

Ryszard PORADA*, Adam GULCZYŃSKI*

BADANIA SPRZĘGU ENERGOELEKTRONICZNEGO Z SIECIĄ ELEKTROENERGETYCZNĄ

Przedstawiono ogólną charakterystykę energoelektronicznych sprzęgów alternatywnych źródeł energii z siecią elektroenergetyczną. Omówiono energoelektroniczne źródło prądu pracujące jako układ zamknięty, generujące prąd o kształcie sinusoidalnym przekazujący energię do sieci. Pokazano wybrane wyniki badań modeli symulacyjnych takiego układu dla sinusoidalnego kształtu sygnałów zadanych. Zamieszczono także wyniki badań testowego układu laboratoryjnego.

SŁOWA KLUCZOWE: energoelektronika, falowniki, sterowanie dyskretne

1. WPROWADZENIE

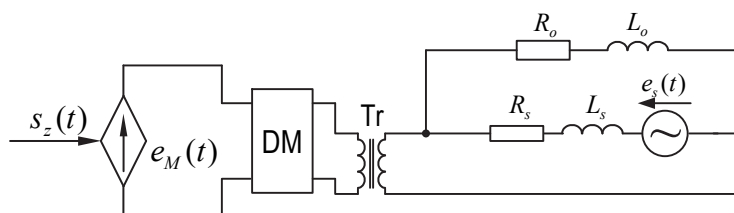
Energia pozyskiwana z alternatywnych źródeł energii może być wykorzystana do zasilania lokalnych, indywidualnych odbiorników napięcia przemiennego lub przekazywanie bezpośrednio do sieci elektroenergetycznej. Niezbędne są do tego energoelektroniczne falowniki napięcia z wyjściem napięciowym lub pracujące jako sterowane źródła prądu. Celem pracy takiego źródła prądu jest uzyskanie kształtu prądu zbliżonego do sinusoidy, przy minimalnej zawartości składowych wysokoczęstotliwościowych będących efektem stosowanej w sterowaniu falownika modulacji dyskretnej MSI. Sterowanie takimi układami pracującymi jako układy zamknięte jest zagadnieniem trudnym ze względu na występujące efekty nieliniowe. Coraz częściej korzysta się z metod sterowania, bazujących na bardziej rozbudowanych korektorach, których struktura i parametry są określane (także w wersji cyfrowej) w oparciu o syntezę zapewniającą uzyskanie optymalnych odpowiedzi obiektu [1, 2, 3].

W pracy przedstawiono badania układu energoelektronicznego sprzęgu alternatywnego źródła energii o niewielkim napięciu (np. niskonapięciowych paneli fotowoltaicznych) z siecią elektroenergetyczną, co wymaga zastosowania transformatora dopasowującego. Pokazano strukturę układu oraz sposób synchronizacji generowanego prądu z napięciem sieci. Zamieszczono wybrane wyniki badań symulacyjnych z korektorem analogowym i dyskretnym źródła prądu, a także wyniki badań testowego układu laboratoryjnego.

* Politechnika Poznańska

2. STRUKTURA UKŁADU

Schemat blokowy badanego układu w wersji 1-fazowej niezależnego energoelektronicznego źródła prądu współpracującego z siecią elektroenergetyczną pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura blokowa źródła prądu do współpracy z siecią elektroenergetyczną

