

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10)

PL 245388 B1

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **443454**

(22) Data zgłoszenia: **2023.01.11**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2024.01.29 BUP 05/2024**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2024.07.15 WUP 29/2024**

(51) MKP:

H02M 1/12 (2006.01)

H02M 1/38 (2007.01)

H02M 7/797 (2006.01)

H02J 3/01 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, Warszawa, PL

(72) Twórca(-y) wynalazku:

PIOTR FALKOWSKI, Grabówka, PL

SEBASTIAN STYŃSKI, Warszawa, PL

TOMASZ ŚWIĘCHOWICZ, Kraków, PL

KRZYSZTOF KULIKOWSKI, Białystok, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Oliwia Czarnocka, Warszawa, PL

(54) Tytuł:

Sposób i układ predykcyjnej kompensacji wpływu czasu martwego w przekształtnikach sieciowych

PL 245388 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób i układ predykcyjnej kompensacji wpływu czasu martwego w przekształtnikach sieciowych. Przekształtniki takie pozwalają na dwukierunkowy przepływ energii elektrycznej pomiędzy obwodami napięcia stałego i przemiennego. Sposób sterowania przekształtnikiem eliminuje zaburzenia własne pochodzące od czasu martwego. Dzięki temu znalazły zastosowanie jako główne bloki w odnawialnych źródłach energii, prostownikach aktywnych, filtrach aktywnych i kompensatorach mocy biernej.

Przekształtniki energoelektroniczne umożliwiające dwukierunkowy przepływ energii elektrycznej oprócz wykazywania odporności na zaburzenia napięcia sieci powinny być również odporne na zaburzenia własne których jednym z głównych źródeł jest wprowadzenie czasu martwego. Czas martwy wprowadzany jest do sygnałów sterujących tranzystorami w przekształtnikach energoelektronicznych w celu uniknięcia zwarcia obwodu pośredniczącego prądu stałego. Negatywną konsekwencją wprowadzenia czasu martwego jest znaczne zniekształcenie przebiegów napięć generowanych przez przekształtnik [Seung-Gi Jeong and Min-Ho Park, "The analysis and compensation of dead-time effects in PWM inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 38, no. 2, pp. 108–114, April 1991, doi: 10.1109/41.88903.]. Zniekształcenie to objawia się przede wszystkim zmianą amplitudy podstawowej harmonicznej oraz wprowadzeniem niepożądanych wyższych harmonicznych głównie 5, 7, 11 i 13. Jest to spowodowane tym, że w zależności od znaku prądu, wprowadzenie czasu martwego wpływa na wzrost bądź spadek napięcia odtwarzanego na zaciskach przekształtnika w odniesieniu do napięcia zadanego. Ponadto dodatkową przyczyną odkształcenia napięcia przekształtnika jest możliwość wystąpienia zatrzaśnięcia się prądu w momencie przechodzenia przez wartość zerową (zero current clamping – ZCC) w okresie trwania czasu martwego, co jeszcze bardziej zniekształca odtwarzane napięcie.

Czas martwy powodujący błędy w odtwarzaniu napięcia na zaciskach przekształtnika energoelektronicznego podłączonego do sieci elektroenergetycznej jest bezpośrednią przyczyną odkształcenia kształtowanego prądu przekształtnika. Odzwierciedla się to wzrostem wartości współczynnika zawartości wyższych harmonicznych, która nie powinna przekraczać wartości określonych odpowiednimi normami. W związku z tym, układy sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi muszą zawierać blok odpowiedzialny za kompensację wpływu czasu martwego.

W literaturze znane są sprzętowe metody korekcji wpływu czasu martwego, które jednak nie znalazły szerszego zastosowania ze względu na modyfikacje konstrukcyjne utrudniające zastosowanie w rozwiązaniach komercyjnych [Seung-Gi Jeong and Min-Ho Park, "The analysis and compensation of dead-time effects in PWM inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 38, no. 2, pp. 108–114, April 1991, doi: 10.1109/41.88903.], [Bin Zhang, A. Q. Huang and Bin Chen, "A novel IGBT gate driver to eliminate the dead-time effect," *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*, 2005., 2005, pp. 913–917 Vol. 2, doi: 10.1109/IAS.2005.1518427.]. Z drugiej strony istnieje szereg metod programowych polegających na obliczeniu napięcia korekcji, które następnie dodawane jest do napięcia zadanego uzyskanego z układu regulacji prądu. W najczęściej stosowanej tego typu metodzie, napięcie korekcji jest przebiegiem prostokątnym (dwu stanowym), którego polaryzacja zależy od znaku prądu przekształtnika określonego za pomocą funkcji signum [S. Hwang and J. Kim, "Dead Time Compensation Method for Voltage-Fed PWM Inverter," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 1, pp. 1–10, March 2010, doi: 10.1109/TEC.2009.203181T], [T. Mannen and H. Fujita, "Dead-Time Compensation Method Based on Current Ripple Estimation," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 7, pp. 4016–4024, July 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2352716.]. W metodzie tej napięcie kompensujące skokowo zmienia swoją wartość przy przejściu prądu przez zero. Kompensacja czasu martwego w obszarze, w którym prąd przechodzi przez wartość zerową jest utrudniona ze względu na błędy występujące przy określaniu właściwego znaku prądu. Niewielki „offset” w prądzie powoduje względnie duży błąd korekcji. Jest to szczególnie istotne przy małych wartościach prądu zadanego [A. C. Oliveira, C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, and E. R. C. da Silva, "Dead-time compensation in the zero-crossing current region," in *Proc. IEEE 34th Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, 2003, vol. 4, pp. 1937–1942.]. Jednym z rozwiązań jest wprowadzenie trójstanowego napięcia kompensującego [J. M. Schellekens, R. A. M. Bierbooms and J. L. Duarte, "Dead-time compensation for PWM amplifiers using simple feed-forward techniques," *The XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM 2010*, 2010, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608022.]. W takim rozwiązaniu napięcie kompensujące przyjmuje dodatkowo stan zerowy, gdy prąd przekształtnika znajduje się w określonym

przedziale bliskim zera. Kolejną metodą jest wprowadzenie przedziału, dla którego napięcie kompensujące zmienia się liniowo pomiędzy dwoma stanami niezerowymi [A. C. Oliveira, C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, and E. R. C. da Silva, "Dead-time compensation in the zero-crossing current region," in Proc. IEEE 34th Annu. Power Electron. Spec. Conf., 2003, vol. 4, pp. 1937–1942.]. Liniowa zmiana zachodzi w obszarze, w którym prąd jest bliski wartości zerowej. Wartość napięcia kompensującego jest wtedy liniowo zależna od prądu odniesionego do szerokości obszaru. W obu metodach szerokość przedziału dobiera się na podstawie założonej na etapie projektowania przekształtnika amplitudy tętnień prądu. Tętnienia te jednak mogą się zmieniać w zależności od wielu czynników, co wpływa niekorzystnie na dokładność metody kompensacji.

Wyżej wymienione metody kompensacji czasu martwego mają również zdecydowanie małą skuteczność korekcji, gdy przekształtnik energoelektroniczny pracuje z indukcyjnościami filtrów do kształtowania przebiegu prądu wyjściowego o stosunkowo niewielkich wartościach. Wówczas tętnienia prądu mają znaczną wartość w odniesieniu do amplitudy. W takim wypadku pojawiają się dwa główne problemy. Pierwszy polega na tym, że prąd próbkowany, na podstawie którego określone jest napięcie kompensujące, może zmieniać znak kilkakrotnie w trakcie trwania cyklu modulacji. W konwencjonalnych metodach prowadzi to do błędnego obliczania napięcia korekcji, a prosta predykcja średniej wartości prądu nie jest w stanie poprawić tego błędu. Drugi problem związany jest z przełączaniem prądu o małej wartości, gdzie podczas czasu martwego może dojść do przerywania przewodzenia prądu tzn. zatrzaśnięcia prądu w zerze, a w konsekwencji błędu w odtwarzaniu wartości zadanych napięcia i prądu przekształtnika.

W związku z wadami dotychczas stosowanych metod kompensacji czasu martwego opracowano sposób predykcyjnej kompensacji czasów martwych poprawiający jakość kompensacji. Proponowane rozwiązanie polega na wyznaczeniu przewidywanych chwilowych wartości prądu w momencie wystąpienia przełączenia łączników przekształtnika. Wartości te pozwalają na określenie napięcia kompensującego również w obszarze, w którym prąd przechodzi przez wartość zerową. Ponadto opracowany algorytm przewiduje wystąpienie zjawiska ZCC aktywując odpowiedni tryb korekcji. Korekcja zjawiska ZCC polega na estymacji średniej wartości napięcia na zaciskach przekształtnika. Napięcie to jest obliczane w sposób iteracyjny na podstawie znajomości przewidywanych chwilowych wartości prądu i charakterystycznych przedziałów czasu występujących po przełączeniu łączników. W każdej iteracji obliczane jest napięcie korekcji będące różnicą napięcia zadanego i estymowanego na zaciskach przekształtnika, a rozwiązanie zapisywane jest w tablicy. W kolejnej iteracji do napięcia zadanego dodawana jest zsumowana wartość napięcia korekcji czasu martwego z poprzednich iteracji i cały proces powtarzany jest ponownie. Ostatecznie z tablicy wybierane jest napięcie kompensujące czas martwy dla którego średnia wartość napięcia przekształtnika była najbliższa wartości zadanej.

Proponowane rozwiązanie uwzględnia dodatkowo charakter działania czujników pomiarowych prądu i napięcia. W zależności od tego czy pomiar realizowany jest z wykorzystaniem czujników analogowych czy cyfrowych wykonywana jest korekcja zmierzonych wartości prądu i napięcia pozwalająca na kompensację opóźnień układu sterowania.

