

WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWY PRZEKSZTAŁTNIK AC/AC Z JEDNOSTKOWYM WEJŚCIOWYM WSPÓŁCZYNNIEM MOCY¹⁾

AC/AC High Frequency Changer with Unity Input Power Factor

Antoni BOGDAN

Politechnika Białostocka

Streszczenie: W artykule przedstawiono właściwości przekształtnika z wysokoczęstotliwościowym równoległym obwodem rezonansowym, sterowanego metodą gęstości impulsów, przełączanego przy zerowym napięciu, który zasilany jest ze źródła napięcia stałego lub przemiennego. Zobrazowano sposób stabilizacji drgań obwodu rezonansowego przy zasilaniu ze źródeł napięcia stałego i przemiennego. Prezentowane wyniki uzyskane zostały drogą symulacji cyfrowych, które wykazywały, że istnieje możliwość budowy systemu zasilania z wysokoczęstotliwościowym obwodem rezonansowym zasilanym ze źródeł napięcia stałego i przemiennego. Przekształtnik wejściowy nie pobiera z sieci mocy biernej ponieważ jego prąd wejściowy praktycznie jest sinusoidalny i ma taką samą fazę jak napięcie. Podstawowy problem, jaki stanowi stabilizacja drgań obwodu rezonansowego przy zasilaniu ze źródła napięcia przemiennego, został rozwiązany poprzez zastosowanie dodatkowego filtra pojemnościowego. Wyniki symulacji pokazały, że sterowanie przekształtnika metodą gęstości impulsów zapewnia właściwy kształt prądu wejściowego w stanach statycznych i dynamicznych. Prezentowany przekształtnik może być stosowany w praktyce jako kompensator lub filtr aktywny.

Summary: Properties of the current source parallel resonant DC to AC converter controlled by means of pulse density and switched at zero voltage are presented. Method of stabilisation of the resonant circuit oscillations in the case of supplying it from DC or AC source is described. Presented results were obtained using computer simulations. Computer simulation shown there is possibility to construct supply systems with high frequency resonance circuit fed from AC or DC sources. As the current received from the sources is practically sinusoidal and in phase with the voltage, the converter is not reactive power load for supply network. The main problem relevant to the resonant voltage oscillation, when the system is supplied from the AC source, was solved by the means of additional capacitance filter. Simulation shows that the pulse modulation method of control ensures adequate input current shape in the steady and transient states of regulation. This system may be applied in practice as a power compensator or as an active filter.

Słowa kluczowe: przekształtnik rezonansowy, modulacja gęstości impulsów, miękkie przełączanie, przekształtnik AC/AC
Key words: resonant converter, pulse density modulation, soft switching, AC/AC converter

1. WPROWADZENIE

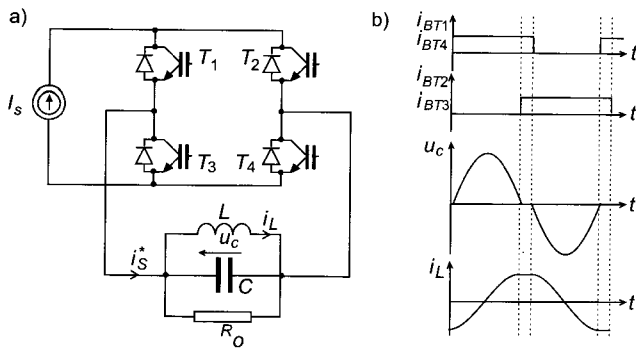
Sieć trójfazowa jest powszechnie dostępnym źródłem energii, służącym do zasilania większości odbiorników. Poprawna praca niektórych z nich możliwa jest jedynie wtedy, gdy napięcie sieci jest sinusoidalne i nie odkształcone. Niestety, część urządzeń stanowi dla sieci obciążenie nieliniowe i asy-

metryczne. Jest to źródłem asymetrii i odkształcenia napięć. Dodatkowo, konieczność poprawy efektywności przesyłu energii wymaga, ażeby z sieci pobierana była jedynie moc czynna.

Skutecznym rozwiązaniem, zapewniającym pobór z sieci jedynie mocy czynnej, jest układ z równoległym obwodem rezonansowym, stanowiącym lokalne źródło napięcia wysokiej częstotliwości, które niezależnie od typu odbiornika za-

1) Artykuł był prezentowany podczas V Szkoły — Konferencji pt.: „Elektrotechnika, prądy niesinusoidalne” w Lubiatowie (26–28 czerwca 2000 r.). Decyzją Komitetu Naukowego konferencji został wybrany do opublikowania w czasopiśmie **Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej**.