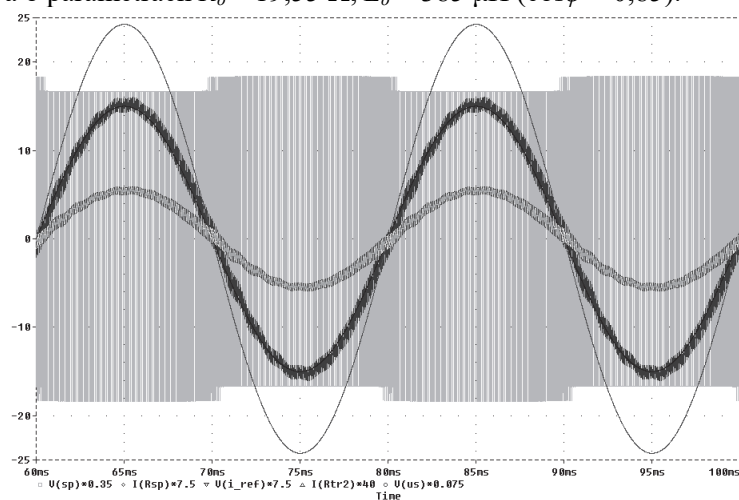
Układ składa się z sterowanego, zmodulowanego źródła napięcia $e_M(t)$, które odpowiada falownikowi napięcia z wyjściem prądowym, zasilanego ze źródła napięcia stałego. Sygnał sterujący $s_z(t)$ jest generowany przez korektor toru głównego w układzie zamkniętym ze sprzężeniem prądowym, określony zgodnie z zasadami przedstawionymi w pracach [8, 9]. Na wyjściu zmodulowanego źródła napięcia znajduje się pasywny demodulator, którego struktura oraz parametry są dobierane zależnie od założonych cech sygnału wyjściowego (napięciowego lub prądowego), zawsze jednak mający cechy filtra dolnoprzepustowego [7]. W analizowanym przypadku przyjęto dwie struktury – szeregową indukcyjność lub filtr LCL w układzie T. Ze względu na dopasowanie napięciowe wyjścia falownika oraz sieci elektroenergetycznej n/n w układzie zastosowano transformator o odpowiednio dobranej przekładni napięciowej. Wyjście transformatora jest dołączone do sieci elektroenergetycznej reprezentowanej na schemacie gałęzią szeregową $e_s(t)R_sL_s$. Innych odbiorców reprezentuje gałąź szeregową R_oL_o .

3. BADANIA SYMULACYJNE

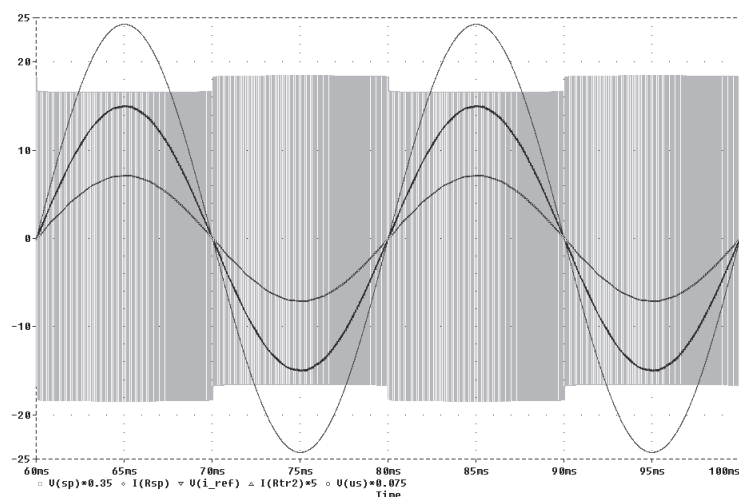
Badania symulacyjne przeprowadzono w celu wstępnego doboru parametrów korektora w odniesieniu do modelu laboratoryjnego układu. Skuteczność działania energoelektronicznego źródła prądu we współpracy z siecią elektroenergetyczną przetestowano na przykładzie falownika 1-fazowego, pracującego z dwoma typami modulacji – unipolarną i bipolarną.

Badania wykonano dla następujących parametrów układu: napięcie zasilania falownika 50 V, częstotliwość nośna modulacji MSI (unipolarnej i bipolarnej) $f_{MSI} = 12,5$ kHz. Przyjęte parametry dławika sprzęgającego wynoszą $R_{sp} = 0,09 \Omega$, $L_{sp} = 1,1$ mH, natomiast filtra LC: $R_L = 0,05 \Omega$, $L_L = 440 \mu\text{H}$,

$C = 44 \mu\text{F}$ dla modulacji bipolarnej oraz $R_L = 0,025 \Omega$, $L_L = 220 \mu\text{H}$, $C = 22 \mu\text{F}$. Sieć elektroenergetyczna jest reprezentowana gałęzią szeregową o parametrach $R_s = 0,005 \Omega$, $L_s = 55 \mu\text{H}$, uzyskanych po sprowadzeniu na stronę n/n parametrów transformatora o mocy 1 MVA i napięciu 15/0,4 kV, dołączonego do linii 15 kV o mocy zwarciowej $S_{zw} = 24 \text{ MVA}$. Innych odbiorców reprezentuje gałąź szeregową o parametrach $R_o = 19,55 \Omega$, $L_o = 385 \mu\text{H}$ ($\cos\varphi = 0,85$).



