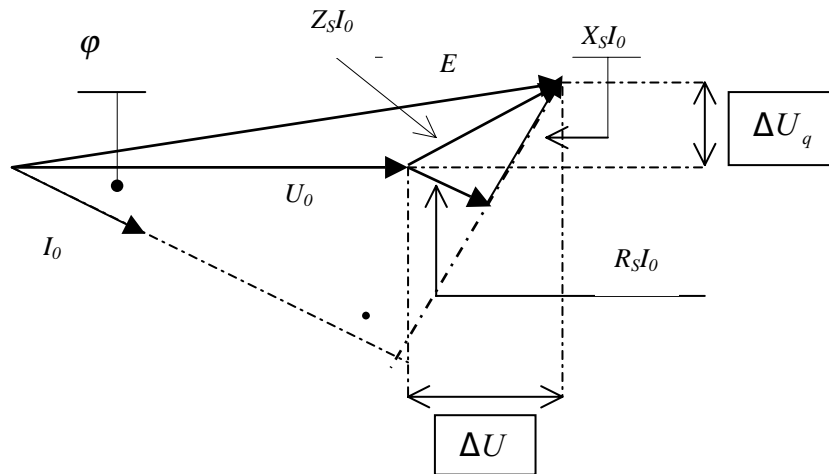
wyprowadzić zależność (1) określającą wartość różnicy napięć ΔU ¹ zdefiniowaną jak na rysunku (2b):

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

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



(a)



(b)

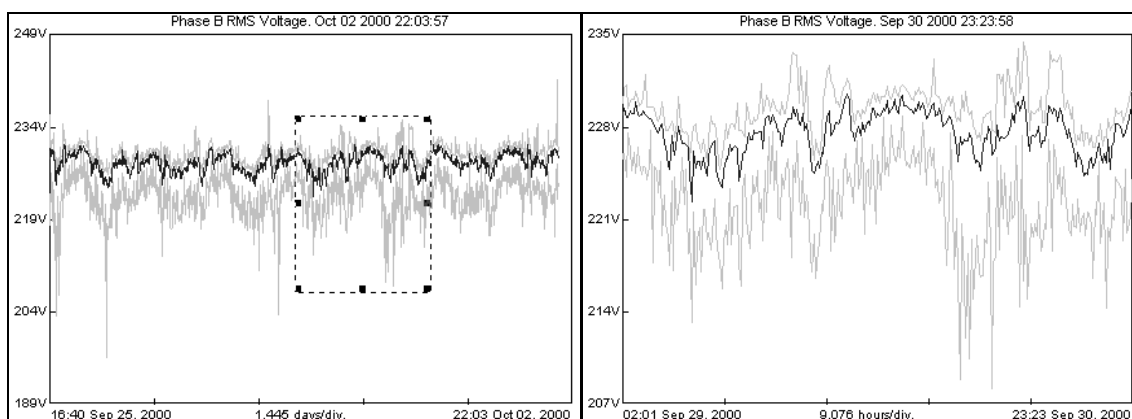
Rys. 2. Jednofazowy schemat zastępczy sieci zasilającej (a) oraz wykres wskazowy dla (b) odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego (ind.) - $E \geq U_0$, dla odbiornika rezystancyjno-pojemnościowego (poj.) - $E \leq U_0$

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

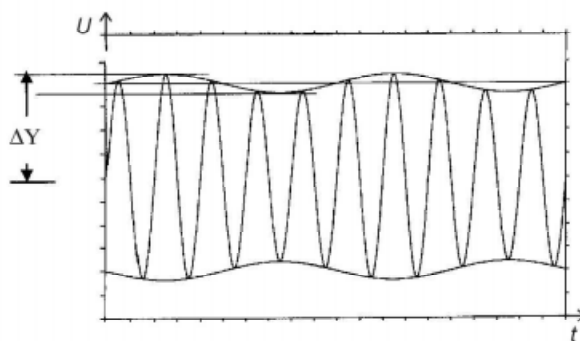
¹ Jest to tzw. podłużna zmiana napięcia, w odróżnieniu od poprzecznej ΔU_q (rys. 2b), powszechnie przyjmowana jako miara różnicy wartości napięć na końcach linii zasilającej.

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

gdzie S_{ZW} jest mocą zwarcia w punkcie przyłączenia odbiornika. Zmianę napięcia ΔU można podzielić, 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 [9] oraz polskiej normy terminologicznej [25], seria zmian wartości skutecznej lub obwiedni przebiegu czasowego napięcia (rys. 3).



(a)



(b)

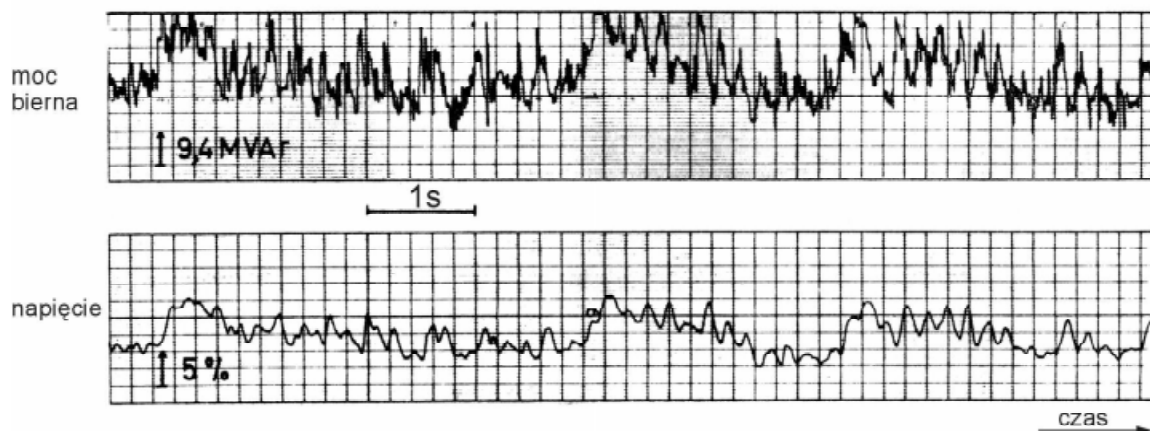
Rys. 3. Przykład wahań napięcia: a) w przebiegu wartości skutecznej; b) w przebiegu wartości chwilowej (modulacja 10 Hz)

W przypadku tego zaburzenia można mówić o **kształcie wahań napięcia** (obwiednia wartości szczytowych napięcia przedstawiona w funkcji czasu²), **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 Ze względu na charakter tej funkcji można mówić o waniach okresowych lub nieokresowych, zdeterminowanych (rzadziej) lub losowych (częściej).

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 zaczepek transformatora, rozruchy silników asynchronicznych, spawarki elektryczne (rys. 5), bojłery, 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 zwarcia w punkcie ich przyłączenia do systemu zasilającego. Źródłem wahań napięcia mogą być także w pewnych przypadkach (oświetlenie fluorescencyjne) interharmoniczne napięcia.



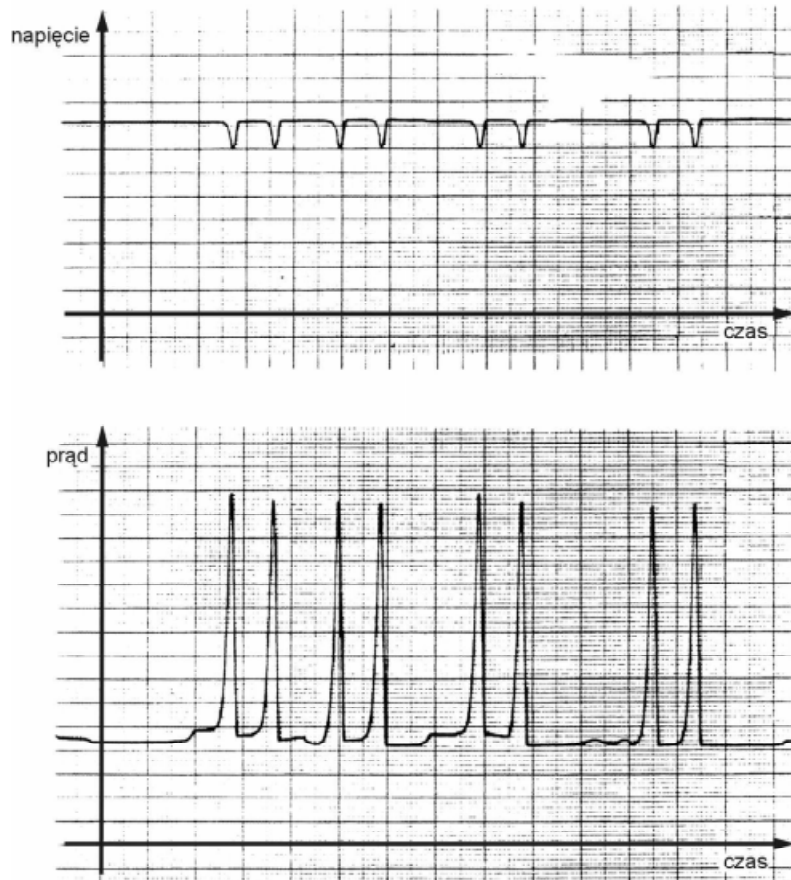
Rys. 4. Zmiany mocy biernej (a) i wahania napięcia (b) na szynach elektrostalowni

3. SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA

Wahania napięcia występujące w sieciach elektroenergetycznych powodują szereg ujemnych skutków o charakterze techniczno-technologicznym i ergonomicznym. W sferze produkcyjnej jedno 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 występujących bardzo często, 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.



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

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 najczęściej zmniejszenie współczynnika mocy i generację harmonicznych nie charakterystycznych i interharmonicznych. W przypadku napędu podczas hamowania zmiana napięcia może prowadzić do przerzutu falownikowego.

3.3. Urządzenia do elektrolizy

Występuje skróceniu czasu eksploatacji urządzeń oraz zmniejszenie wydajności procesu technologicznego.