Prezentowane w artykule badania zostały zrealizowane w ramach pracy S/WE/1/98.



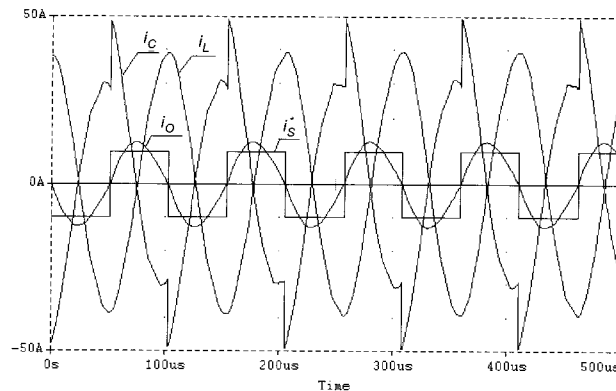
Rys. 1. Rezonansowe złącze zmiennoprądowe (AC link): a) schemat; b) podstawowe przebiegi napięć i prądów ilustrujących zasadę miękkiego przełączania tranzystorów

wsze pobiera z sieci sinusoidalny prąd w fazie z napięciem.

Idea budowania układów przekształtnikowych z wykorzystaniem wysokoczęstotliwościowych obwodów rezonansowych jest rozwijana w energoelektronice szeroko z różnych powodów. Podstawowym bywa potrzeba odizolowania galwanicznego obciążenia od źródła zasilającego, stąd przekazywanie mocy przy wysokiej częstotliwości daje szansę budowy układów z transformatorem o małych gabarytach i dużej sprawności [3,4]. Ponadto, zastosowanie układów rezonansowych do celów komutacji w układach przekształtnikowych umożliwia rozwój nowych metod sterowania przekształtników, takich jak: zasilanie poprzez złącza rezonansowe stałoprądowe (DC link), sterowanie falowników z miękkim przełączaniem (*soft switching*), sterowanie *quasi*-rezonansowe przy zerowym prądzie lub napięciu, sterowanie multirezonansowe etc.

2. ZASADA DZIAŁANIA PRZEKSZTAŁTNIKA DC/AC

Podstawowym celem badań prezentowanych w referacie była weryfikacja możliwości przekazywania energii elektrycznej przez obwód rezonansowy, z możliwością sterowania jej parametrami przy utrzymaniu regularnych i stabilnych drgań obwodu rezonansowego, oraz przełączanie przekształtników

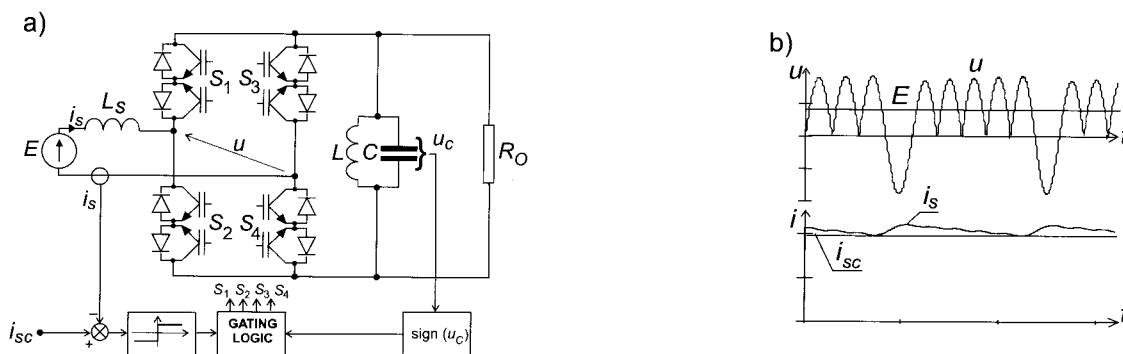


Rys. 2. Przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów ilustrujących działanie rezonansowego złącza zmiennoprądowego (AC link) obciążonego odbiornikiem rezystancyjnym.