Rys. 2. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (2 A) bez filtru LC

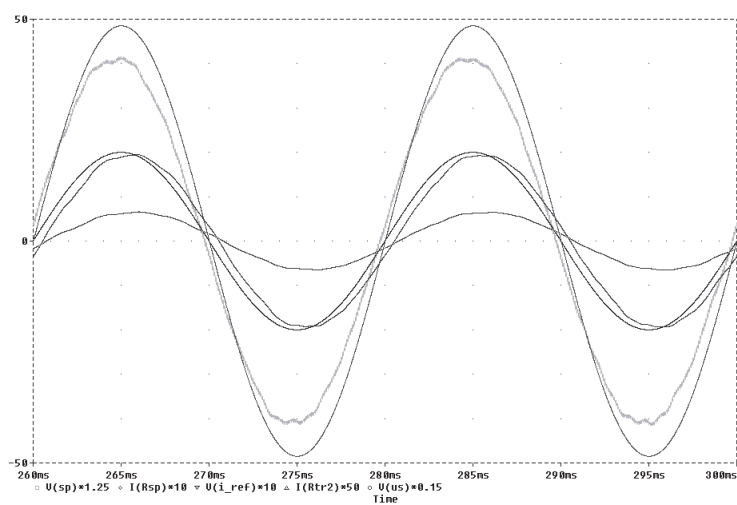


Rys. 3. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (15 A) z filtrem LC

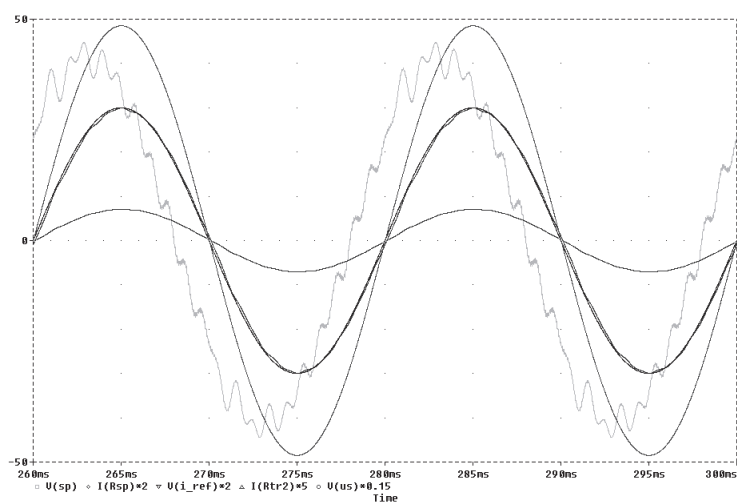
Na poszczególnych rysunkach w jednolity sposób pokazano: napięcie strony pierwotnej transformatora – V(sp), napięcie strony wtórnej transformatora (po

stronie sieci) – $V(us)$, prąd wzorcowy – $V(i_ref)$, prąd strony pierwotnej transformatora – $I(Rsp)$, strony wtórnej transformatora (sieci) – $I(Rtr2)$.

Przeprowadzono szerokie badania symulacyjne w programie OrCAD. Wyniki badań dla wersji analogowej korektora oraz modulacji bipolarnej, dla dwóch struktur źródła prądu (bez filtra LC oraz z filtrem LC) oraz dwóch wartości prądu strony pierwotnej transformatora (2 i 15 A) pokazano na rysunkach 2÷5, natomiast dla modulacji unipolarnej – na rysunkach 6÷9.