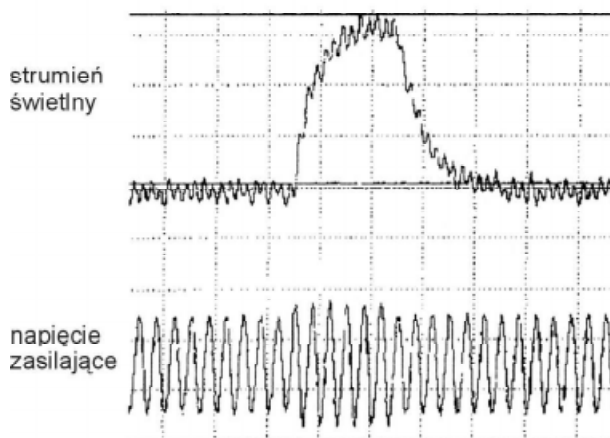
3.4. Urządzenia elektrotermiczne

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.

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 [16]³. Na rysunku 6 [wg 7] przedstawiono przykładowo zmianę strumienia świetlnego żarówki w reakcji na krótkotrwałą zmianę napięcia zasilającego.



Rys. 6 Zmiana strumienia świetlnego żarówki wywołana zmianą 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. Klasyczne wskaźniki wahań napięcia

Do niedawna wahania napięcia w sieciach elektroenergetycznych lub na zaciskach odbiorników energii elektrycznej charakteryzowano przede wszystkim następującymi cechami, nazywanymi również klasycznymi wskaźnikami wahań napięcia [17]:

1. amplitudami wahań (dV w voltach lub częściej dV^* w jednostkach względnych procentowych, odniesionych do napięcia znamionowego);
2. częstością amplitud wahań napięcia (F_V w 1/s (Hz), 1/min lub 1/h) i często - w przypadku okresowych wahań - częstotliwością wahań napięcia (F_U w Hz, 1/min lub 1/h);
3. energetyczną dawką wahań napięcia (jednostkową D_V w V^2 lub $\%^2$ lub łączną D_{VT} w V^2s lub $\%^2s$, bądź tradycyjnie w V^2min lub najczęściej w $\%^2min$).

³ Wg tego samego źródła dla świetlówek fluorescencyjnych wartość wykładnika wynosi: 1,5-1,8.

W ocenie wahań napięcia brane były także pod uwagę: energia wahań napięcia oraz gęstość widmowa średniej mocy procesu wahań napięcia, zwana również widmem energetycznym wahań napięcia (np. [17]). Uwzględniano również czas trwania wahań oraz (związany z częstotliwością wahań) przedział czasu między wahaniami napięcia (t_p).

4.2. Metody pomiaru

Pomiar wahań napięcia jest potrzebny: (a) do sprawdzenia zgodności istniejących poziomów zjawiska z normami kompatybilnościowymi; (b) do 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 zjawiska migotania światła będącego bezpośrednim skutkiem wahań napięcia. Badania związane z procesem percepcji wzrokowej liczą już ponad 40 lat (wg [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. Ogromny wkład w rozwój tej gałęzi wiedzy wnieśli Rashbass, Koenderink i Van Doorn [7]. Ich badania doprowadziły bezpośrednio do opracowania miernika migotania UIE⁴. 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 0,5 - 35 Hz⁵), z maksymalnym współczynnikiem wzmocnienia (maksymalną czułością na zmiany strumienia świetlnego) dla częstotliwości 8-9 Hz. Dla żarowych źródeł światła odpowiada to wahanom napięcia o amplitudzie 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 o wartości

⁴ W przypadku zjawiska migotania światła, pierwsze prace badawcze były inspirowane przez Międzynarodową Unię Elektrotechniki UIE (obecnie Elektrotechnologii), powstałą w 1953 roku i skupiającą 15 państw członkowskich w tym również Polskę. Raport techniczny dotyczący teorii i metod pomiarowych zjawisk był opracowany przez grupę roboczą ds. jakości energii (WG2 *Power Quality* - UIE) i następnie przyjęty jako standard w ramach grupy roboczej ds. wahań napięcia (WG2 *Voltage Fluctuation*), podkomitetu 77A IEC.

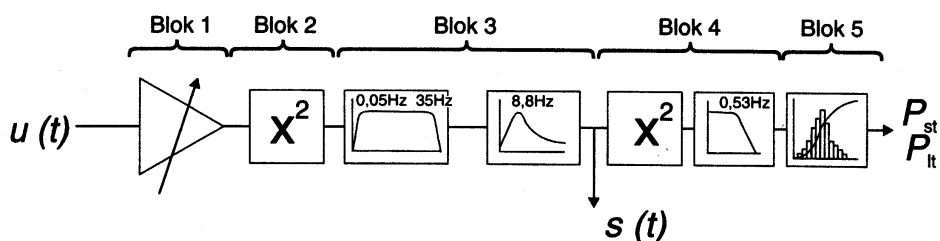
⁵ Ostatnie badania dotyczące TV i obrazów video przesunęły górną granicę częstotliwości pasma postrzegania zmian obrazu (ang. *flicker fusion boundary*) do około 100 Hz. Wykazały one, że stres i zmęczenie może być wywołane przez zjawisko migotania światła również w podświadomości. Granica postrzegania zależy od wartości średniej strumienia świetlnego podlegającego zmianie. Jej wzrost powoduje zwiększenie częstotliwości granicznej. Częstotliwość ta zależy również od barwy światła

około 300 ms. Oznacza to, że występuje śledzenie wolnych⁶ 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.

4.3. 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 przyrządów⁷. 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 średnią skuteczną wartością napięcia wyznaczoną w trakcie

⁶ Oko ludzkie adaptuje się do wolnych zmian strumienia świetlnego poprzez zmianę średnicy źrenicy oka.

⁷ Warto tu wymienić: miernik brytyjski ERA (*Electrical Research Association*); miernik francuski EDF (*Electricite de France*); miernik niemiecki FGH (*Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs und Hochstromtechnik e. V.*); miernik japoński Δ V10.

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 łatwo 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 (230V, 60W – parametry, które uznano za najbardziej powszechne), oko ludzkie, została odtworzona w przyrządzie za pomocą filtru pasmowo-przepustowego 4 rzędu o transmitancji operatorowej określonej zależnością (2) i charakterystyce częstotliwościowej przedstawionej na rysunku 8.

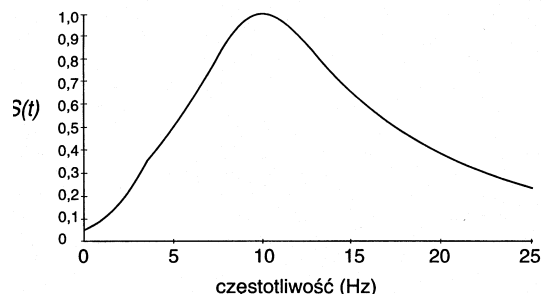
$$H_{230V}(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)} \quad (2)$$

gdzie: k	$= 1,74802$	λ	$= 2\pi 4,05981$	ω_1	$= 2\pi 9,15494$
ω_2	$= 2\pi 2,27979$	ω_3	$= 2\pi 1,22535$	ω_4	$= 2\pi 21,9$

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

Blok 4 (nieliniowa reakcja mózgu)

Model percepcji wzrokowej Rashbassa zawiera, prócz filtru ważonego, również funkcję podnoszenia do kwadratu oraz funkcję całkowania tak otrzymanego sygnału realizowaną za pomocą filtru dolnoprzepustowego pierwszego rzędu o stałej 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 nie tolerowana.



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

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 przekroczone. Analiza statystyczna wymaga zatem ustalenia relacji pomiędzy liczbowymi wartościami określającymi poziom migotania i czasami ich występowania. W tym celu, na podstawie sygnału wyjściowego $S(f)$ 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.
2. Określenia wartości wskaźnika krótko- i długookresowego migotania światła.

Czas obserwacji

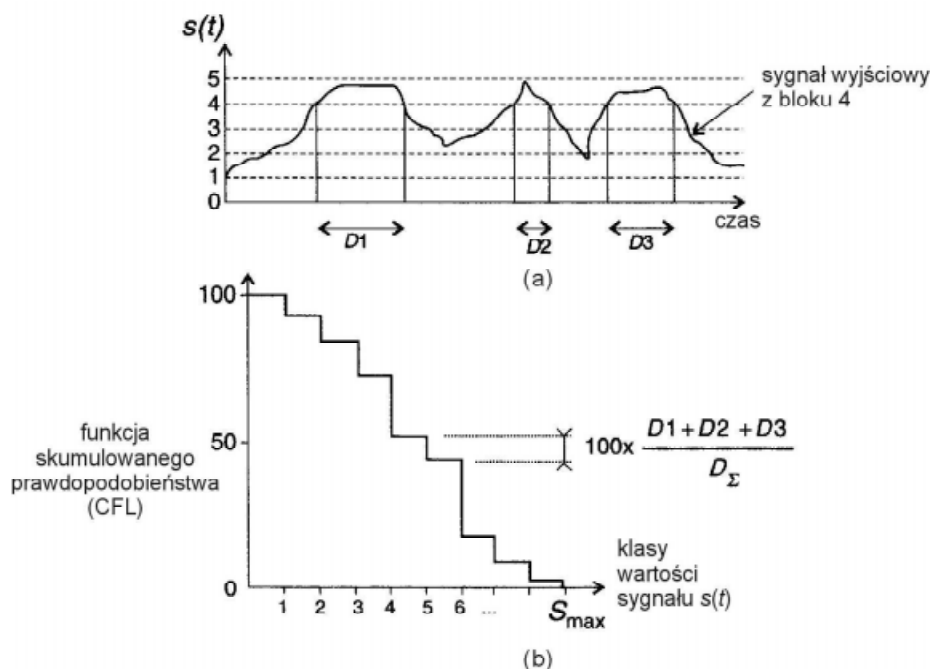
Podstawą określenia wartości wskaźników migotania może być cykl pracy zaburzającego odbiornika. Uwzględniając jednakże dużą ich różnorodność należało znaleźć pewną wspólną miarę czasu. Po uwzględnieniu podstaw fizjologicznej percepcji wzrokowej oraz na podstawie testów wrażliwości przeciętnego obserwatora, 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 ($T_4 = \sum_1^3 t_i$); (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 (ważenia), 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. Indeks (s) wskazuje, że dany percentyl podlega operacji wygładzenia na podstawie następujących zależności:

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

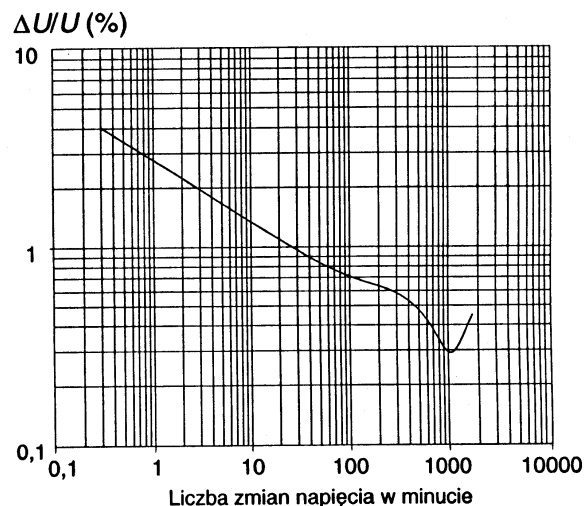
przy czym $P_{0,7} \dots P_{80}$ oznaczają poziomy migotania, których wartości nie są przekroczone odpowiednio w ciągu 0,7 ... 80 % czasu obserwacji⁸. Percentyl $P_{0,1}$ nie może zmieniać w sposób nagły swojej wartości ze względu na 0,3-sekundową stałą czasową, przyjętą w mierniku. Nie wymaga więc dodatkowej operacji gładzenia⁹.