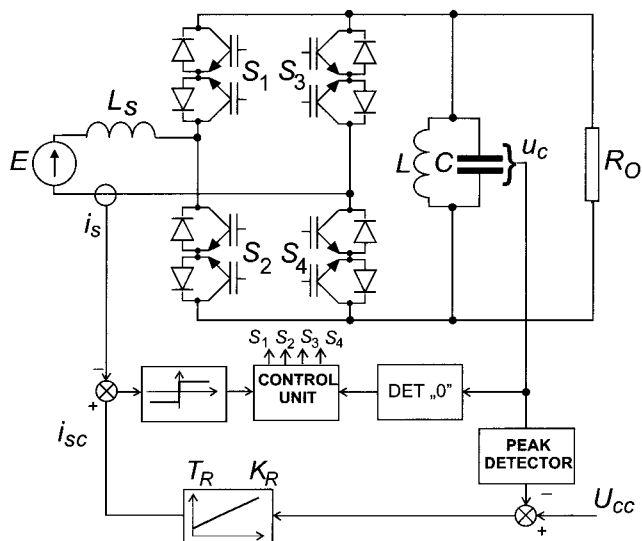
współpracujących z obwodem rezonansowym przy zerowym napięciu. Rezonansowy obwód drgający stanowi pośrednio zbiornik energii (*tank circuit*) umożliwiający budowę złącza zmiennoprądowego (AC link) pozwalającego na kojarzenie różnego typu odbiorników i źródeł.

Na rysunku 1 pokazano sposób zasilania równoległego obwodu rezonansowego (AC link) ze źródła prądu stałego przez przekształtnik przełączany przy zerowym napięciu. Dzięki częściowemu nakładaniu się impulsów sterujących, wydłuża się czas, w którym napięcie obwodu rezonansowego jest równe zero. Zapewnia to przełączanie tranzystorów przy zerowym napięciu. Ponadto unika się prawdopodobieństwa wystąpienia przepięć przy przełączaniu tranzystorów. Przykładowe przebiegi wartości napięć i prądów, ilustrujących działanie równoległego obwodu rezonansowego zasilanego ze źródła prądowego, pokazano na rysunku 2.

Najważniejszym problemem jest utrzymywanie stałej amplitudy drgań obwodu rezonansowego U_{Cm} . Z analizy parametrów przekształtnika zasilającego obwód rezonansowy wynika, że amplituda napięcia obwodu rezonansowego U_{Cm} jest funkcją prądu zasilającego I_S , przy założeniu, że przekształtnik jest bezstratny i nie może gromadzić energii [1,2]. Amplitudę napięcia na kondensatorze obwodu drgającego można regulować, zmniejszając prąd I_S pobierany ze źródła.



Rys.3. Układ do regulacji prądu zasilającego wysokoczęstotliwościowy obwód rezonansowy: a) schemat; b) przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie



Rys. 4. Schemat układu do stabilizacji amplitudy drgań obwodu rezonansowego zasilanego ze źródła napięcia stałego

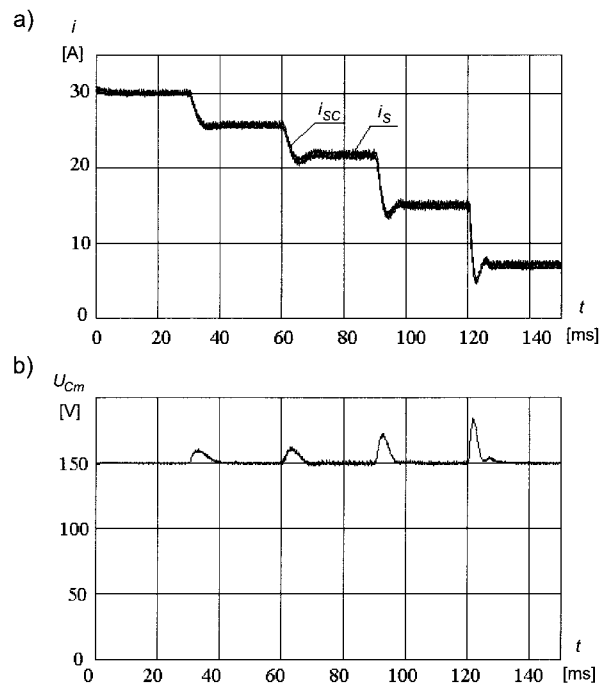
3. REGULACJA AMPLITUDY NAPIĘCIA OBWODU DRGAJĄCEGO

Na rysunku 3 zamieszczono schemat układu pozwalającego na regulację prądu zasilającego obwód rezonansowy. Energia niezbędna do podtrzymania drgań przekazywana jest ze źródła napięcia do obwodu rezonansowego poprzez miękko przełączany przemiennik częstotliwości sterowany metodą gęstości impulsów.