1. Przedmiotem wynalazku jest sposób predykcyjnej kompensacji wpływu czasu martwego w przekształtnikach sieciowych zwłaszcza przekształtnika energoelektronicznego jednofazowego półmostkowego lub o topologii pełnego mostka typu H, przekształtnika energoelektronicznego trójfazowego, przekształtnika energoelektronicznego trójfazowego z czwartą gałęzią kondensatorową lub gałęzią aktywną podłączonego przez filtr do sieci napięcia przemiennego charakteryzujący się tym, że prowadzi się następujące etapy:

wyznaczenie przewidywanej średniej wartości napięcia u_{sk} pomiędzy momentem rozpoczęcia procesu modulacji a momentem przełączenia wartości napięcia sieci u_{sk_sr} , przy czym wyznaczenie to przeprowadza się na podstawie współczynnika wypełnienia wyp oraz skorygowanego napięcia sieci u_{sk} oraz napięcia obwodu prądu stałego u_{dc} uprzednio wyznaczając przyrost Δu_{sk} wartości napięcia na podstawie zależności:

$$\Delta u_{sk} = u_{sk}(k) - u_{sk}(k-1)$$

będącą różnicą pomiędzy wartością aktualną $u_{sk}(k)$, a wartością z poprzedniego kroku próbkowania $u_{sk}(k-1)$,

wyznaczenie przewidywanej chwilowej wartości napięcia sieci u_{sk_prze} w momencie wystąpienia przełączenia a następnie

wyznaczenie przewidywanych chwilowych wartości prądu przekształtnika energoelektronicznego i_{pk} w momencie przełączania na podstawie zależności:

$$i_{pk_prze} = i_{pk} + \frac{u_{sk_sr} - i_{pk} * R - u_{p0}}{L} t_0 \text{ po czym}$$

na podstawie przewidywanej chwilowej wartości prądu wykonywana jest korekcja czasu martwego, przy czym napięcie korekcji przyjmuje wartość +/- u_{dc} , którego polaryzacja zależna jest od znaku przewidywanej wartości chwilowej prądu przekształtnika energoelektronicznego i_{pk} określonego za pomocą poniższej funkcji signum

$$if(i_{pk_prze} > 0) => u_{zad_k} = u_{zad}$$

$$if(i_{pk_prze} < 0) => u_{zad_k} = u_{zad} + \frac{2 * u_{p1}}{T_p/2}$$

sprawdzenie czy wystąpi zatrzaśnięcie się prądu w momencie przechodzenia przez wartość zerową ZCC poprzez wyznaczenie granicznej wartości prądu zapewniającej przewodzenie ciągłe i_{gr_zcc} :

$$i_{gr_zcc} = \frac{u_{sk_prze} - i_{pk_prze} * R - u_{p1}}{L} t_{dt}$$

gdzie: t_{dt} – czas martwy, a następnie

porównywanie wartości prądu i_{gr_zcc} z przewidywaną wartością chwilową w momencie przełączenia i_{pk_prze} i wskazanie zatrzaśnięcia ZCC gdy spełniony jest warunek $i_{pk_prze} < i_{gr_zcc}$ po czym przy spełnieniu wartość napięcia korekcji czasu martwego u_{kcm} .

Korzystnie, dla przekształtnika jednofazowego o topologii pełnego mostka typu H, w zależności od typu modulacji, lub przekształtnika trójfazowego a także przekształtnika trójfazowego z czwartą gałęzią kondensatorową lub gałęzią aktywną etapy sposobu wykonywane są najpierw względem przełączenia w tej gałęzi przekształtnika, w której przełączenie nastąpi najpierw a kończąc na gałęzi w której przełączenie nastąpi na końcu.

Korzystnie, wartość współczynnika wypełnienia wyp wyznacza się z poniższej zależności

$$wyp = \frac{1}{2 * u_{dc}} u_{zad} + 0,5$$

a wartość średnią napięcia u_{sk_sr} wyznacza się z poniższej zależności

$$u_{sk_sr} = 0,25 * wyp * \Delta u_{sk} + u_{sk}(k)$$

gdzie wartość współczynnika wypełnienia wyp zależy od typu zastosowanej modulacji oraz topologii przekształtnika oraz gdzie $wyp \in < 0; 1 >$

Korzystnie, wyznacza się przewidywaną chwilową wartość napięcia sieci u_{sk_prze} w momencie wystąpienia przełączenia na podstawie poniższej zależności

$$u_{sk_prze} = 0,5 * wyp * \Delta u_{sk} + u_{sk}(k)$$

Korzystnie, w czasie iteracyjnej korekcji wartości napięcia wyznacza się czasy trwania dwóch charakterystycznych odcinków czasu pozwalających na wyznaczenie średniej wartości napięcia przekształtnika, pierwszy odcinek czasu t_{zcc} stanowi czas trwania ZCC a drugi odcinek czasu t_{dt_cond} stanowi czas od momentu przełączenia do chwili, w której prąd osiąga wartość zerową,

w pierwszej iteracji wyznaczenia czasów t_0 i t_1 dokonuje się z zależności

$$t_0 = wyp * T_p/2$$

$$t_1 = \frac{T_p}{2} - t_0 - t_{dt}$$

po czym wyznaczana jest przewidywana chwilowa wartość prądu w momencie przełączenia i_{pk_prze}

$$i_{pk_prze} = i_{pk} + \frac{u_{sk_sr} - i_{pk} * R - u_{p0}}{L} t_0$$

następnie na podstawie przewidywanej wartości prądu w momencie przełączenia i_{pk_prze} określany jest znak napięcia przekształtnika u_{p_dt} kształtowanego w czasie martwym t_{dt} .

$$if(i_{pk_prze} > 0) \Rightarrow u_{p_dt} = -u_{dc}$$

$$if(i_{pk_prze} < 0) \Rightarrow u_{p_dt} = u_{dc}$$

po czym wyznacza się czas trwania ZCC t_{zcc} oraz drugi odcinek czasu t_{dt_cond} z poniższych zależności

$$t_{zcc} = t_{dt} + i_{pk_prze} * \frac{L}{u_{sk_prze} - u_{p_dt}}$$

$$t_{dt_cond} = t_{dt} - t_{zcc}$$

następnie, wyznaczana jest średnia wartość napięcia przekształtnika u_{sp}

$$u_{sp} = \frac{t_0 * u_{p0} + t_{dt_cond} * u_{p_dt} + t_{zcc} * u_{sk_prze} + t_1 * u_{p1}}{T_p/2}$$

następnie od wartości zadanej napięcia u_{zad} odejmowana jest obliczana wartość średnia napięcia przekształtnika u_{sp} wskazując wartość napięcia u_{kcm} , i jeżeli wartość u_{kcm} w aktualnej iteracji jest mniejsza od tej z poprzedniej iteracji to zapamiętywany jest numer iteracji a równolegle wartość napięcia u_{kcm} dodawana jest do wielkości u_{kcm_sum} , której zadaniem jest sumowanie u_{kcm} z każdej iteracji, jednocześnie wartość wielkości napięcia u_{kcm_sum} w każdej iteracji zapamiętywana jest w strukturze DEM-MUL z blokami pamięci lub alternatywnie w tablicy,

wyznacza się wartość napięcia zadanego po korekcji u_{zad_k} poprzez dodanie do napięcia zadanego u_{zad} odczytanej wartości $u_{kcm_sum}(i_{min})$.

dokonyuje się kompensacji czasu martwego poprzez przekazania do układu sterowania przekształtnikiem wartości napięcia zadanego po korekcji u_{zad_k} .

Przedmiot wynalazku jest również układ predykcyjnej kompensacji wpływu czasu martwego w przekształtnikach sieciowych zawierający z jednej strony filtra sprzęgającego dołączoną sieć napięcia przemiennego z włączonym w obwód czujnikiem napięcia przemiennego, a z drugiej strony filtra sprzęgającego przekształtnik energoelektroniczny z włączonym w obwód czujnikiem prądu, gdzie do przekształtnika energoelektronicznego dołączony jest czujnik napięcia stałego i źródło napięcia stałego charakteryzujący się tym, że do filtra sprzęgającego dołączony jest układ korekcji czasu martwego poprzez układ sterowania przekształtnikiem, jednocześnie do układu korekcji czasu martwego dołączony jest układ korekcji pomiarów i regulator prądu, a ponadto układ korekcji czasu martwego dołączony jest do czujnika napięcia stałego, oraz

układ korekcji czasu martwego połączony jest jednokierunkowo z układem korekcji pomiarów, który dołączony jest do wyjścia czujnika napięcia przemiennego oraz czujnika prądu i jednocześnie do wyjścia regulatora prądu, przy czym

do regulatora prądu dołączony dołączony jest sumator, który to sumator włączony jest pomiędzy czujnik prądu oraz układ korekcji pomiarów.

Korzystnie, głównym blokiem układu korekcji czasu martwego jest układ obliczania napięcia średniego przekształtnika.