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. 50% punkt referencyjny 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 współczynniki $P_{st} \geq 1$ za uciążliwe.

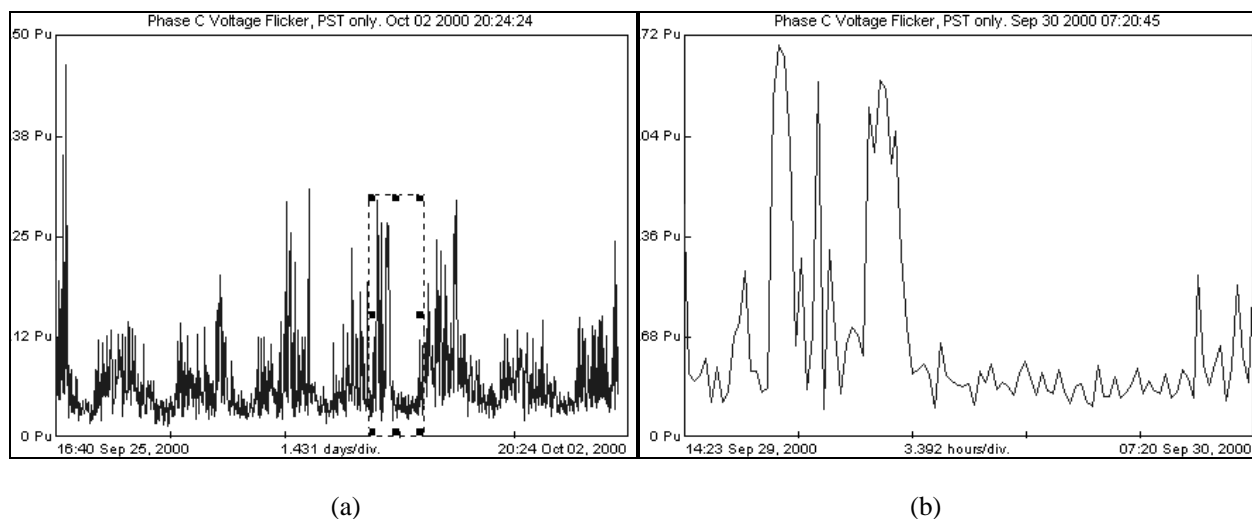
⁸Po 24 godzinach pomiaru otrzymuje się 144 wartości. Istnieje również możliwość zastosowania 10-minutowego, przesuwanego się okna pomiarowego, dzięki czemu nowa wartość wskaźnika P_{st} będzie wyznaczana co 1 minutę. Zwiększa to liczbę pomiarów do 1440 w ciągu doby. W ten sposób rezultaty pomiarów stają się mniej zależne od punktu początkowego, co jest ważne np. dla pieca łukowego.

⁹Stosowane są różne techniki w celu poprawy dokładności pomiaru (liniowa i nieliniowa interpolacja, nieliniowa klasyfikacja itp.).



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

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



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.

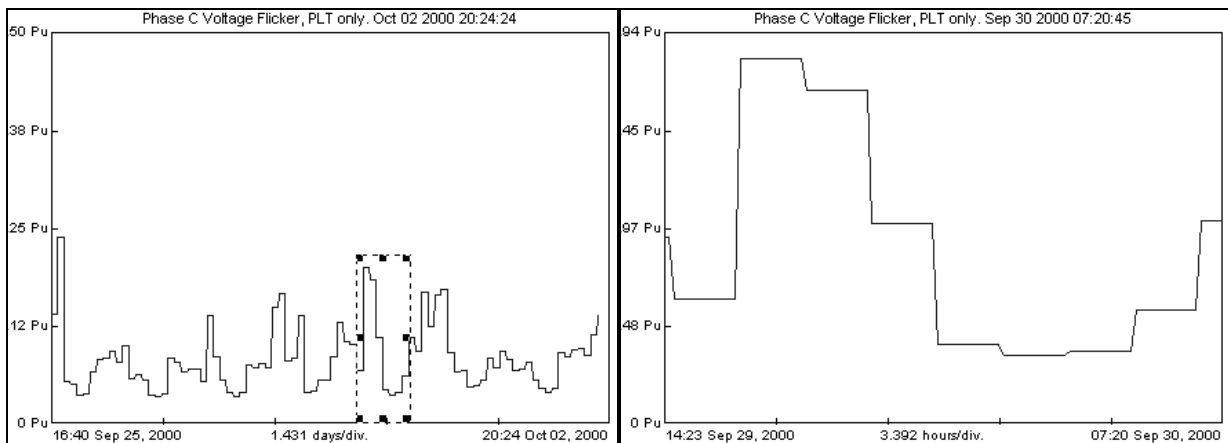
Wskaźnik długookresowego migotania światła (P_{lt})

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:

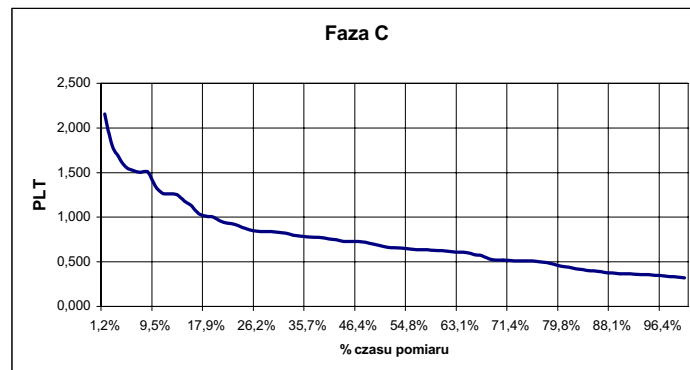
$$P_{lt} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N P_{st,i}^3}{N} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

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.



(a)



(b)

Rys. 12. Zmiany w czasie wartości współczynnika P_{lt} oraz charakterystyka uporządkowana z zaznaczoną wartością 1, stanowiącą zgodnie z normą PN EN 50160 poziom granicznych

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. A oto krótka charakterystyka poszczególnych dokumentów normalizacyjnych dotyczących zjawiska migotania światła.

5.1. Definicje

PN-T-01030	1996	Kompatybilność elektromagnetyczna - Terminologia	
IEC 1000-2-1	1990	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment - Section 1: Description of the environment - Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems</i>	Kompatybilność elektromagnetyczna - Część 1: Środowisko - Arkusz 1: Opis środowiska - Środowisko elektromagnetyczne dla zaburzeń przewodzonych niskiej częstotliwości i sygnalizacji w publicznych sieciach zasilających niskiego napięcia
IEC 1000-2-2	1990	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment - Section 2: - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems</i>	Kompatybilność elektromagnetyczna - Część 2: Środowisko - Arkusz 2: Poziomy kompatybilności dla zaburzeń przewodzonych niskiej częstotliwości i sygnalizacji w publicznych sieciach zasilających niskiego napięcia
PN EN 61000-4-15	1999	Miernik migotania światła – charakterystyka funkcjonalna i techniczna	

5.2. Poziomy kompatybilności

PN EN 50160	1998	Charakterystyki napięcia w publicznych sieciach zasilających
--------------------	-------------	---

Norma definiuje parametry zasilania energią elektryczną, które powinny być gwarantowane przez dystrybutora (dostawcę energii) w stosunku do odbiorców (konsumentów energii). Dokument zawiera trzy części: (a) część ogólną, dotyczącą głównie definicji terminów technicznych; (b) charakterystykę niskonapięciowego źródła zasilania; (c) charakterystykę średnionapięciowego źródła zasilania. Dokument nakłada ograniczenia jedynie na długookresowy wskaźnik migotania P_{lf} . 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.

5.3. Poziomy emisji

PN-EN 61000-3-3	1997	Kompatybilność elektromagnetyczna - Dopuszczalne poziomy - Ograniczenie wahań napięcia i migotania światła powodowanych przez odbiorniki o prądzie znamionowym $\leq 16A$ w sieciach zasilających niskiego napięcia
-----------------	------	---

Ustalono dopuszczalne poziomy zmian napięcia, które mogą być powodowane przez badane urządzenia w określonych warunkach, i podano wskazówki dotyczące metod ich wyznaczania (postanowienia normy stosuje się do urządzeń elektrycznych i elektronicznych o fazowym prądzie zasilającym do 16 A włącznie, przeznaczonych do przyłączenia do publicznych sieci rozdzielczych niskiego napięcia o napięciu fazowym zawartym pomiędzy 220 i 250 V oraz częstotliwości 50 Hz; badania zgodne z normą są badaniami typu). Dokument IEC 1000-3-3 zastrzega stosowanie do bezpośredniej oceny zjawiska migotania światła miernika zgodnego ze specyfikacją podaną w PN EN 61000-4-15.

IEC 1000-3-5	1994	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits - Section 5: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current greater than 16 A</i>	Kompatybilność elektromagnetyczna- Część 3: Dopuszczalne poziomy - Arkusz 5: Ograniczenie wahań napięcia powodowanych przez urządzenia o prądzie znamionowym większym od 16 A w sieciach zasilających niskiego napięcia
--------------	------	--	---

Publikacja IEC 1000-3-5 jest raportem technicznym. Zgodnie z jej postanowieniami, dla każdego urządzenia, uwzględniając charakter jego zapotrzebowania na energię elektryczną, należy wyznaczyć wartość maksymalnej impedancji sieci zasilającej, dla której nie będą przekroczone poziomy określone w dokumencie 1000-3-3. Dostawca energii musi zaakceptować

każde przyłączenie, po sprawdzeniu, że w punkcie wspólnego przyłączenia do sieci rozdzielczej impedancja zastępcza jest nie większa od maksymalnej, podanej przez producenta.