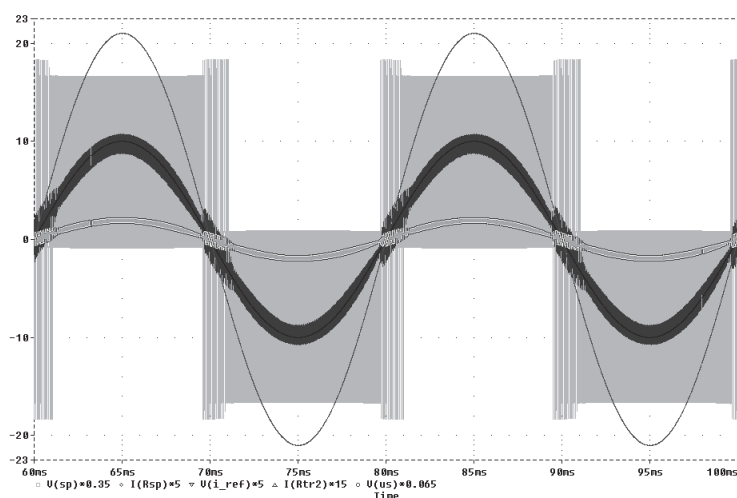


Rys. 4. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (2 A) z filtrem LC

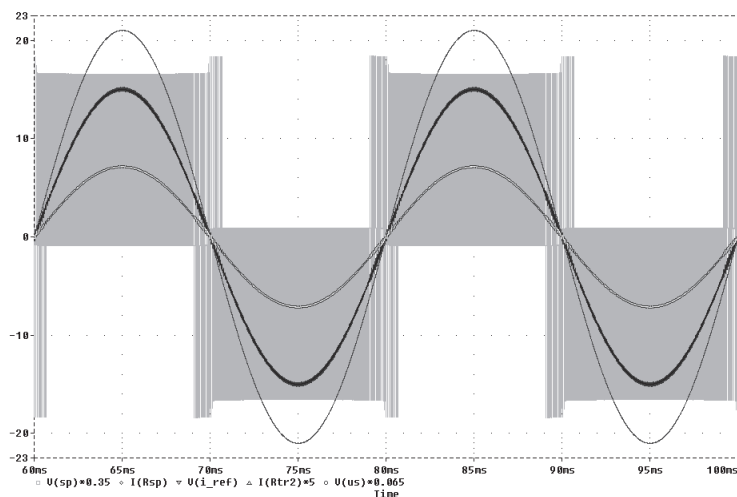


Rys. 5. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (15 A) z filtrem LC

Błąd odwzorowania prądu o kształcie sinusoidalnym w paśmie 2kHz dla obu przypadków nie przekracza wartości 2,5%, a błąd statyczny ok. 0,2%. Widoczny jest pozytywny wpływ filtra LC na kształt napięcia po stronie pierwotnej transformatora (brak składowych wysokoczęstotliwościowych). Pojawienie się niskoczęstotliwościowych składowych w prądzie jest wynikiem doboru korektora układu zamkniętego jako układu wąskopasmowego.



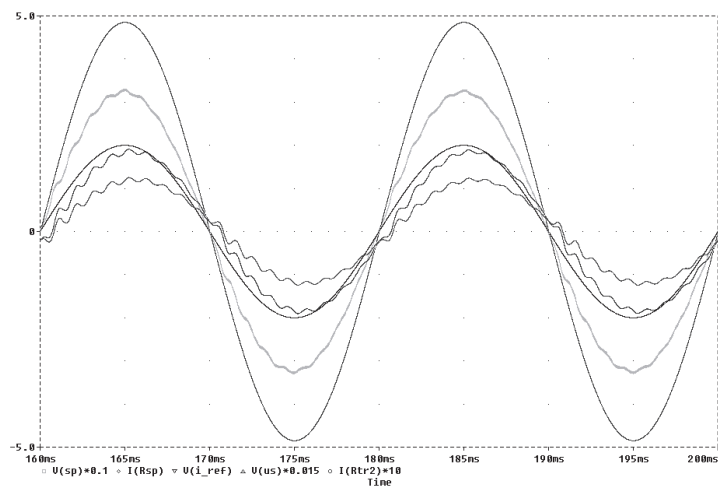
Rys. 6. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu z filtrem LC



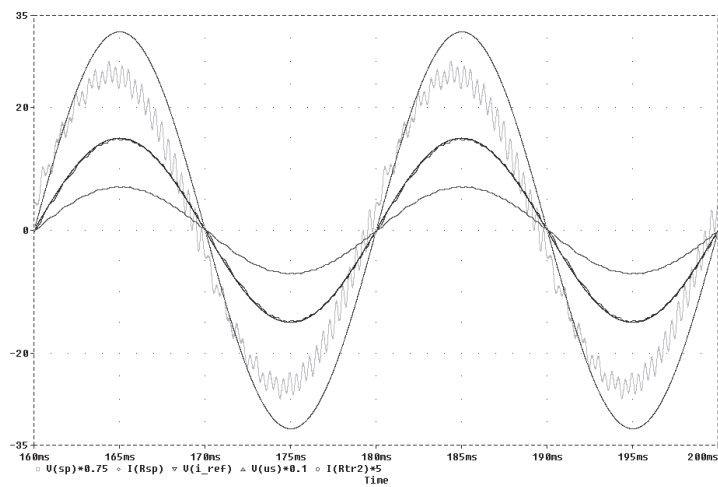
Rys. 7. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu z filtrem LC

Podobne wnioski wynikają z badań przedstawionych dla falownika pracują-

cego z modulacją unipolarną (rys. 6÷9).