Przedmiot wynalazku został uwidoczniiony w przykładzie wykonania na rysunku na którym:

fig. 1 – przedstawia schemat blokowy przekształtnika energoelektronicznego sprzęgniętego z siecią elektroenergetyczną,

fig. 2 – wewnętrzną strukturę układu korekcji czasu martwego,

fig. 3 – schemat przekształtnika energoelektronicznego jednofazowego półmostkowego oraz przebieg generowanego napięcia,

fig. 4 – przebiegi napięcia generowanego przez przekształtnik energoelektroniczny oraz napięcie sieci u_s , przewidywana średnia wartość napięcia sieci u_{sk_sr} i przewidywana chwilowa wartość napięcia sieci u_{sk_prze} ,

fig. 5 – przebieg napięcia przekształtnika w momencie przełączenia bez wystąpienia efektu ZCC a

fig. 6 – przebieg napięcia przekształtnika w momencie przełączenia przy wystąpieniu efektu ZCC,

fig. 7a – przebiegi napięcia sieci u_s , prądu sieci i_s , uśrednionego za okres prądu sieci i_{s_sr} , wartość napięcia korekcji czasu martwego $u_{kcm_sum}(i_{min})$ oraz wartość współczynnika wypełnienia wyp dla układu pracującego bez korekcji czasów martwych,

fig. 7b – przebiegi napięcia sieci u_s , prądu sieci i_s , uśrednionego za okres prądu sieci i_{s_sr} , wartość napięcia korekcji czasu martwego $u_{kcm_sum}(i_{min})$ oraz wartość współczynnika wypełnienia wyp dla układu pracującego z korekcją czasów martwych wg wynalazku,

fig. 7c – wartości pierwszych 49 harmoniczných prądu sieci dla układu pracującego bez korekcji czasów martwych oraz z korekcją czasów martwych wg wynalazku,

fig. 7d – wartości pierwszych 49 harmoniczných prądu sieci dla układu pracującego z korekcją czasów martwych wg wynalazku.

Przykład wykonania

Poniżej przedstawiony zostanie opis działania sposobu i układu predykcyjnej korekcji czasu martwego.

Sposób sterowania przekształtnikiem energoelektronicznym PE, który może być zarówno przekształtnikiem jednofazowym półmostkowym lub o topologii pełnego mostka typu H, przekształtnikiem trójfazowym, przekształtnikiem trójfazowym z czwartą gałęzią kondensatorową lub gałęzią aktywną podłączonym przez filtr F do sieci napięcia przemiennego SNP wraz z układem korekcji czasu martwego UKCM przedstawiono na Fig. 1. Do wejścia regulatora prądu RP podawany jest sygnał pochodzący z sumatora będącego różnicą prądu zadanego i_{zad} i prądu przekształtnika i_p pochodzącego z czujnika prądu CP. Sygnał wyjściowy z RP jest napięciem zadanym PE u_{zad} . Sposób sterowania przedstawiony na Fig. 1 wyposażony jest w układ korekcji pomiarów – UKP – prądu i_p oraz napięcia SNP u_s z czujnika napięcia przemiennego CNAC, którego zadaniem jest skompensowanie opóźnień wprowadzanych przez układ sterowania przekształtnikiem USP. Kompensacja wymaga znajomości parametrów elektrycznych obwodu mocy oraz stałych czasowych algorytmu sterowania, dlatego też dodatkowo do wejścia UKP podawane są sygnały reprezentujące parametry PE takie jak L – indukcyjność filtra F od strony PE, R – rezystancja filtra F od strony PE oraz okres próbkowania T_p , jak również napięcie zadane PE u_{zad} . Sygnały wyjściowe u_{sk} oraz i_{pk} z UKP reprezentują odpowiednio skorygowane wartości zmierzone prądu i_p , napięcia u_s . Następnie sygnały: napięcia zadanego PE u_{zad} , skorygowanych wartości zmierzonych u_{sk} i i_{pk} , parametrów elektrycznych obwodu mocy R i L, wartość okresu próbkowania T_p oraz sygnał napięcia obwodu prądu stałego u_{dc} z czujnika napięcia CNDC podawane są na wejścia układu korekcji czasu martwego UKCM. Sygnał wyjściowy u_{zad_k} UKCM reprezentuje napięcie zadane po korekcji czasu martwego, które podawane jest na wejście układu sterowania przekształtnika USP.

Fig. 2 przedstawia wewnętrzną strukturę UKCM. Głównym blokiem UKCM jest układ obliczania napięcia średniego przekształtnika UONŚP. Na wejście UONŚP podawane są sygnały: napięcie zadane PE u_{zad} , skorygowane wartości zmierzone u_{sk} i i_{pk} , parametry elektryczne obwodu mocy R i L, wartość okresu próbkowania T_p , wartość zmierzona napięcia obwodu prądu stałego u_{dc} oraz sygnał $u_{kcm_sum}(i-1)$, którego sposób wyznaczania oraz reprezentacja fizyczna zostały opisane w dalszej części. UONŚP działa w sposób iteracyjny, gdzie symbol i reprezentuje numer danej iteracji, przy czym $i \in \{1; n\}$. Sygnałem wyjściowym UONŚP jest sygnał reprezentujący napięcie średnie przekształtnika $u_{sp}(i)$ obliczone w i -tej iteracji. Sygnał korekcji czasu martwego $u_{kcm}(i)$ z i -tej iteracji jest sygnałem pochodzącym z sumatora wyznaczającego różnicę pomiędzy u_{zad} oraz $u_{sp}(i)$. Po każdej iteracji nowa wartość $u_{kcm}(i)$ jest sumowana w bloku sumatora, na wyjściu którego znajduje się sygnał $u_{kcm_sum}(i)$ reprezentujący aktualną wartość zsumowanego napięcia korekcji czasu martwego zgodnie z zależnością: $u_{kcm_sum}(i) = \sum_{i=1}^n u_{kcm}(i)$. Sygnał $u_{kcm_sum}(i)$ podawany jest na wejście układu Z^{-1} , który wprowadza opóźnienie

o jedną iterację. Na wyjściu bloku Z^{-1} znajduje się sygnał $u_{kcm_sum}(i-1)$ reprezentujący zsumowane napięcie korekcji obliczone w poprzedniej iteracji, który podawany jest na wejście UONŚP. Dalej sygnał $u_{kcm_sum}(i)$ podawany jest na wejście demultipleksera DEM, gdzie na wejście adresowe DEM podawany jest sygnał i . Wyjścia DEM połączone są do bloków pamięci, które przechowują wartości $u_{kcm_sum}(i)$ dla danej iteracji i . Wyjścia bloków pamiętających połączone są z wejściami multipleksera MUL. Do wejścia adresowego MUL podawany jest sygnał i_{min} . Wyjście MUL reprezentuje sygnał $u_{kcm_sum}(i_{min})$. Wyznaczenie i_{min} zachodzi w układzie obliczania optymalnego rozwiązania UOOR do którego podawany jest sygnał $u_{kcm}(i)$ oraz $u_{kcm}(i-1)$ poprzez układ Z^{-1} , który wprowadza opóźnienie sygnału $u_{kcm}(i)$ o jedną iterację. Jeżeli w danej iteracji spełniony jest warunek $u_{kcm}(i) < u_{kcm}(i_{min})$ to zapamiętywany jest numer iteracji poprzez przypisanie $i_{min} = i$. Alternatywnie wartość $u_{kcm_sum}(i_{min})$ przy implementacji UKCM w mikrokontrolerze może być wyznaczana w taki sposób, że wartości $u_{kcm_sum}(i)$ mogą być zapisywane w tablicy, a po skończonym procesie iteracyjnej korekcji wpływu czasu martwego z tablicy pobierana jest ta wartość $u_{kcm_sum}(i)$ dla której $u_{kcm}(i)$ przyjmowało najmniejszą wartość. Niezależnie od sposobu wyznaczenia $u_{kcm_sum}(i_{min})$ po zakończonym iteracyjnym procesie obliczania $u_{kcm_sum}(i)$ wyznaczone jest napięcie zadane PE po korekcji czasu martwego u_{zad_k} jako suma napięć $u_{kcm_sum}(i_{min})$ i u_{zad} .

Lista działań wykonywanych w UONŚP przedstawia się następująco:

1. W przypadku PE jednofazowego półmostkowego wyznaczenie przewidywanej średniej wartości napięcia u_{sk} pomiędzy momentem rozpoczęcia procesu modulacji, a przełączeniem. Obliczenia wykonywane są na podstawie znajomości współczynnika wypełnienia oraz skorygowanego napięcia sieci u_{sk} . W przypadku przekształtnika jednofazowego o topologii pełnego mostka typu H (w zależności od typu modulacji) lub przekształtnika trójfazowego a także przekształtnika trójfazowego z czwartą gałęzią kondensatorową lub gałęzią aktywną obliczenia wykonywane są najpierw względem przełączenia w tej gałęzi przekształtnika, w której przełączenie nastąpi najpierw a kończąc na gałęzi w której przełączenie nastąpi na końcu.
2. Obliczenie przewidywanych chwilowych wartości napięcia u_{sk} w momencie wystąpienia przełączenia w danej gałęzi.
3. Obliczenie przewidywanych chwilowych wartości prądu PE i_{pk} w momencie występowania przełączania.
4. Na podstawie przewidywanych chwilowych wartości prądu PE i_{pk} wykonywana jest korekcja czasu martwego. Napięcie korekcji przyjmuje wartość $\pm u_{dc}$, którego polaryzacja zależna jest od znaku przewidywanej wartości chwilowej prądu PE i_{pk} określonego za pomocą funkcji signum .
5. Sprawdzenie czy w gałęzi, dla której aktualnie wyznaczane jest napięcie korekcji wystąpi zjawisko ZCC. W tym celu obliczana jest wartość minimalna prądu zapewniająca przewodzenie ciągłe, która następnie porównywana jest z przewidywaną wartością chwilową obliczoną w punkcie 3. Jeżeli warunek nie jest spełniony to nie jest wykonywana korekcja ZCC. Dla PE jednofazowego półmostkowego działanie UONŚP zostaje zakończone dla danego półcyklu modulacji. W przypadku przekształtnika jednofazowego o topologii pełnego mostka typu H (w zależności od typu modulacji) lub przekształtnika trójfazowego a także przekształtnika trójfazowego z czwartą gałęzią kondensatorową lub gałęzią aktywną UONŚP przechodzi do cyklicznie do kolejnej gałęzi, w której nastąpi przełączenie powtarzając kroki 1–5 i kończąc na gałęzi w której przełączenie nastąpi na końcu. Jeżeli jednak warunek jest spełniony, następuje przejście do kroku 6.
6. UONŚP przechodzi do iteracyjnej korekcji ZCC. W trakcie korekcji obliczane są czasy trwania charakterystycznych odcinków zmiany napięcia i prądu wyjściowego PE pozwalających na obliczenie średniej wartości napięcia przekształtnika kształtowanego w danej gałęzi. Następnie od wartości zadanej napięcia odejmowana jest obliczana wartość średnia napięcia PE. Obliczona różnica nazwana jest napięciem u_{kcm} . Jeżeli wartość $u_{kcm}(i)$ w aktualnej iteracji jest mniejsza od tej z poprzedniej iteracji to zapamiętywany jest numer tej iteracji jako i_{min} . Równolegle wartość napięcia u_{kcm} dodawana jest do wielkości u_{kcm_sum} . W ten sposób w każdej iteracji u_{kcm_sum} jest zwiększane o aktualnie obliczoną wartość u_{kcm} . Wartość u_{kcm_sum} w każdej iteracji zapamiętywana jest w strukturze DEM-MUL z blokami pamięci lub alternatywnie w tablicy. W kolejnej nowej iteracji do wykonania wymienionych wyżej obliczeń wykorzystana jest również wartość u_{kcm_sum} z poprzedniej iteracji. Po wykonaniu wszystkich iteracji na podstawie zapamiętanego numeru iteracji i_{min} , dla którego wartość $u_{kcm}(i)$ była najmniejsza odczytywana jest w strukturze DEM-MUL z blokami pamięci lub alternatywnie w tablicy wartość