IEC 1000-3-7	1996	<i>Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems – basic EMC publication</i>	Kompatybilność elektromagnetyczna- Część 3: Dopuszczalne poziomy - Arkusz 7: Ocena wartości granicznych emisji odbiorników niespokojnych przyłączonych do sieci SN i WN – podstawowa publikacja EMC
--------------	------	---	---

5.4. Poziomy odporności

Nie istnieją normy określające odporność sprzętu na szybkie zmiany napięcia. Norma PN-EN 61000-4-11: 1997 (*Kompatybilność elektromagnetyczna - Techniki badawcze i pomiarowe - Badania odporności na nagłe obniżenie napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia*) określa sposoby przeprowadzania testów odpornościowych sprzętu w przypadku „obniżenia napięcia, krótkich przerw i zmian napięcia”. W rzeczywistości traktuje ona o dwóch pierwszych zjawiskach i w mniejszym stopniu dotyczy zjawiska migotania światła.

5.5. Wytyczne UIE „Przyłączenie odbiorników niespokojnych”

Raporty techniczne dotyczące procedury wydawania warunków technicznych przyłączenia odbiorników zaburzających są obecnie na etapie opracowywania. W wielu krajach istnieją narodowe wytyczne, których postanowienia są w większości przypadków oparte na wytycznych UIE - tablica 1. Istnieje opinia, że wymagania te są w praktyce zbyt restrykcyjne.

Tablica 1

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

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

- automatycznie przyłączane są odbiorniki małej mocy (mniejszej od 1/1000 mocy zwarcia 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.

Zmierzone wartości P_{st} nie mogą przekroczyć podanego w dokumencie poziomu w 95% czasu pomiaru (w ciągu jednego tygodnia). Jedenasta z kolei, największa wartość wskaźnika P_{st} ze zbioru 1008 dziesięciominutowych wskazań miernika migotania nie powinna być przekroczona podczas 99 % czasu pomiarów.

Zmierzona wartość wskaźnika P_{lt} nie powinna przekroczyć wartości dopuszczalnych w 95% tygodnia.

Przedstawione wartości wymagają dodatkowego komentarza:

- Możliwe jest przekroczenie w ciągu tygodnia dopuszczalnych wartości wskaźnika P_{st} w czasie 100 minut. Ten margines 1% tolerancji uwzględnia losowy charakter zjawiska wahań napięcia. Nie jest ograniczana wartość maksymalna wskaźnika, której prawdopodobieństwo wystąpienia jest z reguły niewielkie.

- Podana w dokumencie dopuszczalna wartość wskaźnika migotania na poziomie wysokiego napięcia jest rezultatem uwzględnienia efektu sumującego dla zjawiska migotania wywołanego przez różne źródła przyłączone do sieci rozdzielczych i transmisyjnych.

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-metalurgom;
- w przypadku linii spawalniczej – wydzielenie 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.

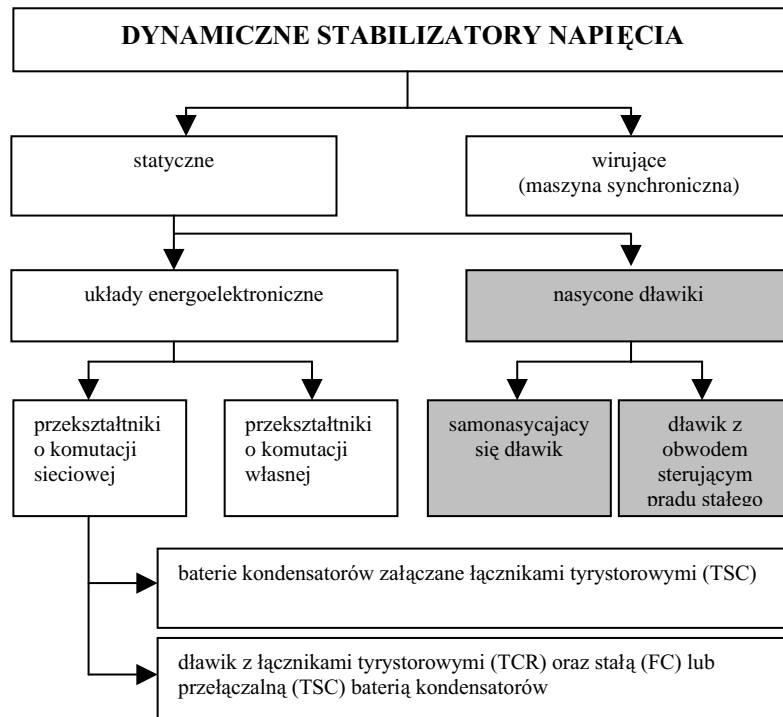
Jak wynika z zależności (1a) amplitudę wahań napięcia można ograniczyć dwoma sposobami:

- **zwiększając moc zwarcia** w punkcie przyłączenia odbiornika niespokojnego (w relacji 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 trójuzwojeniowych lub oddzielnych transformatorów (seperacja 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

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).



Rys. 13. Klasyfikacja dynamicznych stabilizatorów napięcia

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 będą 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.

W ustalonym stanie pracy kompensator synchroniczny można przedstawić za pomocą uproszczonego jednofazowego schematu, jak na rysunku 15, gdzie:

E_0, X_d – SEM i zastępcza reakantacja maszyny,

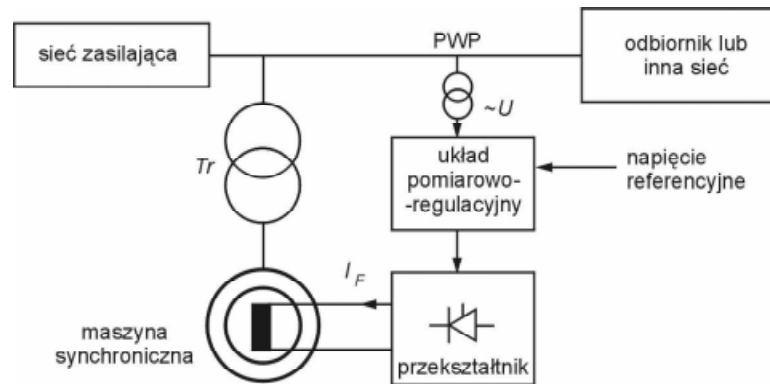
E_S, Z_S – napięcie sieci zasilającej przy odłączonym odbiorniku oraz impedancja zastępcza sieci,

Z_{Tr} – impedancja zastępcza transformatora,

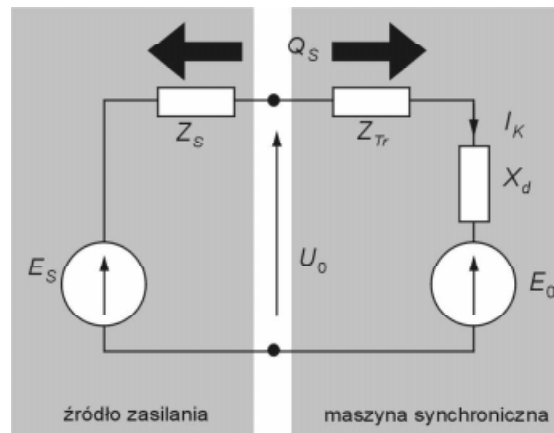
Q_K – moc bierna maszyny (o zmiennej wartości i znaku).

Wszystkie wielkości dotyczą podstawowej harmonicznej.

Zmianę prądu kompensatora (ΔI_K w jednostkach względnych) w funkcji zmiany jego napięcia (ΔU_0 również w jednostkach względnych) przedstawia rysunek 16 (dla maszyny przewzbudzonej). Przyrosty napięcia i prądu odniesiono do wartości znamionowych. Dla porównania, na rysunku 16 przedstawiono linią przerywaną zależność zmiany prądu od zmiany napięcia dla stałej baterii kondensatorów.



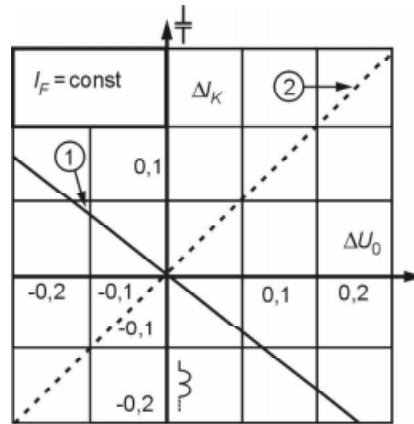
Rys. 14. Schemat układu stabilizacji napięcia z zastosowaniem maszyny synchronicznej



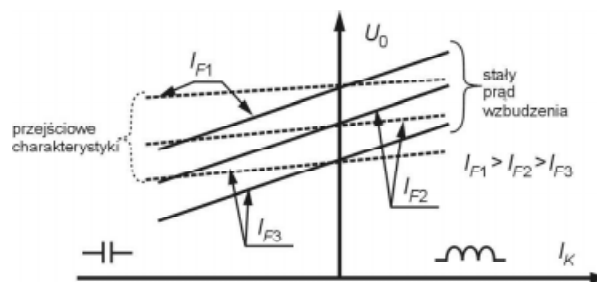
Rys. 15. Jednofazowy schemat zastępczy sieci zasilającej i kompensatora synchronicznego

W przypadku, gdy napięcie zasilające U_0 maleje, wzrasta wartość pojemnościowego prądu maszyny. Zatem kompensator synchroniczny wpływa stabilizująco na wartość napięcia, nawet gdy jego prąd wzbudzenia nie podlega regulacji. Rysunek 17 przedstawia rodzinę statycznych charakterystyk U_0-I_K , dla których przyjęto jako parametr wartość prądu wzbudzenia. Nachylenie charakterystyk jest proporcjonalne do (X_d+Z_{Tr}) . Stopień redukcji szybkich zmian napięcia zależy od reaktancji synchronicznej kompensatora w stanach dynamicznych. Reaktancja X_d maleje wówczas do wartości $X'_d < X_d$ gdzie X'_d jest reaktancją podprzejściową maszyny. W efekcie tego, nawet bez układu regulacji prądu wzbudzenia, nachylenie charakterystyki dynamicznej

(U_0-I_K) będzie mniejsze, a tym samym większa będzie zdolność maszyny do redukcji amplitudy wahań napięcia.