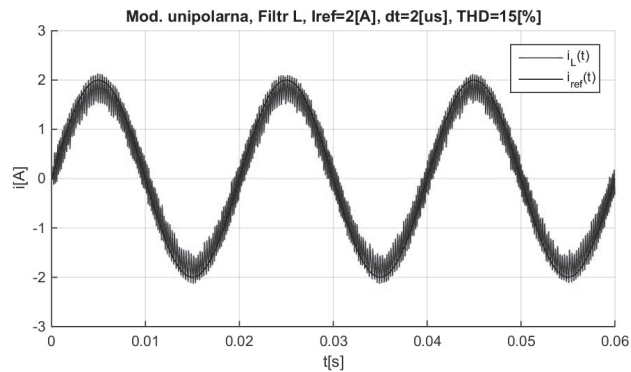
Rys. 8. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (2A) z filtrem LC



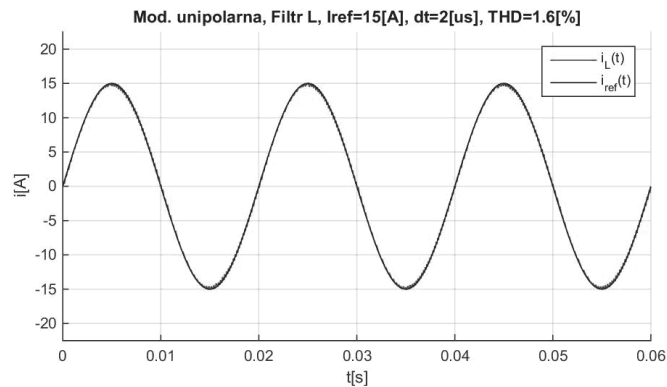
Rys. 9. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (15A) z filtrem LC

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych wersji analogowej, wykonano także badania symulacyjne układu dla modelu dyskretnego, w programie Matlab®/Simulink®. Skuteczność działania tego korektora w postaci dyskretnej przetestowano na takim samym układzie, pracującym z modulacją unipolarną (ze względu na nieco korzystniejsze właściwości częstotliwościowe generowanych prądów). Badania przeprowadzono dla kształtu sinusoidalnego dwóch wartości prądu: 2 A oraz 15 A. Uwzględniono także konieczny do prawi-

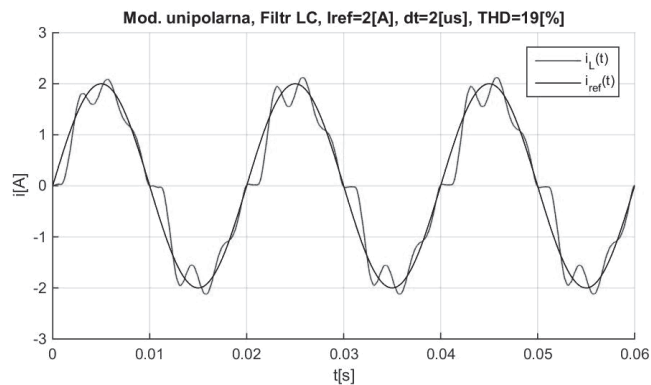
dłowego sterowania falownika czas martwy dla modulacji MSI o wartości $t_m = 2$ [μs]. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 10÷13.



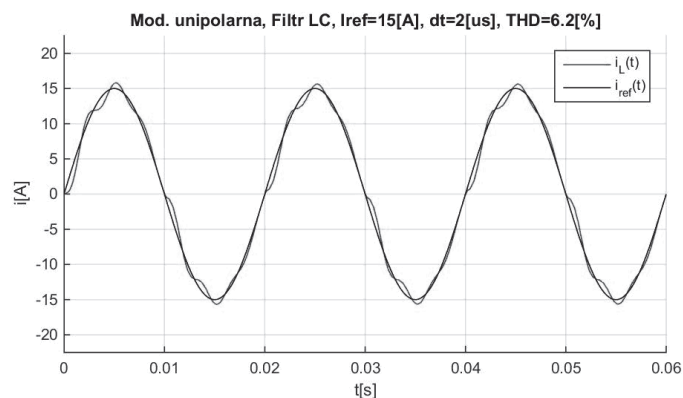
Rys. 10. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (2 A) bez filtru LC



Rys. 11. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (15 A) bez filtru LC



Rys. 12. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (2 A) z filtrem LC



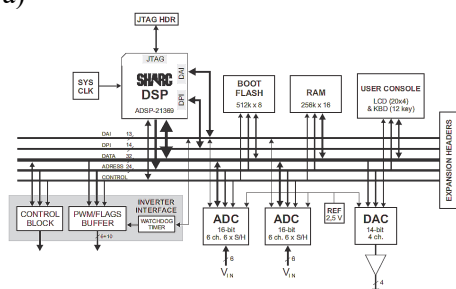
Rys. 13. Wybrane przebiegi prądów i napięć układu dla źródła prądu (15 A) z filtrem LC

Przebiegi prądu pokazane na rysunkach dotyczą strony pierwotnej transformatora i odznaczają się znacznie większymi odkształceniami harmonicznymi. Wynika to modelu dyskretnego korektora układu zamkniętego, a także z wprowadzonego czasu opóźnienia (czasu martwego), koniecznego ze względu na prawidłową pracę falownika, lecz będącego źródłem dodatkowych harmonicznymi.