$u_{kcm_sum}(i_{min})$. Wartość napięcia korekcji czasu martwego wyznaczana jest poprzez dodanie odczytanej wartości $u_{kcm_sum}(i_{min})$ i napięcia zadanego u_{zad} . Dla PE jednofazowego półmostkowego działanie UONŚP zostaje zakończone dla danego pół cyklu modulacji. W przypadku przekształtnika jednofazowego o topologii pełnego mostka typu H (w zależności od typu modulacji) lub przekształtnika trójfazowego a także przekształtnika trójfazowego z czwartą gałęzią kondensatorową lub gałęzią aktywną UONŚP przechodzi do cyklicznie do kolejnej gałęzi, w której nastąpi przełączenie powtarzając kroki 1–5 i kończąc na gałęzi w której przełączenie nastąpi na końcu.

7. Po zakończeniu cyklu wyznaczania napięcia korekcji dla każdej z gałęzi PE (w zależności od topologii PE) w danym pół cyklu modulacji, UONŚP przechodzi do kolejnego pół cyklu modulacji, zgodnie z powyższymi krokami. W zależności od zastosowanego algorytmu sterowania wykorzystuje do obliczeń te same wartości napięcia zadanego PE u_{zad} , lub wartości zaktualizowane dla danego pół cyklu. Po zakończeniu cyklu wyznaczania napięcia korekcji dla kolejnego półcyklu, proces predykcyjnej kompensacji wpływu czasu martwego w danym okresie próbkowania T_p zostaje zakończony.

Przykład zastosowania w UONŚP dla PE jednofazowego półmostkowego, gdzie gałąź generuje dwa poziomy napięcia wyjściowego zgodnie z Fig. 3 przedstawia się następująco:

1. Wyznaczenie przewidywanej średniej w przedziale od rozpoczęcia danego pół cyklu modulacji do momentu wystąpienia przełączenia wartości napięcia sieci u_{sk_sr} (Fig. 4). Obliczenia wykonywane są na podstawie znajomości współczynnika wypełnienia wyp , skorygowanego napięcia sieci u_{sk} oraz napięcia obwodu prądu stałego u_{dc} . Krokiem pośrednim przedstawionym na Fig. 4 jest obliczenie wartości Δu_{sk} . Wielkość Δu_{sk} obliczana jest jako różnica pomiędzy wartością aktualną $u_{sk}(k)$, a wartością z poprzedniego kroku próbkowania $u_{sk}(k-1)$.

$$wyp = \frac{1}{2 \cdot u_{dc}} u_{zad} + 0,5 \text{ gdzie } wyp \in < 0; 1 >$$

$$\Delta u_{sk} = u_{sk}(k) - u_{sk}(k-1)$$

$$u_{sk_sr} = 0,25 * wyp * \Delta u_{sk} + u_{sk}(k)$$

2. Obliczenie przewidywanej chwilowej wartości napięcia sieci u_{sk_prze} w momencie wystąpienia przełączenia (Fig. 4).

$$u_{sk_prze} = 0,5 * wyp * \Delta u_{sk} + u_{sk}(k)$$

3. Obliczenie czasu trwania napięcia przekształtnika w przedziale przed przełączeniem t_0 , napięcia przekształtnika przed przełączeniem u_{p0} i po przełączeniu u_{p1} .

$$t_0 = wyp * T_p / 2$$

$$u_{p0} = u_{dc}$$

$$u_{p1} = -u_{dc}$$

4. Obliczenie przewidywanej chwilowej wartości prądu w momencie przełącznika i_{pk_prze}

$$i_{pk_prze} = i_{pk} + \frac{u_{sk_sr} - i_{pk} * R - u_{p0}}{L} t_0$$

5. Na podstawie przewidywanej chwilowej wartości prądu wykonywana jest korekcja czasu martwego. Napięcie korekcji przyjmuje wartość +/- u_{dc} , którego polaryzacja zależna jest od znaku przewidywanej wartości chwilowej prądu PE i_{pk} określonego za pomocą funkcji signum .

$$if(i_{pk_prze} > 0) \Rightarrow u_{zad_k} = u_{zad}$$

$$if(i_{pk_prze} < 0) \Rightarrow u_{zad_k} = u_{zad} + \frac{2 * u_{p1}}{T_p/2}$$

6. Sprawdzenie czy wystąpi ZCC. Na początku obliczana jest graniczna wartość prądu, która pozwala określić czy przewodzenie prądu będzie ciągłe (brak ZCC), czy nieciągłe (wystąpienie ZCC). Obliczana jest wartość minimalna prądu zapewniająca przewodzenie ciągłe i_{gr_zcc} :

$$i_{gr_zcc} = \frac{u_{sk_prze} - i_{pk_prze} * R - u_{p1}}{L} t_{dt}$$

gdzie: t_{dt} – czas martwy. Wartość i_{gr_zcc} porównywana jest z przewidywaną wartością chwilową

w momencie przełączenia i_{pk_prze} obliczoną w punkcie 4. Zjawisko ZCC wystąpi, gdy $i_{pk_prze} < -i_{gr_zcc}$ i algorytm przechodzi do iteracyjnej korekcji ZCC opisanej w punkcie 7. Jeżeli warunek nie jest spełniony to nie jest wykonywana korekcja ZCC, a napięcie zadane PE po korekcji czasu martwego u_{zad_k} wyznaczone zostaje zgodnie z równaniami z punktu 5 (Fig. 5).

7. Jeżeli warunek jest spełniony to algorytm przechodzi do iteracyjnej korekcji ZCC (Fig. 6). W trakcie korekcji obliczane są czasy trwania charakterystycznych odcinków czasu pozwalających na obliczenie średniej wartości napięcia przekształtnika. Fig. 6 przedstawia charakterystyczne przedziały czasu występujące w pół cyklu sterowania $T_p/2$ gdy dochodzi do przewodzenia nieciągłego (ZCC). Ponadto zgodnie z Fig. 6 w trakcie trwania czasu martwego możemy wyróżnić dwa charakterystyczne przedziały czasu:

t_{zcc} – czas trwania ZCC;

t_{dt_cond} – czas od momentu przełączenia do chwili, w której prąd osiąga wartość zerową;

W pierwszej iteracji obliczenia czasów wyglądają następująco:

$$t_0 = w_{yp} * T_p/2$$

$$t_1 = \frac{T_p}{2} - t_0 - t_{dt}$$

W dalszej kolejności obliczana jest przewidywana chwilowa wartość prądu w momencie przełączenia:

$$i_{pk_prze} = i_{pk} + \frac{u_{sk_sr} - i_{pk} * R - u_{p0}}{L} t_0$$

Następnie na podstawie przewidywanej wartości prądu w momencie przełączenia i_{pk_prze} określany jest znak napięcia przekształtnika u_{p_dt} kształtowanego w czasie martwym t_{dt} .

$$if(i_{pk_prze} > 0) \Rightarrow u_{p_dt} = -u_{dc}$$

$$if(i_{pk_prze} < 0) \Rightarrow u_{p_dt} = u_{dc}$$

Kolejnym krokiem jest obliczenie czasu trwania ZCC t_{zcc} oraz czasu t_{dt_cond}

$$t_{zcc} = t_{dt} + i_{pk_prze} * \frac{L}{u_{sk_prze} - u_{p_dt}}$$

$$t_{dt_cond} = t_{dt} - t_{zcc}$$

Na podstawie powyżej obliczonych wartości estymowana jest przewidywana średnia wartość napięcia przekształtnika.

$$u_{sp} = \frac{t_0 * u_{p0} + t_{dt \ cond} * u_{p \ dt} + t_{zcc} * u_{sk \ prze} + t_1 * u_{p1}}{T_p/2}$$

Następnie od wartości zadanej napięcia odejmowana jest obliczana wartość średnia napięcia przekształtnika. Obliczona różnica nazwana jest napięciem u_{kcm} . Jeżeli wartość u_{kcm} w aktualnej iteracji jest mniejsza od tej z poprzedniej iteracji to zapamiętywany jest numer iteracji. Równolegle wartość napięcia u_{kcm} dodawana jest do wielkości u_{kcm_sum} , której zadaniem jest sumowanie u_{kcm} z każdej iteracji. W ten sposób w każdej iteracji do wartości aktualnej u_{kcm_sum} dodawana jest aktualnie obliczona wartość u_{kcm} . Wartość u_{kcm_sum} w każdej iteracji zapamiętywana jest w strukturze DEM-MUL z blokami pamięci lub alternatywnie w tablicy.