Rys. 16. Zmiana prądu kompensatora synchronicznego (1) i baterii kondensatorów (2) w funkcji zmiany napięcia zasilającego



Rys. 17. Statyczne i dynamiczne charakterystyki (U_0-I_K) kompensatora synchronicznego

Stosowanie maszyny synchronicznej bez układów regulacji prądu wzbudzenia jest jednakże 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). 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. Dla silników synchronicznych szybkość ta nie przekracza na ogół 150 MVar/sek.

6.1.2. Kompensatory statyczne

W większości przypadków (z wyłączeniem „energoelektronicznych” źródeł prądu biernego) statyczne kompensatory wykorzystują elementy biernie 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.

6.1.3. 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).

Dławik z obwodem sterującym prądu stałego

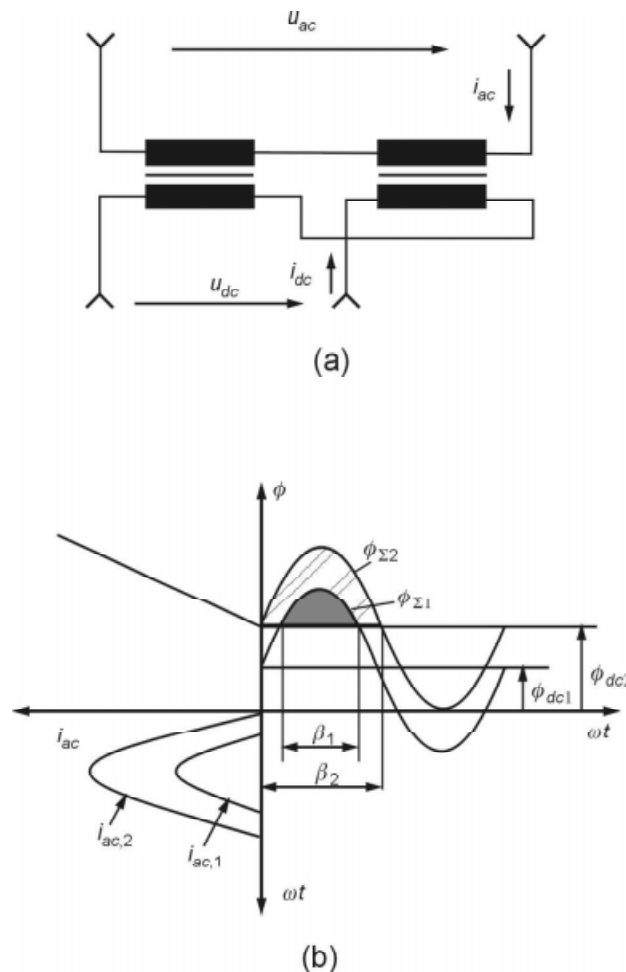
Urządzenie to pracuje najczęściej z równoległą baterią kondensatorów tworzącą filtr/filtry wyższych harmonicznych. Jest w swej istocie działaniem transduktorem, w którym wartość zmiennego prądu pierwotnego (i_{ac} , rys. 18) regulowana jest poprzez zmianę stałego prądu magnesującego i_{dc} . Uzwojenie sterujące zasilane jest najczęściej z w pełni sterowanego przekształtnika tyrystorowego (jego moc nie przekracza zazwyczaj 1% mocy całego urządzenia). Dzięki temu możliwe jest forsowanie przebiegów przejściowych prądu, a tym samym duża szybkość działania urządzenia.

W efekcie zmiany prądu magnesującego i_{dc} , prąd pierwotny i_{ac} może zmieniać się praktycznie od zera (rdzeń nie nasycony) do wartości maksymalnej (rdzeń nasycony) w całym przedziale zmian prądu¹⁰. Układ jest zazwyczaj przyłączony do sieci wysokiego napięcia bez pośrednictwa transformatora obniżającego.

Zasadę jego działania najłatwiej przedstawić za pomocą uproszczonej, jednofazowej wersji układu (rys. 18a). Uzwojenia umieszczone są na rdzeniu wykonanym z materiału o charakterystyce magnesowania pokazanej w wyidealizowanej formie na rysunku 18b. Uzwojenia pierwotne połączone są szeregowo, natomiast uzwojenia prądu stałego przeciwnie względem siebie. Gwarantuje to uzyskanie stanu nasycenia rdzenia zarówno dla dodatniego, jak i ujemnego półokresu przebiegu strumienia Φ_{ac} . Napięcie zasilające powoduje wytworzenie w rdzeniu zmiennego strumienia magnetycznego o kształcie sinusoidalnym. Dla $i_{dc} = 0$ amplituda strumienia wypadkowego $\Phi_{\Sigma} = \Phi_{ac} + \Phi_{dc}$ nie przekracza poziomu nasycenia rdzenia. Wzrost wartości prądu i_{dc} powoduje wytworzenie strumienia $\Phi_{dc} \neq 0$. W pewnych przedziałach czasu strumień wypadkowy przekracza poziom nasycenia obwodu zarówno dla ujemnej, jak i dodatniej jego wartości. Czas pozostawiania rdzenia w stanie nasycenia β , liczony w mierze kątowej

¹⁰ Zgodnie z [18] w instalacjach o mocy nie większej niż 50 MVar przy 20-krotnym forsowaniu napięciowym w obwodzie sterującym można uzyskać szybkość zmian mocy biernej dławika wynoszącą 600-700 MVar/s.

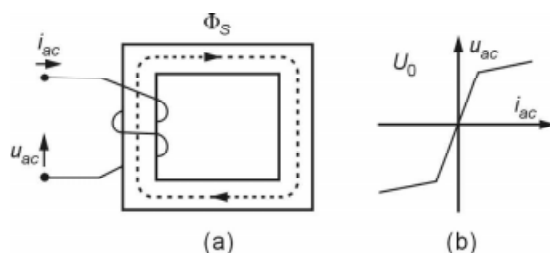
(rys. 18b), wzrasta wraz ze wzrostem wartości prądu sterującego i_{dc} powodując prawie proporcjonalny wzrost podstawowej harmonicznej prądu uzwojenia pierwotnego (mocy biernej podstawowej harmonicznej Q_L). Dla $\beta = \pi$ prąd ma kształt sinusoidalny, a dla $\beta = 2\pi$ osiągnięta jest granica sterowalności. Istotną wadą tego rozwiązania są generowane wyższe harmoniczne (wh) prądów. W wersji trójfazowej (dławik Friedlandera) wzrost liczby kolumn rdzenia (6 lub 9) oraz odpowiedni sposób kojarzenia licznych uzwojeń (do 36) pozwala na praktyczną eliminację wh prądu, jednakże za cenę wzrostu czasu reakcji układu. Możliwe jest zastosowanie trzech układów jednofazowych, co pozwala również na realizację symetryzacji. Urządzenie pracuje w zamkniętym układzie regulacji, kontrolując wartość prądu stałego i_{dc} w taki sposób, aby wypadkowa moc bierna kompensatora - $Q_{FC} + Q_L$ - gwarantowała pożądany stopień stabilizacji napięcia (Q_{FC} - moc stałej baterii kondensatorów przyłączonej równoległe do dławika).



Rys. 18. Dławik z obwodem sterującym prądu stałego: a) jednofazowy schemat zastępczy; b) przebiegi czasowe strumieni magnetycznych ilustrujące zasadę działania kompensatora

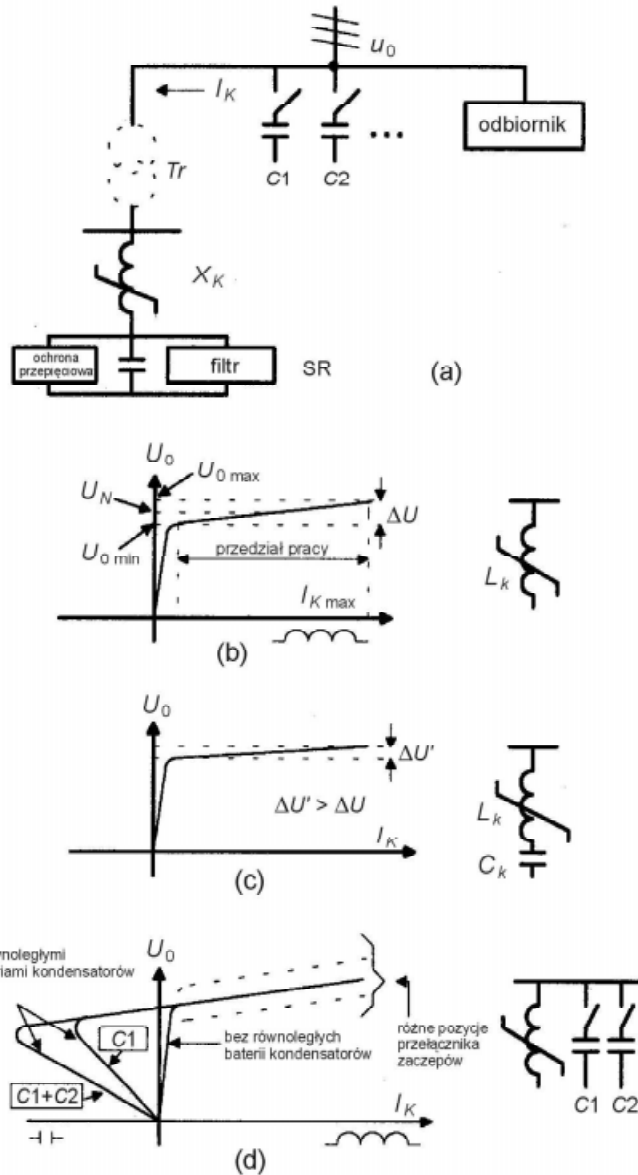
Samonasycający się dławik (SR)

Jest to jeden z pierwszych kompensatorów statycznych zastosowanych na skalę przemysłową do redukcji wahań napięcia i migotania światła. Może również służyć do redukcji załamań napięcia. Kontrola prądu biernego dławika realizowana jest w naturalny sposób poprzez wykorzystanie własności rdzenia magnetycznego w stanie nasycenia, gdy mała zmiana napięcia zasilającego wywołuje dużą zmianę prądu. Zasada działania samonasycającego się dławika przedstawiona jest schematycznie na rysunku 19. Głównym elementem składowym jest nasycający się obwód magnetyczny, którego wyidealizowaną charakterystykę przedstawia rysunek 19b. Technika projektowania takiego dławika zmierza do ukształtowania jego charakterystyki magnesowania, a tym samym charakterystyki prądowo-napięciowej dla podstawowej harmonicznej, z wyraźnym punktem zagięcia i liniowym przebiegiem w stanie nasycenia o niewielkim dodatnim nachyleniu w dużym przedziale zmian prądu. Przy małej wartości napięcia zasilającego dławik wychodzi ze stanu nasycenia i wywołując przepływ prądu magnesującego może być rozważany jak nie obciążony transformator. W tym stanie nie ma praktycznie żadnego wpływu na poziom napięcia.