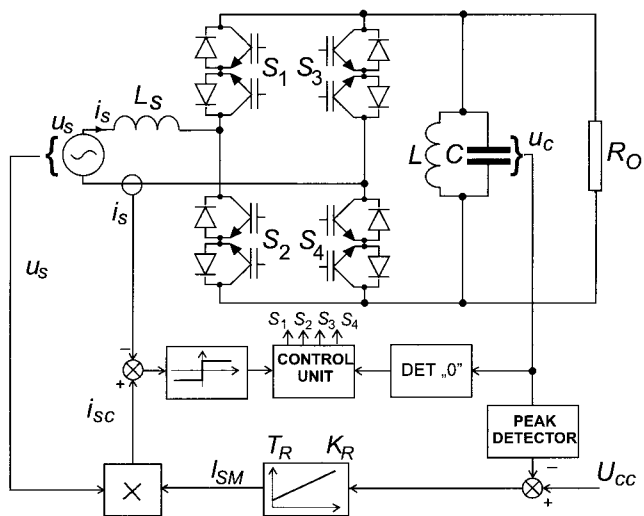
Przekształtnik stanowi swego rodzaju detektor synchroniczny prostujący napięcie na kondensatorze obwodu rezonansowego. Jeżeli prąd pobierany ze źródła jest większy od zadanego, to napięcie u na zaciskach wyjściowych przekształtnika składa się z dodatnich połówek sinusoidalnego napięcia na kondensatorze. Napięcie na dławiku L_S jest wtedy ujemne i prąd i_S pobierany ze źródła maleje. W przypadku, gdy zmaleje on poniżej prądu zadanego, zmienia się znak uchybu i od tej chwili napięcie wyjściowe przekształtnika u składa się z ujemnych połówek napięcia na kondensatorze. Napięcie na dławiku L_S staje się dodatnie i prąd i_S pobierany ze źródła zaczyna rosnąć. Po zmianie znaku uchybu cykl się powtórzy. Ten sposób regulacji napięcia wyjściowego przekształtnika nosi miano modulacji gęstości impulsów.

Moc czynna pobierana ze źródła napięcia E (przy pominięciu niewielkich strat w przekształtniku) jest równa mocy dostarczanej do odbiornika. Pozwala to na łatwą stabilizację amplitudy napięcia obwodu rezonansowego poprzez adaptację wartości prądu pobieranego ze źródła napięcia stałego do zmian obciążenia obwodu rezonansowego.

Praktyczną aplikację układu sterującego pokazano na rysunku 4. Pętla sprzężenia zwrotnego służy do utrzymywania na zadanym poziomie amplitudy napięcia obwodu rezonansowego. Sygnałem wyjściowym regulatora napięcia jest wartość zadana prądu pobieranego ze źródła napięcia stałego. Jakość regulacji napięcia obwodu rezonansowego ilustrują przebiegi czasowe wybranych napięć i prądów przedstawio-

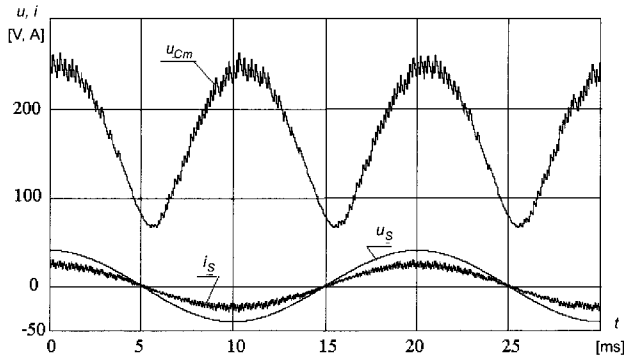


Rys. 5. Zmiany prądu i_S pobieranego ze źródła napięcia stałego E (a) i napięcia obwodu rezonansowego (b) w czasie skokowych zmian obciążenia