W kolejnej nowej iteracji do wykonania wymienionych wyżej obliczeń wykorzystana jest również wartość u_{kcm_sum} z poprzedniej iteracji. W drugiej i każdej kolejnej iteracji czas to obliczany jest z uwzględnieniem napięcia u_{kcm_sum} .

$$t_0 = wyp * \frac{T_p}{2} + u_{kcm_sum} * \frac{1}{2 * u_{dc}}$$

Dalsza sekwencja wykonywania obliczeń jest taka sama.

Po wykonaniu wszystkich iteracji na podstawie zapamiętanego numeru iteracji i_{min} , dla którego wartość $u_{kcm}(i)$ była najmniejsza odczytywana jest w strukturze DEM-MUL z blokami pamięci lub alternatywnie w tablicy wartość $u_{kcm_sum}(i_{min})$. Wartość napięcia korekcji czasu martwego wyznaczana jest poprzez dodanie odczytanej wartości $u_{kcm_sum}(i_{min})$ i napięcia zadanego u_{zad} .

Warunki wykonania badań

Badania wykonano w środowisku PLECS wersja 4.6.6 firmy Plexim GmbH dla PE jednofazowego półmostkowego z regulatorem prądu: regulator rezonansowy pierwszej harmonicznej prądu. Badanie zostało wykonane przy napięciu zasilania: napięcie przemienne, sinusoidalne o wartości skutecznej 230 V oraz częstotliwości 50 Hz. Napięcie w obwodzie pośredniczącym wynosiło 650 V. Układ pracował z częstotliwością łączy 10 kHz ($T_p = 100 \mu s$).

W badania przyjęto następujące wartości parametrów układu wykorzystywane do obliczeń w UONŚP:

- $R = 10 m \Omega$;
- $L = 910 \mu H$;
- $dT = 1 \mu s$.

Wyniki badań – porównanie jakościowe wpływu korekcji czasów martwych

Na fig. 7a i 7b przedstawiono dwa okresy przebiegów napięcia sieci u_s , prądu sieci i_s , uśrednionego za okres prądu sieci i_{s_sr} , wartość napięcia korekcji czasu martwego $u_{kcm_sum}(i_{min})$ oraz wartość współczynnika wypełnienia wyp dla układu bez korekcji czasów martwych (fig. 7a) oraz pracującego z korekcją czasów martwych objętą zastrzeżeniem patentowym (fig. 7b).

W tabeli Tab. 1 przedstawiono wartości pierwszych 49 harmonicznych prądu sieci dla układu pracującego bez korekcji czasów martwych oraz z korekcją czasów martwych wg wynalazku. W celu podkreślenia różnic w zawartości harmonicznych dane z tabeli Tab. 1 zostały przedstawione graficznie na rysunkach fig. 7c oraz fig. 7d.

Na podstawie przebiegów prądu sieci przedstawionych na fig. 7a oraz fig. 7b można zauważyć, wyraźne odkształcenia prądu sieci w przypadku pracy układu bez korekcji czasów martwych. Poziom zawartości wyższych harmonicznych przedstawiony w Tab. 1 potwierdza, że stosowanie proponowanej metody korekcji czasów martwych znacząco wpływa na zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych w prądzie sieci.

Tab. 1 Wartości pierwszych 49 harmonicznych prądu sieci dla układu pracującego bez korekcji czasów martwych oraz z korekcją czasów martwych objętą zastrzeżeniem patentowym

Numer harmonicznej	Wartości harmonicznych prądu sieci		Numer harmonicznej	Wartości harmonicznych prądu sieci	
	Układ bez korekcji	Układ z korekcją		Układ bez korekcji	Układ z korekcją
1	0,9832	0,9838	25	0,0038	0,0001
2	0,0004	0,0003	26	0,0012	0,0010
3	0,4260	0,0190	27	0,0069	0,0002
4	0,0001	0,0002	28	0,0009	0,0009
5	0,1571	0,0042	29	0,0085	0,0002
6	0,0004	0,0002	30	0,0008	0,0008
7	0,0715	0,0069	31	0,0020	0,0002
8	0,0003	0,0002	32	0,0009	0,0008
9	0,1112	0,0019	33	0,0044	0,0002
10	0,0003	0,0001	34	0,0005	0,0008
11	0,0516	0,0017	35	0,0052	0,0002
12	0,0001	0,0004	36	0,0008	0,0008
13	0,0167	0,0018	37	0,0008	0,0001
14	0,0007	0,0006	38	0,0006	0,0005
15	0,0301	0,0011	39	0,0030	0,0001
16	0,0004	0,0005	40	0,0002	0,0002
17	0,0067	0,0012	41	0,0030	0,0001
18	0,0003	0,0003	42	0,0001	0,0002
19	0,0071	0,0006	43	0,0008	0,0001
20	0,0006	0,0004	44	0,0004	0,0005
21	0,0039	0,0008	45	0,0019	0,0000
22	0,0007	0,0007	46	0,0007	0,0007
23	0,0080	0,0005	47	0,0026	0,0001
24	0,0007	0,0009	48	0,0006	0,0006
25	0,0038	0,0001	49	0,0016	0,0000

Przykład obliczeń algorytmu korekcji czasów martwych w przypadku wystąpienia ZCC
W przeprowadzonej symulacji w chwili czasowej symulacji 1,53320 s algorytm wykrył możliwość wystąpienia ZCC.

Wartości wejściowe algorytmu przedstawiały się następująco:

$$u_{zad} = -278,139069 \text{ V}$$

$$wyp = 0,0720937848$$

$$u_{sk}(k) = -277,091064 \text{ V}$$

$$u_{sk}(k-1) = -271,62072709 \text{ V}$$

$$T_p = 100 \text{ } \mu\text{s}$$

$$R = 10 \text{ m}\Omega$$

$$L = 910 \text{ } \mu\text{H}$$

$$dT = 1 \text{ } \mu\text{s}$$

Wartości wyliczane w **UONŚP** przed sprawdzeniem możliwości wystąpienia ZCC były następujące:

$$\Delta u_{sk} = -5,47033691 \text{ V}$$

$$u_{sk_sr} = -278,360046 \text{ V}$$

$$u_{sk_prze} = -279,629059 \text{ V}$$

$$t_0 = 4,63953111e - 05$$

$$u_{p0} = 325 \text{ V}$$

$$u_{p1} = -325 \text{ V}$$

$$i_{pk_prze} = 0,306769907 \text{ A}$$

$$i_{gr_zcc} = 0,332215458 \text{ A}$$

Ze względu na to, że wartość prądu i_{pk_prze} jest niższa niż prądu granicznego i_{gr_zcc} algorytm wykrył ZCC i przystąpił do wyliczania iteracyjnego u_{kcm_sum} . Algorytm został ograniczony do wykonania 10 iteracji. Wyniki obliczeń w poszczególnych iteracjach zostały przedstawione w tabeli Tab. 2.

Tab. 2 Wyniki obliczeń algorytmu korekcji czasów martwych w poszczególnych iteracjach

iteracja	t_0 s	t_1 s	i_{pk_prze} A	t_{zcc} s	u_{sp} V	$u_{zad} - u_{sp}$ V	u_{kcm_sum} V
1	4,63953111e-05	2,60468778e-06	0,306769907	7,65887194e-08	-279,065216	0,926147461	0,926147461
2	4,63240685e-05	2,67593032e-06	0,304943860	8,20853643e-08	-278,205505	0,0664367676	0,992584229
3	4,63189608e-05	2,68103804e-06	0,304812968	8,24794029e-08	-278,143890	0,00482177734	0,997406006
4	4,63185861e-05	2,68141275e-06	0,304803431	8,25081088e-08	-278,139343	0,000274658203	0,997680664
5	4,63185643e-05	2,68143458e-06	0,304802835	8,25098141e-08	-278,139099	3,05175781e-05	0,997711182
6	4,63185643e-05	2,68143458e-06	0,304802835	8,25098141e-08	-278,139099	3,05175781e-05	0,997741699
7	4,63185643e-05	2,68143458e-06	0,304802835	8,25098141e-08	-278,139099	3,05175781e-05	0,997772217
8	4,63185606e-05	2,68143822e-06	0,304802716	8,25102120e-08	-278,139069	0,00000000	0,997772217
9	4,63185606e-05	2,68143822e-06	0,304802716	8,25102120e-08	-278,139069	0,00000000	0,997772217
10	4,63185606e-05	2,68143822e-06	0,304802716	8,25102120e-08	-278,139069	0,00000000	0,997772217