Rys. 19. Zasada działania samonasycającego się dławika: a) schemat ideowy obwodu; b) charakterystyka magnesowania rdzenia

Kompensator jest przyłączony do sieci zasilającej najczęściej bez pośrednictwa obniżającego transformatora (rys. 20). Zastosowany transformator jest wyposażony w przełącznik zaczeów pod obciążeniem, sterowany zdalnie w funkcji napięcia lub prądu dławika. Prąd ten podczas pracy instalacji zmienia swą wartość od prawie zera do I_{Kmax} , czemu odpowiada zmiana wartości napięcia $U_0 \in (U_{0min}, U_{0max})$ -rysunek 20b. Jeżeli wymagana jest lepsza stabilizacja napięcia, uzyskuje się ją albo poprzez odpowiednią konstrukcję dławika (duże koszty), albo własne nachylenie charakterystyki dławika, wynoszące w typowych rozwiązaniach 8-15%, kompensowane jest za pomocą kondensatora korekcji nachylenia C_k - rysunek 20c. Efektem korekcji jest pogorszenie się jakości przebiegów przejściowych i niebezpieczeństwo drgań subharmonicznych (stąd filtr subharmonicznych) oraz zmniejszenie szybkości działania układu, osiągnięcie stanu ustalonego po każdej zmianie warunków pracy wymaga bowiem kilku okresów przebiegu napięcia.

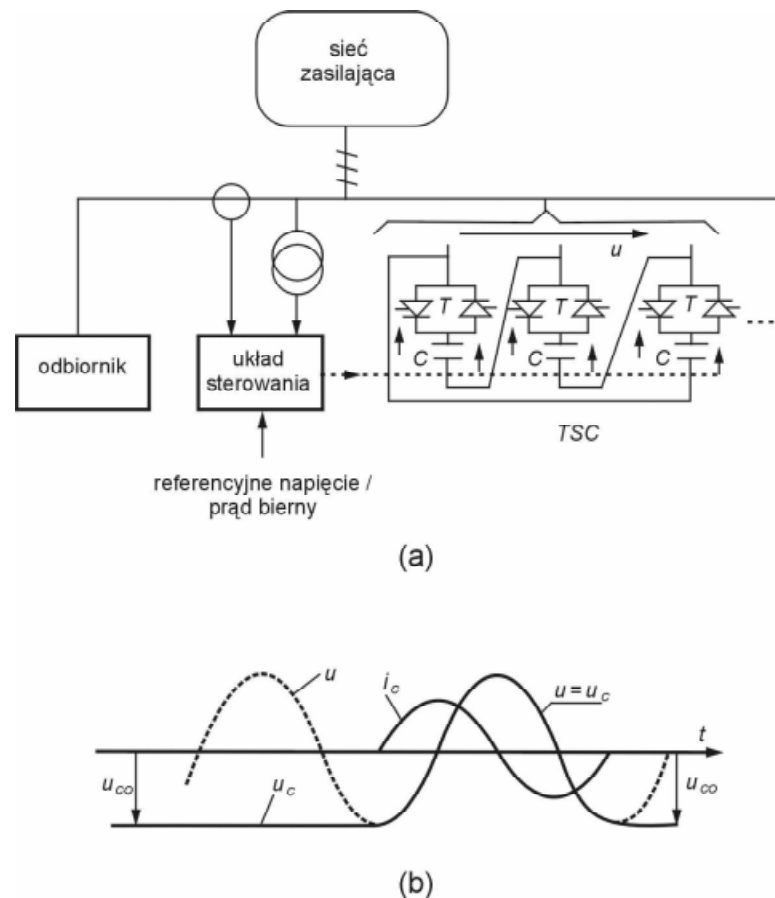


Rys. 20: a) schemat kompensatora z samonasycającym się dławikiem; b) charakterystyka naturalna dławika; c) charakterystyka z korekcją nachylenia; d) charakterystyki z równoległymi kondensatorami

Zmiana napięcia zasilającego powoduje zmianę wartości prądu biernego układu, a w ślad za tym zmianę wartości spadków napięcia na impedancji systemu zasilającego. W ten sposób kompensator pełni rolę stabilizatora i jako taki jest głównie stosowany. Układ może wywołać również przepływ pojemnościowego prądu biernego (w efekcie równoległego przyłączenia baterii kondensatorów pracujących jako filtr wh) - rysunek 20d. Baterie mogą być podzielone na sekcje (C1, C2 ...) załączane np. łącznikami tyrystorowymi, co w połączeniu z przełącznikiem zaczełów transformatora pozwala zlokalizować punkt pracy dławika w korzystnym przedziale zmian wartości napięcia.

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. 21a). 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. 21b). Czas reakcji przy pracy symetrycznej nie przekracza 20 ms.



Rys. 21: a) schemat kompensatora statycznego z bateriami kondensatorów załączanymi łącznikami tyrystorowymi;
b) przebiegi napięcia i prądu przy łączeniu kondensatora

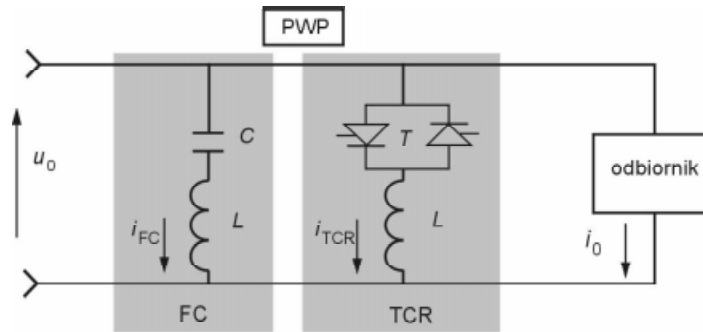
Układ ze stałą baterią kondensatorów (FC) oraz sterownikiem podstawowej harmonicznej prądu indukcyjnego (TCR)

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. 22):

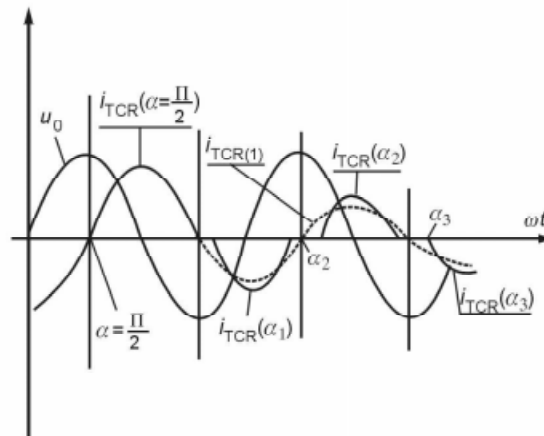
- podstawowej harmonicznej prądu i_{FC} kondensatora, pracującego prawie zawsze jako filtr/filtry wch lub jako przełączalne stopnie kondensatorów (układ TCR/TSC);

- podstawowej harmonicznej prądu dławika i_{TCR} regulowanej poprzez sterowanie fazowe tyrystorowego łącznika prądu przemiennego (T).

Rysunek 22a przedstawia jednofazowy schemat ideowy takiej instalacji, a rysunek 22b 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 $(0,5\pi; \pi)$.



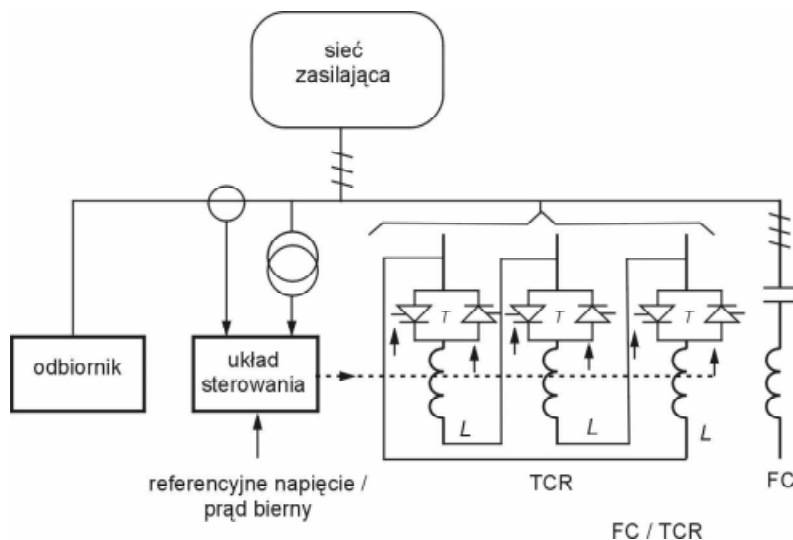
(a)



(b)

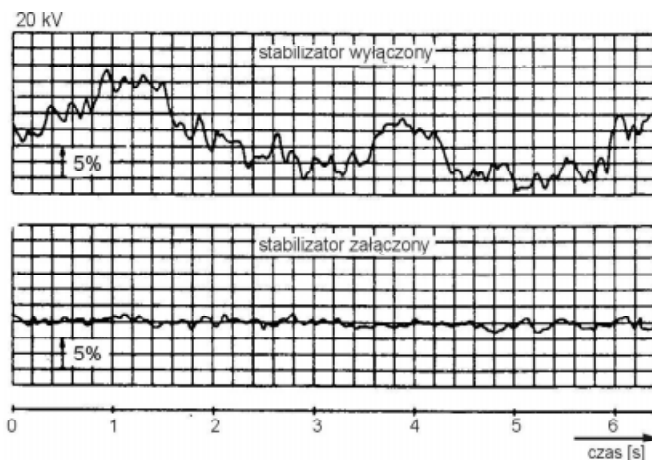
Rys. 22: a) jednofazowy schemat zastępczy układu FC/TCR; b) przebiegi czasowe napięcia i prądu ilustrujące zasadę działania

Na rysunku 22 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 wH stanowią dla sieci zasilającej włączone międzyfazowo zastępcze susceptancje (rys. 23). 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. 23. Schemat ideowy zamkniętego układu sterowania kompensatora FC/TCR

Na rysunku 24 przedstawiono przykładowe przebiegi ilustrujące zmiany wartości skutecznej napięcia na szynach elektroinstalowni (20 kV) dla przypadku wyłączonego i załączonego kompensatora FC/TCR.