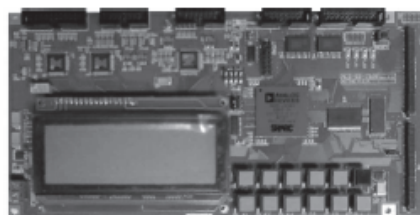
4. BADANIA UKŁADU LABORATORYJNEGO

Badania eksperymentalne układu fizycznego źródła prądu w wersji 1-fazowej przeprowadzono na bazie przekształtnika P3-5.0/550MFE LABINVERTER z modułem tranzystorowym IPM PM50RSA120.

a)



b)

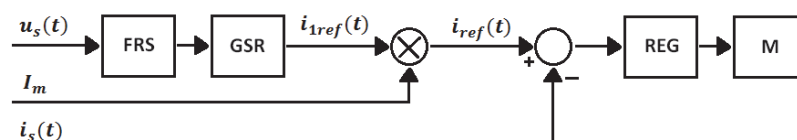


Rys. 14. System uruchomieniowy ALS-G3-21369: a) schemat blokowy; b) widok ogólny

Do sterowania wykorzystano zestaw uruchomieniowy trzeciej generacji ALS-G3-1369 ze zmiennoprzecinkowym procesorem sygnałowym Analog Devices ADSP-21369 SHARCTM. Jako źródło napięcia zasilające falownik

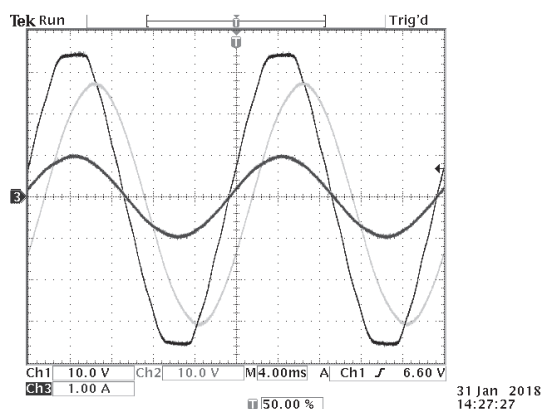
(zamiast panelu fotowoltaicznego) zastosowano zasilacz laboratoryjny napięcia stałego o napięciu 50 V i wydajności prądowej 15 A.

W układzie mikroprocesorowym zaimplementowano algorytm sterowania. Schemat blokowy układu regulacji przedstawia rysunek 15.



Rys. 15. Schemat blokowy układu regulacji prądu sieci

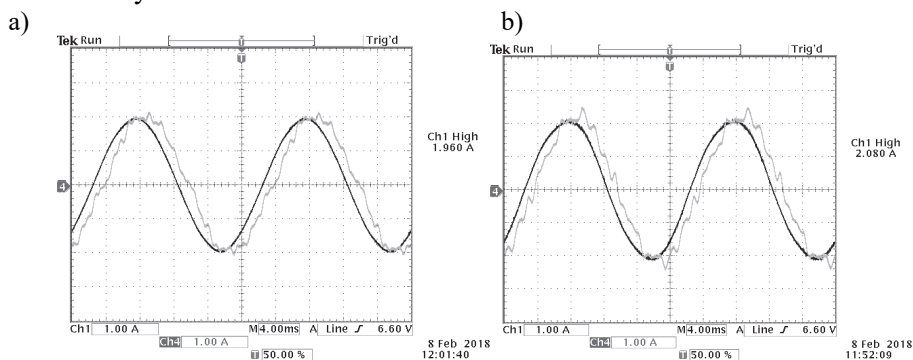
Bardzo istotna jest synchronizacja prądu po stronie wtórnej transformatora (sieci) z napięciem sieciowym. Synchronizację zrealizowano z wykorzystaniem ruchomej średniej jako filtra dolnoprzepustowego. Napięcie sieci $u_s(t)$ zostało spróbkowane, następnie poddane filtracji przez filtr ruchomej średniej oraz zapisane do rejestru kołowego (blok FRS), w wyniku czego otrzymano próbki przebiegu sinusoidalnego przesuniętego w fazie w stosunku do napięcia sieci. Następnie otrzymane próbki są podane na wejście bloku GSR, zawierającego detektor wartości szczytowej. W dalszej kolejności następuje skalowanie tego przebiegu oraz korekta fazy (wynikająca z charakterystyki fazowej filtra ruchomej średniej), w wyniku czego otrzymuje się jednostkowy przebieg zadanego prądu $i_{1ref}(t)$ – rysunek 16.