Po wykonaniu 10 iteracjach algorytm wybrał wartość przypisaną do iteracji $i_{min} = 8$, przez co określił wartość korekcji napięcia jako:

$$u_{kcm_sum}(i_{min}) = 0,997772217 \text{ V}$$

oraz ostatecznie wyznaczył napięcie zadane po korekcji jako wartość:

$$u_{zad_k} = -276,093291.$$

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób predykcyjnej kompensacji wpływu czasu martwego w przekształtnikach sieciowych zwłaszcza przekształtnika energoelektronicznego jednofazowego półmostkowego lub o topologii pełnego mostka typu H, przekształtnika energoelektronicznego trójfazowego, przekształtnika energoelektronicznego trójfazowego z czwartą gałęzią kondensatorową lub gałęzią aktywną podłączonego przez filtr do sieci napięcia przemiennego znamionny tym, że prowadzi się następujące etapy:

wyznaczenie przewidywanej średniej wartości napięcia u_{sk} pomiędzy momentem rozpoczęcia procesu modulacji a momentem przełączenia wartości napięcia sieci u_{sk_sr} , przy czym wyzna-

czenie to przeprowadza się na podstawie współczynnika wypełnienia wyp oraz skorygowanego napięcia sieci u_{sk} , oraz napięcia obwodu prądu stałego u_{dc} uprzednio wyznaczając przyrost Δu_{sk} wartości napięcia na podstawie zależności

$$\Delta u_{sk} = u_{sk}(k) - u_{sk}(k-1)$$

będącą różnicą pomiędzy wartością aktualną $u_{sk}(k)$, a wartością z poprzedniego kroku próbkowania $u_{sk}(k-1)$,

wyznaczenie przewidywanej chwilowej wartości napięcia sieci u_{sk_prze} w momencie wystąpienia przełączenia a następnie

wyznaczenie przewidywanych chwilowych wartości prądu PE i_{pk} w momencie przełączania na podstawie zależności

$$i_{pk_prze} = i_{pk} + \frac{u_{sk_sr} - i_{pk} \cdot R - u_{p0}}{L} t_0 \text{ po czym}$$

na podstawie przewidywanej chwilowej wartości prądu wykonywana jest korekcja czasu martwego, przy czym napięcie korekcji przyjmuje wartość $\pm u_{dc}$, którego polaryzacja zależna jest od znaku przewidywanej wartości chwilowej prądu PE i_{pk} określonego za pomocą poniższej funkcji signum

$$if(i_{pk_prze} > 0) \Rightarrow u_{zad_k} = u_{zad}$$

$$if(i_{pk_prze} < 0) \Rightarrow u_{zad_k} = u_{zad} + \frac{2 * u_{p1}}{T_p/2}$$

sprawdzenie czy wystąpi zatrząśnięcie się prądu w momencie przechodzenia przez wartość zerową ZCC poprzez wyznaczenie granicznej wartości prądu zapewniającej przewodzenie ciągle i_{gr_zcc} :

$$i_{gr_zcc} = \frac{u_{sk_prze} - i_{pk_prze} * R - u_{p1}}{L} t_{dt}$$

gdzie: t_{dt} – czas martwy, a następnie

porównywanie wartości prądu i_{gr_zcc} z przewidywaną wartością chwilową w momencie przełączenia i_{pk_prze} i wskazanie zatrząśnięcia ZCC gdy spełniony jest warunek $i_{pk_prze} < -i_{gr_zcc}$ po czym przy spełnieniu tego warunku dokonuje się iteracyjnej korekcji wartości napięcia wyznaczając wartość napięcia korekcji czasu martwego u_{kcm} .

2. Sposób wg zastrzeżenia 1 **znamienny tym**, że dla przekształtnika jednofazowego o topologii pełnego mostka typu H, w zależności od typu modulacji, lub przekształtnika trójfazowego a także przekształtnika trójfazowego z czwartą gałęzią kondensatorową lub gałęzią aktywną etapy sposobu wykonywane są najpierw względem przełączenia w tej gałęzi przekształtnika, w której przełączenie nastąpi najpierw a kończąc na gałęzi w której przełączenie nastąpi na końcu.
3. Sposób wg zastrzeżenia 1 albo 2 **znamienny tym**, że wartość współczynnika wypełnienia wyp wyznacza się z poniższej zależności

$$wyp = \frac{1}{2 * u_{dc}} u_{zad} + 0,5$$

a wartość średnią napięcia u_{sk_sr} wyznacza się z poniższej zależności

$$u_{sk_sr} = 0,25 * wyp * \Delta u_{sk} + u_{sk}(k)$$

gdzie wartość współczynnika wypełnienia wyp zależy od typu zastosowanej modulacji oraz topologii przekształtnika oraz gdzie $wyp \in < 0; 1 >$.

4. Sposób wg zastrzeżenia 1 albo 2 albo 3 **znamienny tym**, że wyznacza się przewidywaną chwilową wartość napięcia sieci u_{sk_prze} w momencie wystąpienia przełączenia na podstawie poniższej zależności

$$u_{sk_prze} = 0,5 * wyp * \Delta u_{sk} + u_{sk}(k)$$

5. Sposób wg dowolnego z zastrzeżeń od 1 do 4 **znamienny tym**, że w czasie iteracyjnej korekcji u tdt cond stanowi czas od momentu przełączenia do chwili, w której prąd osiąga wartość wartości napięcia wyznacza się czasy trwania dwóch charakterystycznych odcinków czasu pozwalających na wyznaczenie średniej wartości napięcia przekształtnika, pierwszy odcinek czasu t_{zcc} stanowi czas trwania ZCC a drugi odcinek czasu t_{dt_cond} stanowi czas od momentu przełączenia do chwili, w której prąd osiąga wartość zerową, w pierwszej iteracji wyznaczenia czasów t_0 i t_1 dokonuje się z zależności

$$t_0 = wyp * T_p / 2$$

$$t_1 = \frac{T_p}{2} - t_0 - t_{dt}$$

po czym wyznaczana jest przewidywana chwilowa wartość prądu w momencie przełączenia i_{pk_prze}

$$i_{pk_prze} = i_{pk} + \frac{u_{sk_sr} - i_{pk} * R - u_{p0}}{L} t_0$$

następnie na podstawie przewidywanej wartości prądu w momencie przełączenia i_{pk_prze} określany jest znak napięcia przekształtnika u_{p_dt} kształtowanego w czasie martwym t_{dt} .

$$if(i_{pk_prze} > 0) \Rightarrow u_{p_dt} = -u_{dc}$$

$$if(i_{pk_prze} < 0) \Rightarrow u_{p_dt} = u_{dc}$$

po czym wyznacza się czas trwania ZCC t_{zcc} oraz drugi odcinek czasu t_{dt_cond} z poniższych zależności

$$t_{zcc} = t_{dt} + i_{pk_prze} * \frac{L}{u_{sk_prze} - u_{p_dt}}$$

$$t_{dt_cond} = t_{dt} - t_{zcc}$$

następnie, wyznaczana jest średnia wartość napięcia przekształtnika u_{sp}

$$u_{sp} = \frac{t_0 * u_{p0} + t_{dt_cond} * u_{p_dt} + t_{zcc} * u_{sk_prze} + t_1 * u_{p1}}{T_p / 2}$$

następnie od wartości zadanej napięcia u_{zad} odejmowana jest obliczana wartość średnia napięcia przekształtnika u_{sp} wskazując wartość napięcia u_{kcm} , i jeżeli wartość u_{kcm} w aktualnej iteracji jest mniejsza od tej z poprzedniej iteracji to zapamiętywany jest numer iteracji a równolegle wartość napięcia u_{kcm} dodawana jest do wielkości u_{kcm_sum} , której zadaniem jest sumowanie u_{kcm} z każdej iteracji, jednocześnie wartość wielkości napięcia u_{kcm_sum} w każdej iteracji zapamiętywana jest w strukturze DEM-MUL z blokami pamięci lub alternatywnie w tablicy, wyznacza się wartość napięcia zadanego po korekcji u_{zad_k} poprzez dodanie do napięcia zadanego u_{zad} odczytanej wartości $u_{kcm_sum}(i_{min})$.

- dokonywane kompensacji czasu martwego poprzez przekazanie do układu sterowania przekształtnikiem wartości napięcia zadanego po korekcji u_{zad_k} .
6. Układ predykcyjnej kompensacji wpływu czasu martwego w przekształtnikach sieciowych zawierający z jednej strony filtra sprzęgającego (F) dołączoną sieć napięcia przemiennego (SNP) z włączonym w obwód czujnikiem napięcia przemiennego (CNAC), a z drugiej strony filtra sprzęgającego (F) przekształtnik energoelektroniczny (PE) z włączonym w obwód czujnikiem prądu (CP), gdzie do przekształtnika energoelektronicznego (PE) dołączony jest czujnik napięcia stałego (CNDC) i źródło napięcia stałego (ZNS) **znamienny tym**, że do filtra sprzęgającego (F) dołączony jest układ korekcji czasu martwego (UKCM) poprzez układ sterowania przekształtnikiem (USP), jednocześnie do układu korekcji czasu martwego (UKCM) dołączony jest układ korekcji pomiarów (UKP) i regulator prądu (RP), a ponadto układ korekcji czasu martwego (UKCM) dołączony jest do czujnika napięcia stałego (CNDC), oraz układ korekcji czasu martwego (UKCM) połączony jest jednokierunkowo z układem korekcji pomiarów (UKP), który dołączony jest do wyjścia czujnika napięcia przemiennego (CNAC) oraz czujnika prądu (CP) i jednocześnie do wyjścia regulatora prądu (RP), przy czym do regulatora prądu (RP) dołączony jest dołączony jest sumator (+ -), który to sumator (+ -) włączony jest pomiędzy czujnik prądu (CP) oraz układ korekcji pomiarów (UKP).
7. Układ według zastrz. 6 **znamienny tym**, że głównym blokiem układu korekcji czasu martwego (UKCM) jest układ obliczania napięcia średniego przekształtnika (UONŚP).