Rys. 24. Przykładowy przebieg napięcia na szynach elektroinstalowni dla (a) wyłączonego i (b) załączonego kompensatora FC/TCR

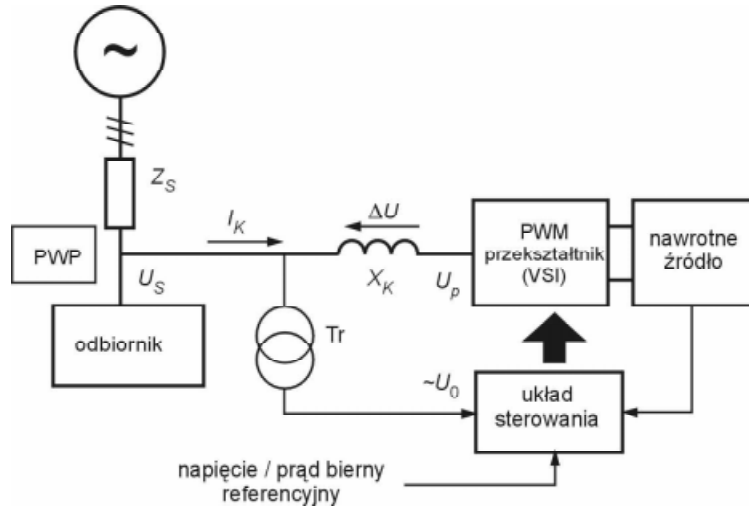
Układ TSC/TCR

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.

Przekształtnikowe źródła prądu/mocy biernej o komutacji własnej

Układ zawiera przekształtnik CSI (ang. *current source inverter*) lub częściej VSI (ang. *voltage source inverter*), którego stany łączeniowe elementów półprzewodnikowych

(modulacja PWM) decydują o wartości, a w wielu przypadkach również o charakterze mocy bierniej kompensatora (indukcyjna lub pojemnościowa).



Rys. 25. Schemat ideowy aktywnego, statycznego generatora prądu biernego podstawowej harmonicznej

W literaturze opisano wiele różnych, praktycznych rozwiązań takich kompensatorów¹¹. Każdy z nich jest najczęściej odrębnym układem o charakterystycznych, typowych dla niego, szczegółowych cechach. Możliwości takiego kompensatora są analogiczne jak maszyny synchronicznej (ale o znacznie większej szybkości działania). Podobny jest też jego schemat ideowy, który wraz z kompensowanym odbiornikiem został przedstawiony na rysunku 25, gdzie:

- X_k - reaktancja dławika lub transformatora przekształtnikowego,
- U_p - napięcie fazowe na zaciskach przekształtnika,
- ΔU - spadek napięcia na reaktancji wejściowej przekształtnika ($= X_k I_k$),
- I_k - podstawowa harmoniczna prądu kompensatora.

$$\text{Przyjmując: } \underline{U}_0 = U_0 e^{j\delta_1} \quad \underline{U}_p = U_p e^{j\delta_2} \quad (6)$$

gdzie δ_1 i δ_2 są początkowymi fazami wskazów napięcia w PWP i napięcia wyjściowego przekształtnika, prąd kompensatora opisany jest związkiem:

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}_0 - \underline{U}_p}{jX_k} = \frac{U_0 \sin \delta_1 - U_p \sin \delta_2}{X_k} - j \frac{U_0 \cos \delta_1 - U_p \cos \delta_2}{X_k} \quad (7)$$

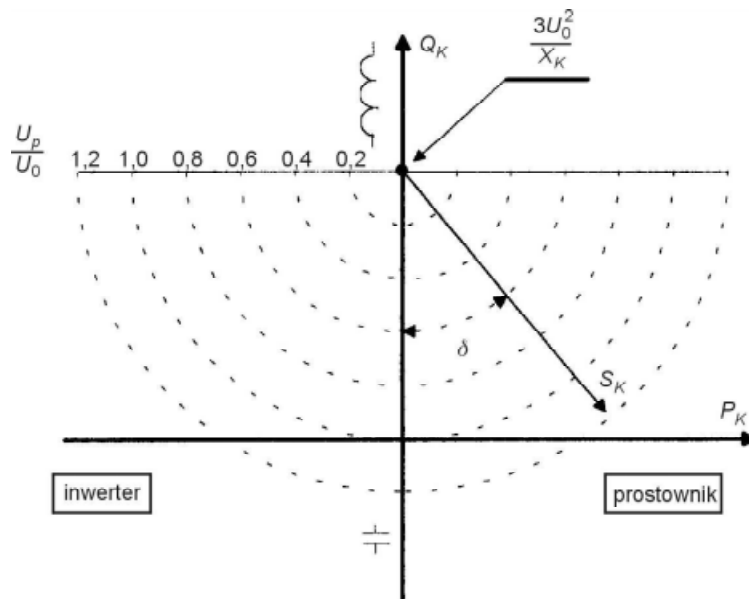
¹¹ Obecny postęp w produkcji elementów półprzewodnikowych dużej mocy umożliwia konstruowanie takich kompensatorów o mocach do kilkunastu MVA [6].

Moc pozorna \underline{S}_k kompensatora równa się:

$$\underline{S}_k = 3U_0 I_k^* = 3 \frac{U_0 U_p \sin \delta}{X_k} - j \left[\frac{U_0 U_p \cos \delta}{X_k} - \frac{U_0^2}{X_k} \right] = P_k + jQ_k \quad (8)$$

gdzie $\delta = \delta_1 - \delta_2$. Na podstawie zależności (8) przedstawiono na rysunku 26 wykres mocy kompensatora w układzie współrzędnych P_k - Q_k . Jego postać analityczną opisuje zależność (9).

$$P_k^2 + \left(Q_k - \frac{3U_0^2}{X_k} \right)^2 = \left(\frac{3U_0 U_p}{X_k} \right)^2 \quad (9)$$

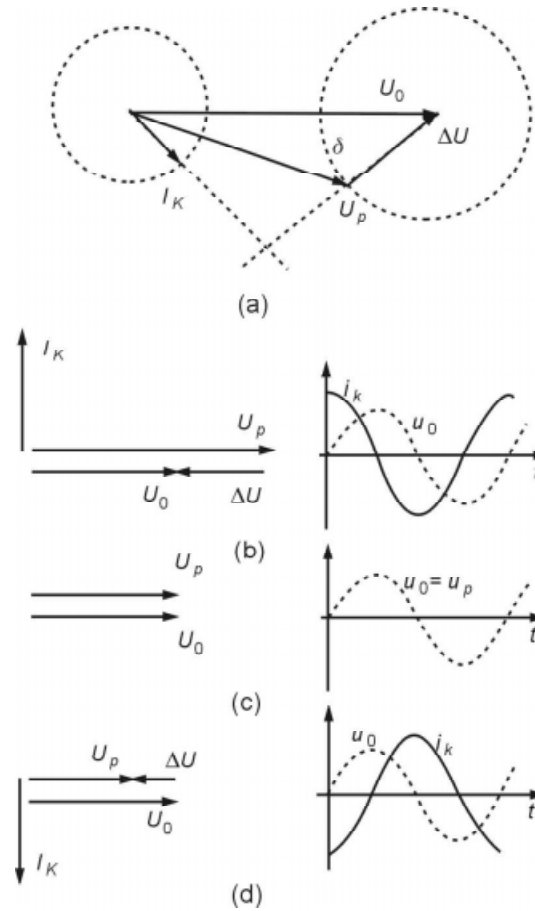


Rys. 26. Wykres mocy kompensatora w układzie współrzędnych P_k - Q_k

Zasadę działania układu przedstawiono na rysunku 27 za pomocą wykresów wskazowych dla przykładowo wybranych wartości kąta δ . Zmiana amplitudy składowej podstawowej napięcia wyjściowego przekształtnika U_p (dla $\delta = 0$) pozwala uzyskać prąd/moc bierną o charakterze zarówno pojemnościowym, jak i indukcyjnym (rys. 27b i d). Na rysunku 27a przedstawiono, za pomocą dwóch okręgów o promieniach odpowiednio I_k i $U_0 = \text{const}$, zmianę wartości napięcia U_p . Dla zadanego napięcia $U_0 = \text{const}$ i reaktancji X_k wartość mocy P_k i Q_k może ulegać zmianie w następstwie zmiany wartości kąta δ . Jak wynika z zależności (9):

- dla $\delta < 0$ kompensator pobiera moc czynną z sieci zasilającej,
- dla $\delta > 0$ kompensator oddaje moc czynną do sieci zasilającej,
- dla $\delta = 0$ kompensator pobiera wyłącznie moc bierną o charakterze pojemnościowym, gdy $U_p > U_0$ (rys. 27b), lub indukcyjnym, gdy $U_p < U_0$ (rys. 27d).

Przedstawione na rysunku 27 wykresy wskazowe dotyczą wyidealizowanego przypadku, gdy nie są uwzględniane straty mocy czynnej w kompensatorze.