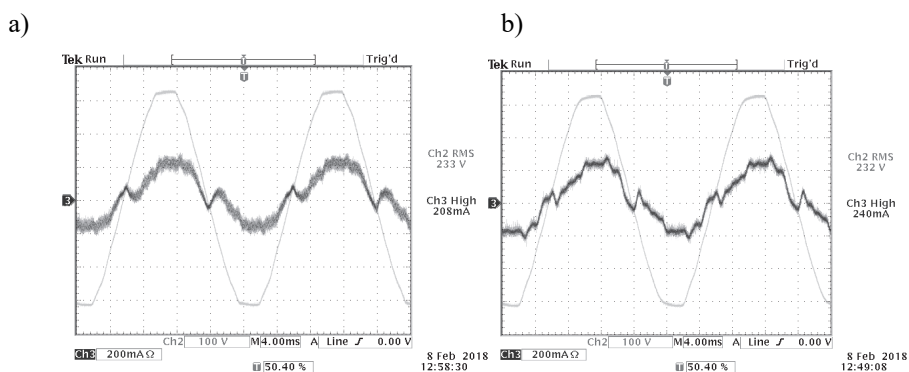
Rys. 16. Przebieg napięcia sieci, przefiltrowanego napięcia sieci i jednostkowego przebiegu zadanego

Amplituda prądu sieci wynika z zadanej mocy, jaką należy oddać do sieci. Następnie przebieg zadanego prądu porównywany jest z aktualnym prądem sieci, a dalej, jako błąd regulacji podawany jest przez regulator (korektor) na modulator generujący sygnały załączające tranzystory falownika.

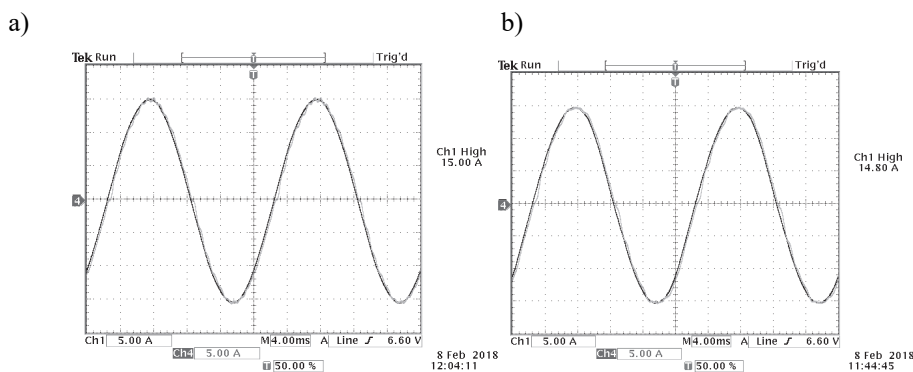
Przeprowadzono szerokie badania układu laboratoryjnego o strukturze pokazanej na rysunku 1. Wybrane wyniki badań układu laboratoryjnego przedstawiono na rysunkach 17÷20.



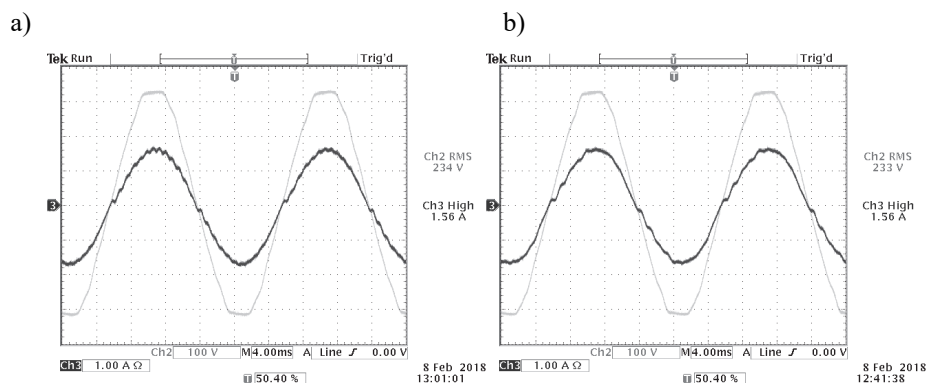
Rys. 17. Przebiegi prądu strony pierwotnej transformatora ($I=2\text{ A}$), dla układu: a) bez filtru LC; b) z filtrem LC