Rysunki

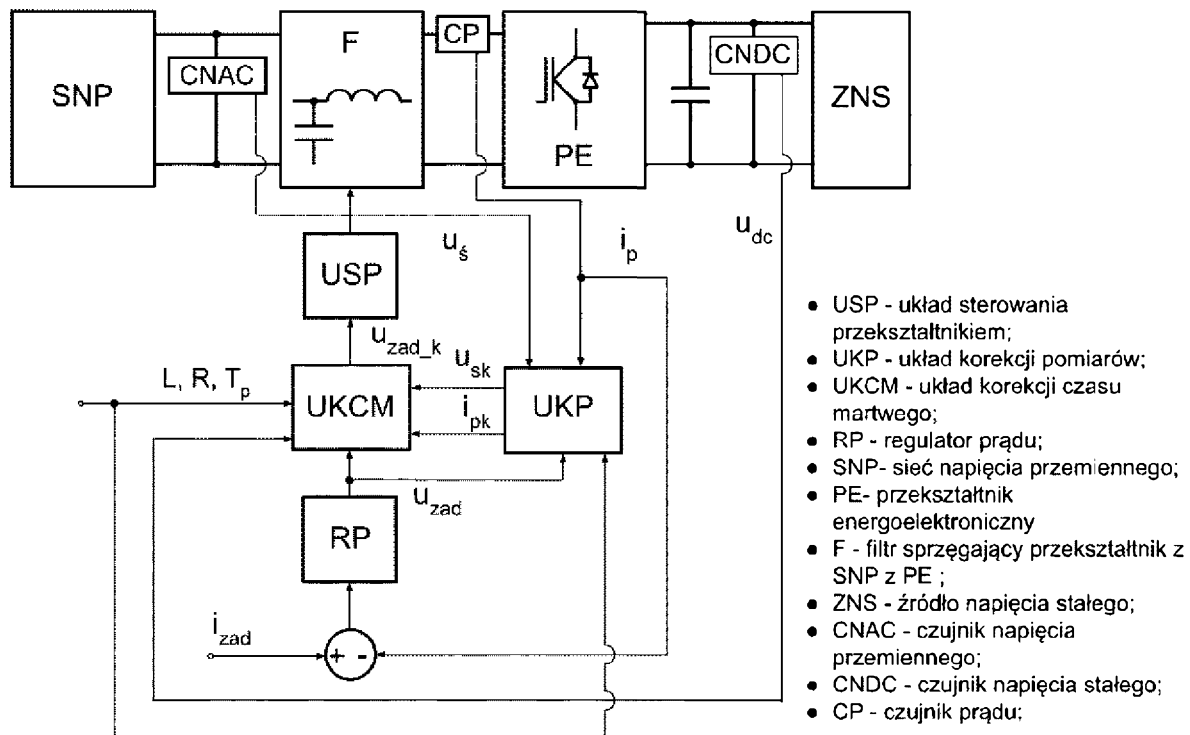


Fig. 1

UKCM - Układ korekcji czasu martwego

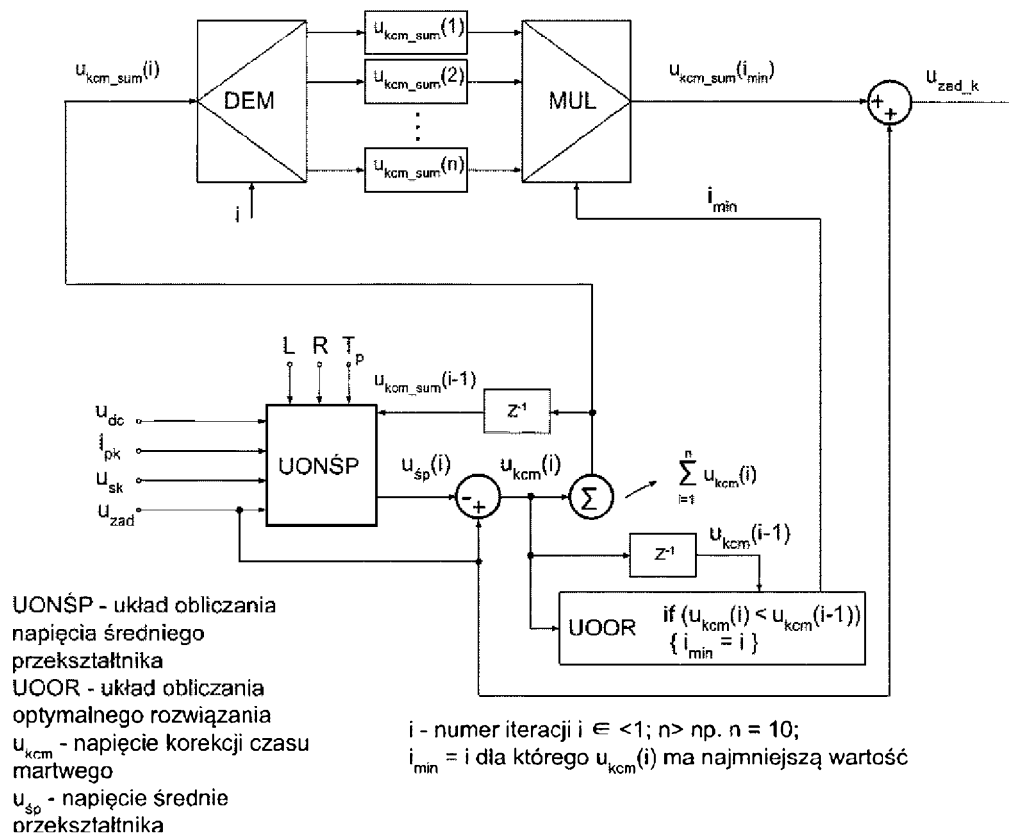


Fig. 2

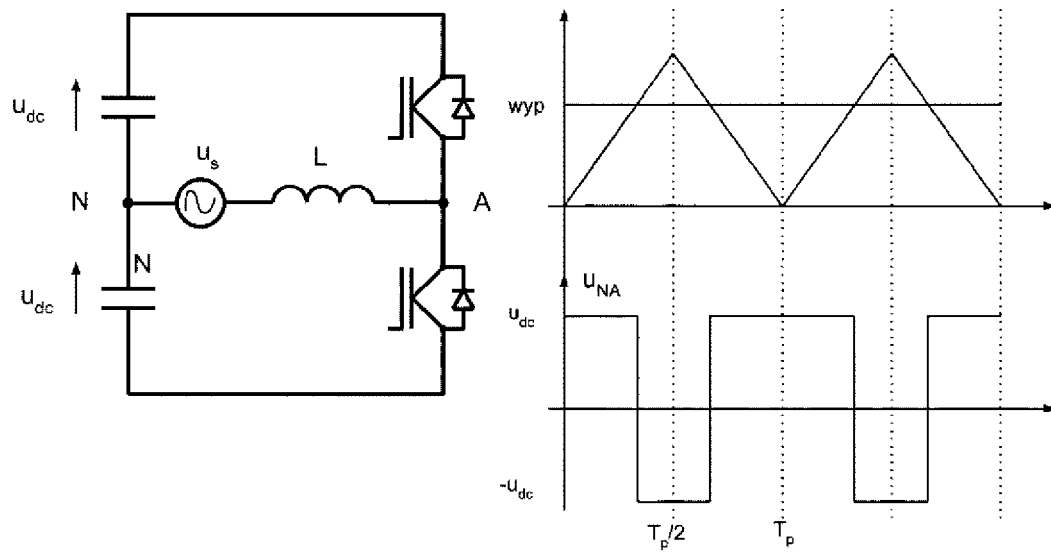


Fig. 3

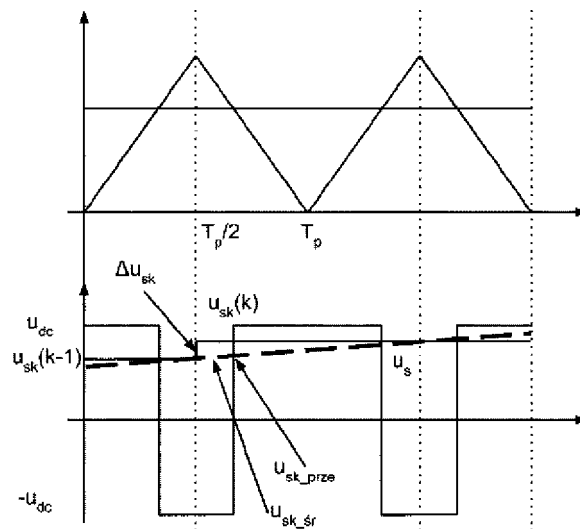


Fig. 4

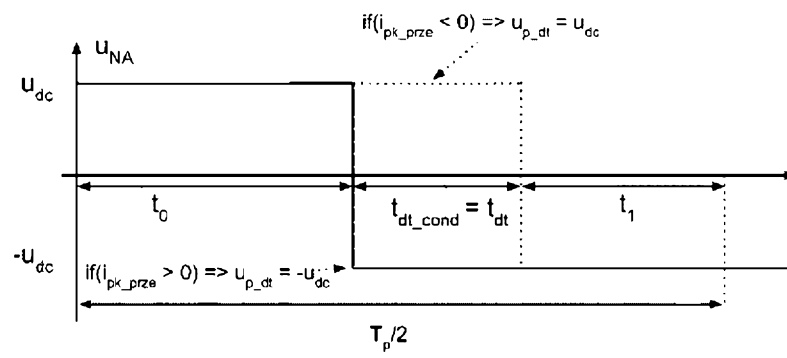