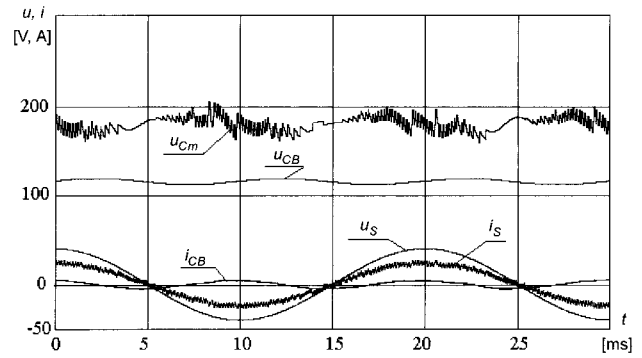


Rys. 6. Schemat układu do regulacji amplitudy napięcia obwodu rezonansowego w przypadku zasilania z jednofazowej sieci prądu przemiennego

ne rysunku 5. Skokowe zmiany obciążenia R_O powodują adaptację prądu i_{SC} , za którym podąża prąd pobierany ze źródła napięcia E , tak ażeby amplituda napięcia obwodu rezonansowego pozostała na nie zmienionym poziomie. Skuteczność stabilizacji napięcia ilustrują przebiegi napięć i prądów pokazane na rysunku 5b, na którym zobrazowano zmiany amplitudy napięcia obwodu rezonansowego w czasie skokowych zmian obciążenia. Układ regulacji zapewnia skuteczną stabilizację amplitudy drgań obwodu rezonansowego na zadanym poziomie.



Rys. 7. Amplituda napięcia obwodu rezonansowego U_{Cm} , prądu i_S i napięcia u_S w przypadku zasilania obwodu rezonansowego z jednofazowego źródła napięcia przemiennego ($R_O = 40\Omega$ i $\sqrt{\frac{L}{C}} = 0,5\Omega$).



Rys. 9. Amplituda napięcia obwodu rezonansowego U_{Cm} , prądu i_S i napięcia u_S w przypadku zasilania obwodu rezonansowego z jednofazowego źródła napięcia przemiennego wraz z filtrem pojemnościowym ($C_B = 2200\mu F$, $R_O = 40\Omega$ i $\sqrt{\frac{L}{C}} = 0,5\Omega$)

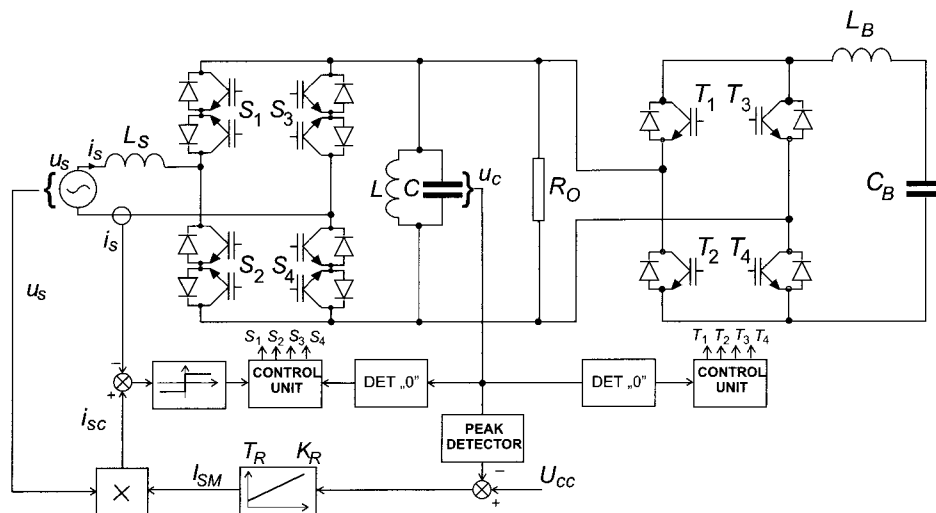
4. STABILIZACJA AMPLITUDE DRGAŃ OBWODU REZONANSOWEGO W PRZYPADKU ZASILANIA ZE ŹRÓDŁA NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

Schemat układu stabilizacji amplitudy obwodu rezonansowego przy zasilaniu ze źródła napięcia przemiennego pokazano na rysunku 6.

Wcześniejsza analiza wykazała, że amplitudę napięcia obwodu rezonansowego można regulować zmieniając moc czynną pobieraną ze źródła. Układ regulacji powinien być tak skonstruowany, aby prąd pobierany ze źródła napięcia przemiennego był z nim w fazie (brak mocy biernej), a jego amplituda I_{SM} (determinująca ilość energii pobieranej ze źródła) zmieniała się w stopniu zależnym od obciążenia obwodu rezonansowego. Wartość zadaną prądu pobieranego ze źródła i_{SC} uzyskuje się jako iloczyn sinusoidy synfazowej z napięciem i amplitudy prądu I_{SM} pobieranego z sieci, za którą podąża prąd rzeczywisty i_S .