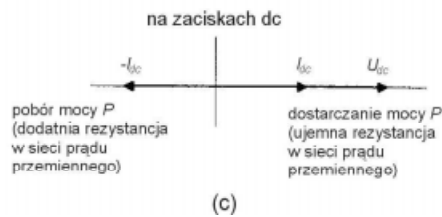
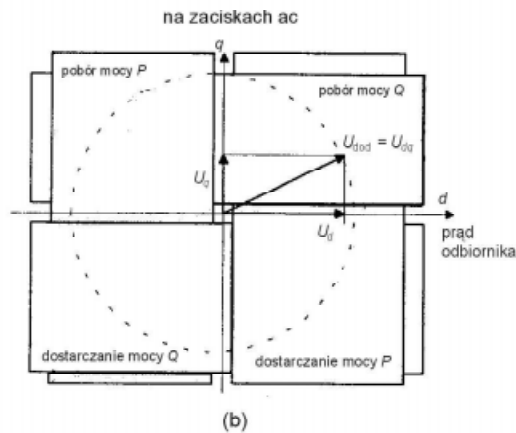
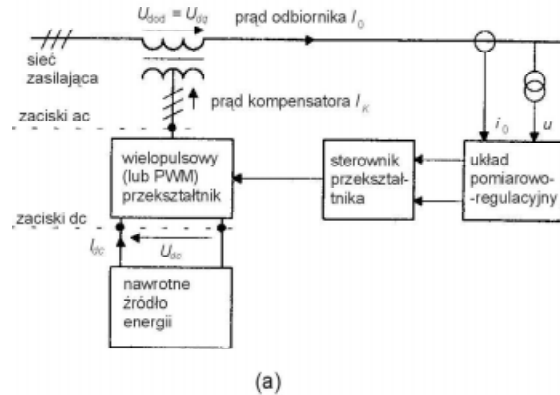
Rys. 27. Wykresy wskazowe ilustrujące pracę kompensatora: a) dla $I_k, U_0 = \text{const}, \delta = \text{var}$; b-d) dla wyróżnionych przypadków, gdy kompensator jest odbiornikiem wyłącznie mocy biernej lub znajduje się w stanie biegu jałowego

Prócz równoległego stabilizatora napięcia, istnieje możliwość praktycznej realizacji stabilizatora szeregowego, funkcjonującego na zasadzie transformatora dodatkowego (również przesuwnika fazowego napięcia dodatkowego). Celem działania takiego układu jest wytworzenie, np. za pomocą układu przekształtnikowego PWM, dodatkowego napięcia U_{dq} , którego wartość i faza - relacji do prądu odbiornika i_0 - podlegają regulacji. Schemat ideowy takiego układu jest przedstawiony na rysunku 28. W ogólnym przypadku taka topologia obwodu pozwala kontrolować przepływ mocy, zarówno czynnej, jak i biernej, jak również wartość impedancji linii zasilającej.

Wielopulsowy (lub PWM) przekształtnik może być traktowany jako idealne źródło napięcia - synchronizowane napięciem sieci zasilającej - reprezentowane na płaszczyźnie dq przez dwie ortogonalne składowe o regulowanych wartościach (rys. 28):

składową U_d - regulacja składowej współfazowej lub w przeciwfazie do prądu liniowego decyduje o wymianie mocy czynnej pomiędzy systemem zasilającym i kompensatorem;

składową U_q - regulacja składowej napięcia ortogonalnej do prądu liniowego decyduje o wartości (również charakterze) mocy biernej kompensatora szeregowego.



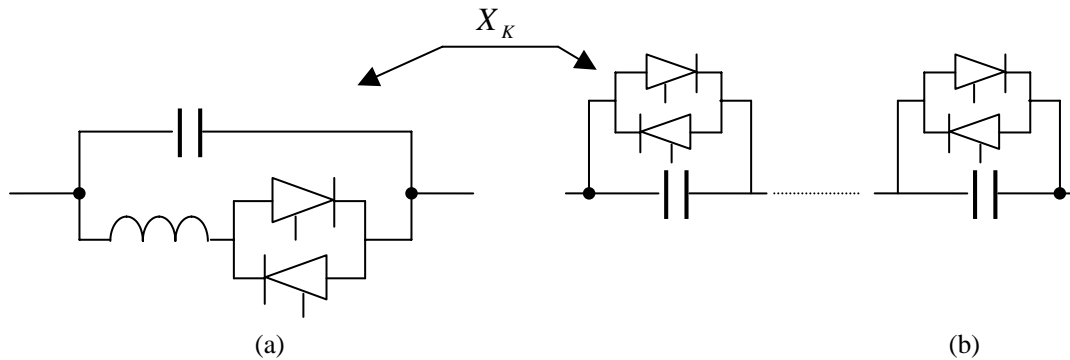
Rys. 28: a) schemat ideowy szeregowego kompensatora; b) możliwe stany pracy wyróżnione oddawaniem lub pobieraniem mocy czynnej i biernej; c) wykres wskazowy dla obwodu prądu stałego przekształtnika

Jeżeli harmoniczna podstawowa napięcia wyjściowego, proporcjonalna i ortogonalna do prądu liniowego, spóźnia się względem tego ostatniego, wówczas kompensator szeregowy realizuje kompensację spadku napięcia/reaktancji zastępczej linii zasilającej, analogicznie jak kondensatory szeregowo X_c . Wartość napięcia wyjściowego przekształtnika określona jest wówczas zależnością:

$$\underline{U}_{dq} = -jkX_s \underline{I}_0 \quad (10)$$

gdzie współczynnik proporcjonalności (k) jest stopniem szeregowej kompensacji.

Jeżeli przekształtnik ma dodatkowo możliwość realizacji takiego stanu pracy, w którym napięcie wyjściowe kompensatora wyprzedza prąd liniowy o kąt $\pi/2$, wówczas jest to równoznaczne ze wzrostem efektywnej reaktancji linii zasilającej. Stan ten pozwala na bardzo skuteczne tłumienie oscylacji mocy w systemie oraz ograniczenie wzrostu napięcia na odbiorczym końcu linii. Koncepcja ta jest więc alternatywą dla układów przedstawionych schematycznie na rysunku 29, w przypadku których zmiana reaktancji zastępczej linii zasilającej realizowana jest poprzez zmianę reaktancji (za pomocą tyrystorowych łączników prądu przemiennego) szeregowo przyłączonych elementów biernych.



Rys. 29. Zmienna reaktancja szeregowego kompensatora (X_K) realizowana w układzie: (a) FC/TCR, (b) TSC

7. ZAKOŃCZENIE

W wielu krajach prowadzone są obecnie bardzo intensywne badania nad różnymi aspektami zjawiska migotania światła i wahań napięcia. Jest to sytuacja zasadniczo inna od występującej w Polsce. W najbliższych kilku latach europejskie i międzynarodowe normy dotyczące tych zjawisk zaczną obowiązywać również w naszym kraju. Stan wiedzy o nich 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.

Opracowane, złożone algorytmy sterowania oraz dostępność urządzeń pozwalających na szybką ich realizację umożliwia wyposażenie tych układów w wielorakie funkcje użytkowe, istotne z punktu widzenia właściwej pracy systemu energetycznego, w tym również funkcję stabilizacji napięcia w stanach dynamicznych. Jeżeli przyjąć za początek historycznej drogi rozwoju przemysłowych stabilizatorów napięcia maszyną synchroniczną, to należy stwierdzić, że współczesna energoelektronika oferuje bardzo liczną rodzinę różnych rozwiązań technicznych pełniących między innymi zadanie stabilizacji. Urządzenia takie określane są w anglojęzycznej literaturze ogólnym mianem *układów elastycznej (regulowanej) transmisji energii prądu przemiennego FACTS (Flexible AC Transmission System)*. Stanowią one w swej istocie bardzo wyrafinowane techniczne rozwiązania tworzące nową jakość we współczesnej elektroenergetyce.

LITERATURA

1. Arruda A. A., Cavalcanti 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. Grönbaum 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. IEC 50 (161): 1990. *International Vocabulary (IEV) - Chapter 161: Electromagnetic compatibility*.
10. IEC 1000-2-1: 1990. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 1: Description of the environment - Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems*.
11. IEC 1000-2-2: 1990. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 2: - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*.
12. IEC 1000-3-1: 1992. *Flicker caused in the feeder network by the electrically operated domestic appliances and analogue equipment - Part 1: Definitions*.
13. IEC 1000-3-5: 1994. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5: Limits - Section 5: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current greater than 16 A*.
14. IEC 1000-3-7: 1996. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems – basic EMC publication*.
15. Ikoma M., Ichihara H., Kondo O.: *Study of the flicker level in the case where dc and ac arc furnaces exist*. UIE XIII Congress 1996.
16. Kowalski Z.: *Wahania napięcia w układach elektroenergetycznych*. WNT Warszawa, 1985.
17. Kowalski Z., Hanzelka Z.: *Dopuszczalne wahania napięcia*. JUEE 1997, 1, 3,.
18. Kozioł R., Hanzelka Z., Piróg S.: *Dynamiczne stabilizatory napięcia*. JUEE 1995, 1, 1, 17-25.
19. Mombauer W.: *Flicker caused by interharmonics*. etz Archiv 12, 12, 1990.
20. Mouton H. Du T., Beukes J., Enslin J.H.R., Smit I.: *A 2 MVA universal power quality conditioner*. CIGRE Session 2000, 13(14)36-09.
21. PN EN 1000-3-3: 1997. *Kompatybilność elektromagnetyczna - Dopuszczalne poziomy - Ograniczanie wahań napięcia i migotania światła powodowanych przez odbiorniki o prądzie znamionowym $\leq 16A$ w sieciach zasilających niskiego napięcia*.
22. PN EN 61000-4-11: 1997. *Kompatybilność elektromagnetyczna - Techniki badawcze i pomiarowe - Badania odporności na nagłe obniżenie napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia*.
23. PN EN 50 160: 1998. *Charakterystyki napięcia w publicznych sieciach zasilających*.
24. PN-EN 61000-4-15: 1998. *Miernik migotania światła - charakterystyka funkcjonalna i techniczna*.
25. PN-T-01030: 1996. *Kompatybilność elektromagnetyczna - Terminologia*.
26. Povh D., Weinhold M.: *Improvement of power quality by power electronic equipment*. CIGRE Session 2000, 13(14)36-06.
27. *Reactive power compensation*. ASEA NK 02 – 3005 E 1983.
28. Robert A., Couvreur M.: *Recent experience of connection of big arc furnaces with reference to flicker level*. CIGRE Session 1994.
29. Sakulin M., Renner H., Bergeron R., Key T., Nastasi D.: *International recommendation for universal use of the UIE/IEC flickermeter*. UIE XIII Congress on Electricity Applications, 1996.
30. Sakulin M.: *Flicker measurement - theory and practice*. SONT '95 Croatia.
31. Sakulin M., Renner H., Bergeron R., Hey T., Nastasi D.: *International recommendation for universal use of the UIE/IEC flickermeter*. UIE/BNCE Birmingham 1996.
32. *The arc furnace as a load on the network*. ASEA NR 500-008E 1981.