Fig. 5

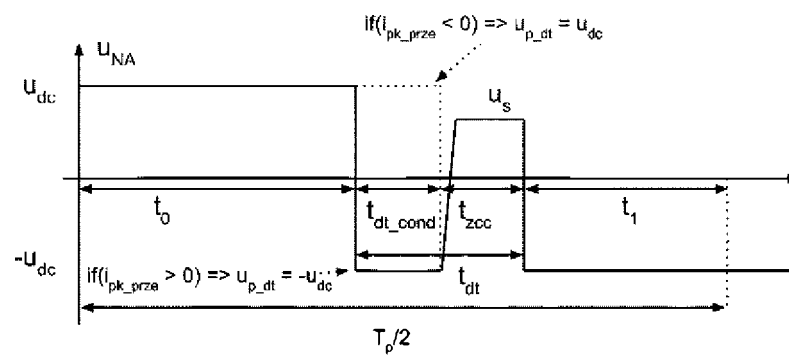


Fig. 6

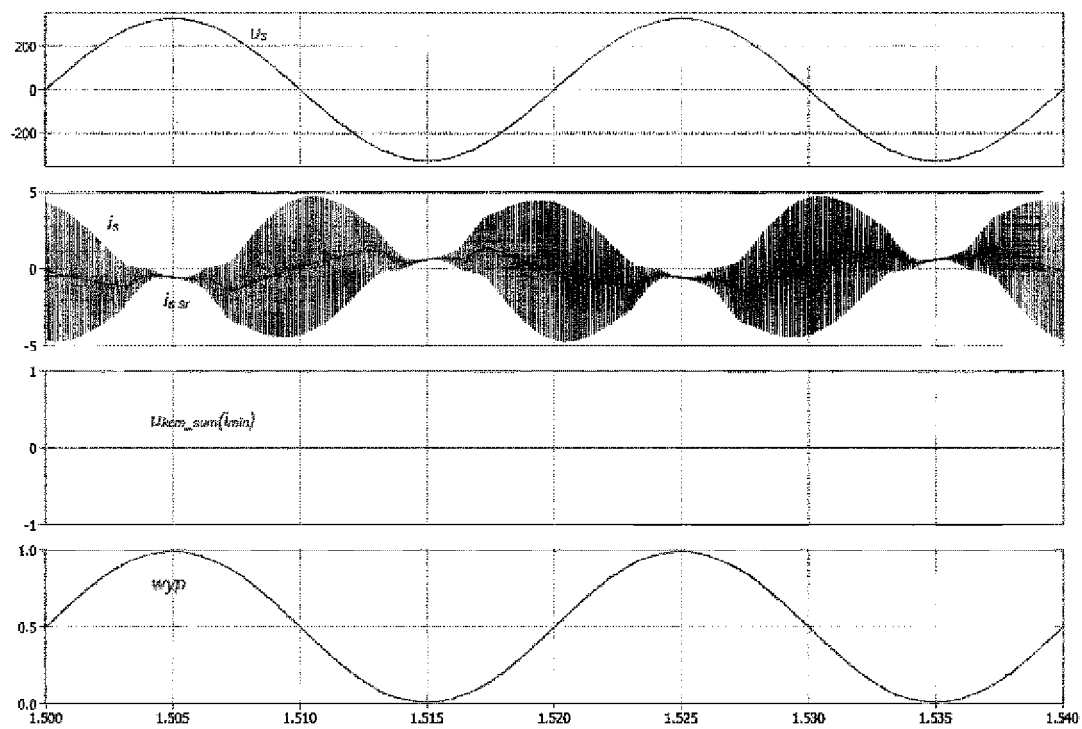
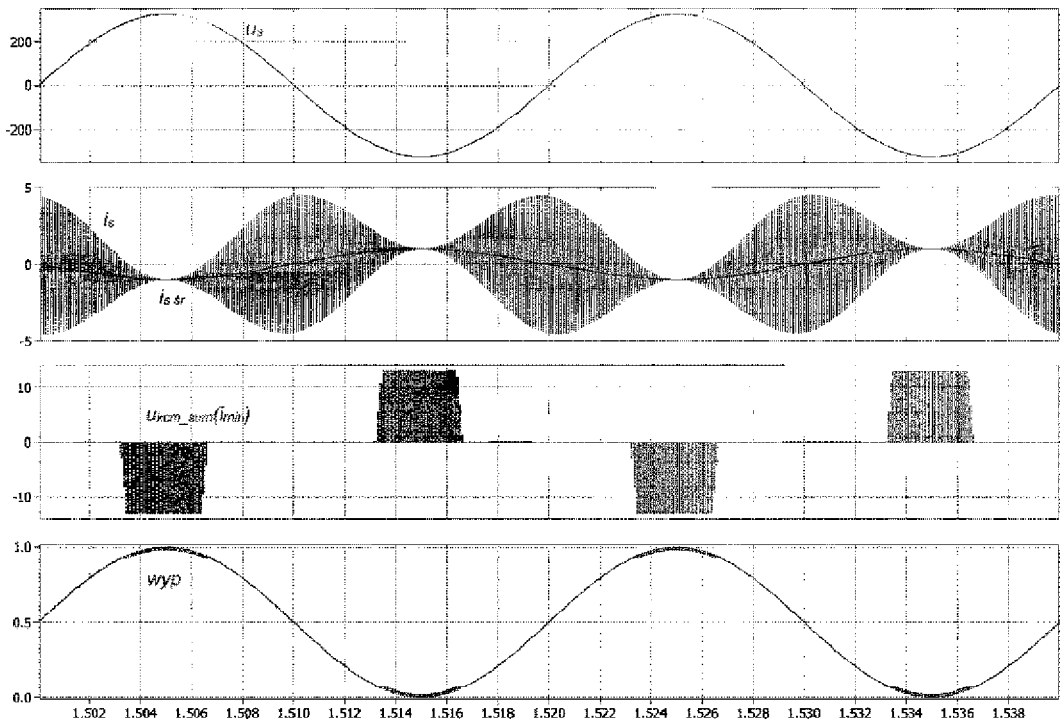
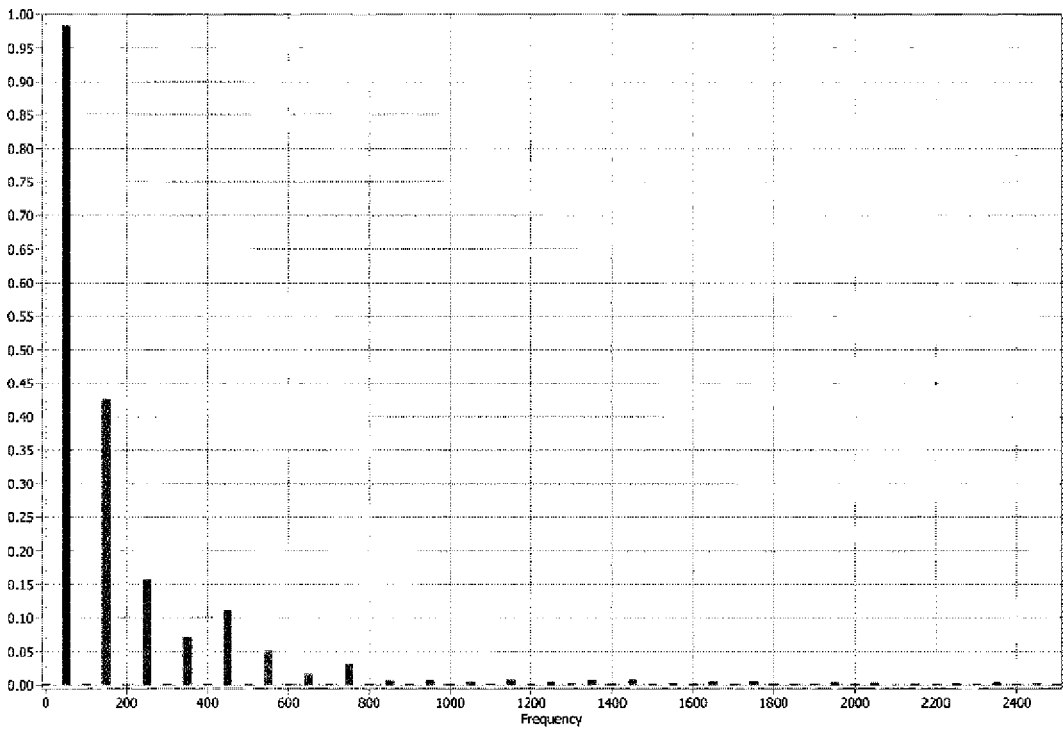


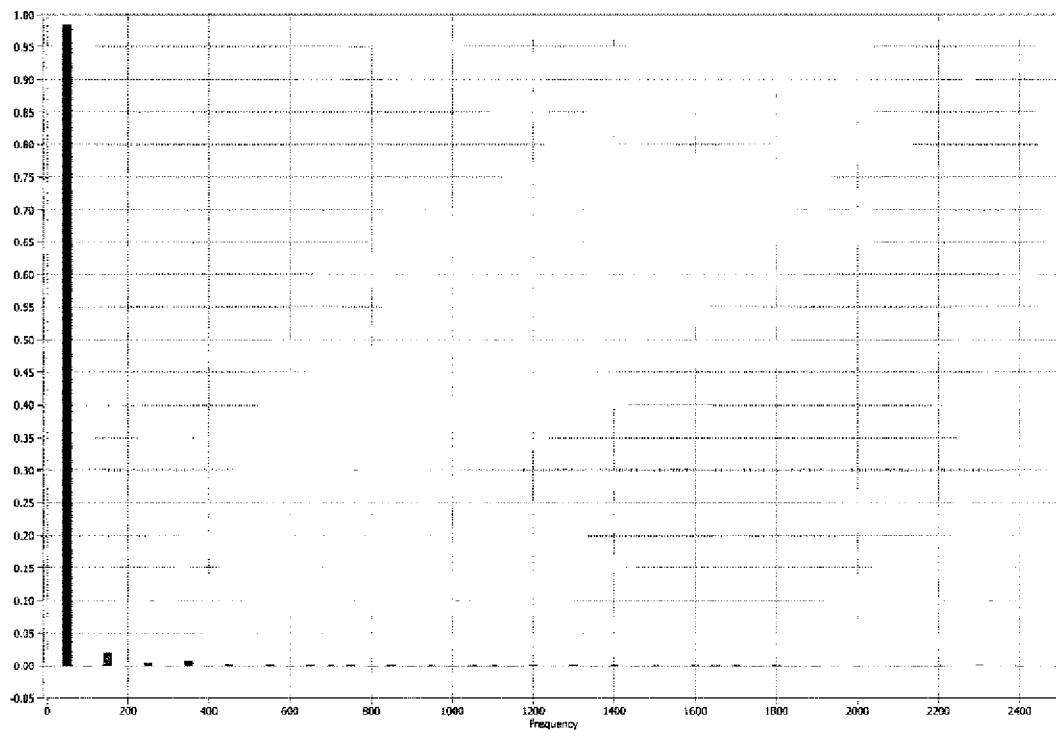
Fig. 7a



Rys. 7b



Rys. 7c



Rys. 7d