Rys. 18. Przebiegi napięcia sieci i prądu oddawanego do sieci ($I=2\text{ A}$, strona wtórna transformatora) dla układu: a) bez filtru LC; b) z filtrem LC



Rys. 19. Przebiegi prądu strony pierwotnej transformatora ($I=15\text{ A}$), dla układu: a) bez filtru LC; b) z filtrem LC



Rys. 20. Przebiegi napięcia sieci i prądu oddawanego do sieci ($I=15\text{ A}$, strona wtórna transformatora) dla układu: a) bez filtru LC; b) z filtrem LC

Badania przeprowadzono dla dwóch wersji demodulatora pasywnego – szeregowej indukcyjności L i LCL w układzie T oraz modulacji unipolarnej. W układzie praktycznym wartość odkształceń prądu oddawanego do sieci w obu przypadkach ma zbliżoną wartość (ok. 5%) dla wartości znamionowej prądu (15 A), natomiast dla wartości 2 A – ok. 7%. Takie wartości odkształceń harmonicznych wymagają zmiany parametrów korektora cyfrowego układu sterowania dla zmniejszenia poziomu odkształceń prądu. Pozytywnym aspektem uzyskanych wyników jest niewielka zawartość składowych wysokoczęstotliwościowych w przebiegach prądu.

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono badania układu energoelektronicznego sprzęgu alternatywnego źródła energii o niewielkim napięciu stałym z siecią elektroenergetyczną, wymagający zastosowania transformatora dopasowującego. Pokazano strukturę układu oraz sposób synchronizacji generowanego prądu z napięciem sieci. Zamieszczono wybrane wyniki badań symulacyjnych układu z korektorem analogowym i dyskretnym źródła prądu, a także wyniki badań testowego układu laboratoryjnego. Wyniki badań układu laboratoryjnego wskazują na konieczność wprowadzenia pewnych zmian w układzie korektora sterującego układem fizycznym. Zastosowanie filtra LCL na wyjściu falownika w niewielkim stopniu wpływa na poziom zniekształceń harmonicznych prądu, jednak znacząco zmienia kształt napięcia uzwojenia pierwotnego transformatora, co może wpłynąć na sprawność energetyczną całego toru przetwarzania energii. Potwierdzenie tych wniosków wymaga dalszych badań, szczególnie układu fizycznego.

LITERATURA

- [1] Brzózka J., Regulatory i układy automatyki. MIKOM, Warszawa 2004.
- [2] Byrski W., Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2007.
- [3] Grega W., Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2004.
- [4] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., Power Electronics: Converters, Application and Design. John Wiley&Sons, New York 2001.
- [5] Porada R.: Aproksymacja filtra dolnoprzepustowego w aspekcie sterowania układów energoelektronicznych. PUT Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2013, No. 76, ss. 71-78.
- [6] Porada R.: Model częstotliwościowy układów energoelektronicznych z modulacją. PUT Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2014, No. 78, ss. 209-216.
- [7] Porada R.: Filtry pasywne w falownikach napięcia. Mat. XVI Konf. „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice”, ZKwE'15, PUT, Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2015, No. 84, ss. 29-35.
- [8] Porada R.: Zastosowanie metod częstotliwościowych w syntezie korektorów dla zamkniętych układów energoelektronicznych. Mat. XVI Konf. „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice”, Academic Journal, Electrical Engineering, Poznań 2016, 87, pp. 313-322.
- [9] Porada R., Gulczyński A.: Zmodyfikowane sterowanie dyskretne energoelektronicznym źródłem prądu. Poznan University of Technology, Academic Journals. Electrical Engineering, 2016, 87, pp. 225-233.

INVESTIGATIONS OF THE POWER ELECTRONICS COUPLER WITH THE POWER NETWORK

The work presents general characteristics of power electronics couplers of alternative energy sources with the power network. It shows the power electronics closed system of current source, generating sinusoidal shape current and transferring energy to the network. Presets some selected results of work for a simulation model of such system with sinusoidal shape of reference signals as well as results of the laboratory test.

(Received: 16.02.2018, revised: 10.03.2018)