Przebiegi napięć i prądów ilustrujących pracę układu do regulacji amplitudy napięcia obwodu rezonansowego w przypadku zasilania z jednofazowej sieci prądu przemiennego

pokazano na rysunku 7. Skuteczność stabilizacji amplitudy napięcia obwodu rezonansowego jest mniejsza niż w przypadku zasilania ze źródła napięcia stałego, gdyż moc chwilowa pobierana z jednofazowej sieci, oprócz składowej stałej równej mocy czynnej, zawiera także składową oscylującą z częstotliwością dwukrotnie większą od częstotliwości sieci. Powoduje to oscylacje amplitudy napięcia obwodu rezonansowego. Pulsacje amplitudy napięcia na kondensatorze można ograniczyć dodatkowym obwodem stabilizującym drgania, którego schemat przedstawiono na rysunku 8. Obwodem tym jest odpowiednio duży kondensator C_B skojarzony z obwodem rezonansowym poprzez dodatkowy przekształtnik. Kondensator C_B pełni rolę źródła napięcia stałego, które magazynując moc oscylującą, automatycznie stabilizuje drgania obwodu rezonansowego. Efektywność stabilizacji ilustrują wybrane przebiegi napięć i prądów pokazane na rysunku 9. Skuteczność stabilizacji amplitudy napięcia obwodu rezonansowego jest teraz niewiele mniejsza niż w przypadku zasilania ze źródła napięcia stałego, gdyż pulsacje mocy chwilowej pobieranej z jednofazowej sieci ogranicza odpowiednio duży kondensator C_B .



Rys. 8. Schemat układu regulacji prądu pobieranego z jednofazowego źródła napięcia przemiennego za pomocą przekształtnika zasilającego rezonansowe złącze zmiennoprądowe wraz z dodatkowym filtrem pojemnościowym

5. WNIOSKI

Badania symulacyjne wykazały, że istnieje możliwość budowy układów zasilających wysokoczęstotliwościowy obwód rezonansowy zarówno ze źródeł stałoprądowych, jak i zmiennoprądowych. Przekształtnik wejściowy nie pobiera z sieci mocy biernej, gdyż prąd pobierany ze źródła jest praktycznie sinusoidalny i jest w fazie z napięciem.

W przypadku zasilania ze źródeł zmiennoprądowych amplituda napięcia wysokoczęstotliwościowego obwodu rezonansowego wykazuje pewne fluktuacje związane z pulsacjami mocy czynnej. Problem ten został rozwiązany dzięki zastosowaniu filtra pojemnościowego.

Regulacja prądu pobieranego ze źródła zasilającego metodą gęstości impulsów zapewnia właściwy kształt prądu w stanach statycznych i dynamicznych oraz przełączanie kluczy tranzystorowych przy zerowym napięciu.

Istnieje możliwość wykorzystania przekształtników z wysokoczęstotliwościowym równoległym obwodem rezonansowym do budowy kompensatorów mocy biernej i filtrów aktywnych [2].

6. LITERATURA

1. Bogdan A.; Citko T.: *The electrical energy transfer through HF-AC resonant link converter*. Arch. Electr. Engin. 1996, XLV, 4, 369–383.
2. Citko T., Bogdan A.: *Application of the HF-AC resonant tank circuit to the active power line conditioners for three phase asymmetrical and non-linear loads*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics: Warsaw-Poland, June 17–20, 1996, 730–734.
3. Pelly B. R.: *Latest developments in static high frequency power sources for induction heating*. IEEE Transactions Ind. Electron. Contr. Instrum., vol. IECI-17 June 1970, 297–312.
4. Sood P. K., Lipo T. A.: *Power conversion distribution system using a high-frequency AC link*. IEEE Trans. Ind. Applic. 1988, 24, 2, 288–299.



Dr inż. Antoni Bogdan

Urodził się w 1955r. W 1980 roku ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej. Stopień doktora uzyskał w roku 1990 na Politechnice Warszawskiej, po przedstawieniu pracy dotyczącej bezpośredniego przemiennika częstotliwości jako kompensatora mocy biernej. Od 1980 roku jest pracownikiem Politechniki Białostockiej, gdzie obecnie zatrudniony jest na stanowisku adiunkta w Katedrze Energoelektroniki i Napędów Elektrycznych. Aktualnie, w kręgu jego zainteresowań znajdują się różne typy przekształtników tranzystorowych i miękko przełączanych falowników rezonansowych. W swoim dorobku ma 25 artykułów na temat wspomnianych wcześniej zagadnień.