

mgr inż. JULIAN WOSIK
mgr inż. MAREK HEFCZYC
Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa EMAG
prof. dr hab. inż. BOGDAN MIEDZIŃSKI
Instytut Energoelektryki, Politechnika Wroclawska

Oddziaływanie energoelektronicznych przekształtników mocy zasilających duże odbiory na górnicze sieci elektroenergetyczne Część I

W części pierwszej artykułu scharakteryzowano nieliniowe odbiory w postaci energoelektronicznych przekształtników mocy stosowane w górniczych układach napędowych. Przedstawiono charakterystykę odkształconych przebiegów napięć i prądów wraz z ich analizą widmową.

1. WSTĘP

Intensywny rozwój przyrządów półprzewodnikowych (diod, tyrystorów, tranzystorów mocy), stosunkowo niska i malejąca ich cena, coraz lepsze parametry techniczne oraz wysoki stopień niezawodności technicznej sprzyjają ich upowszechnieniu w postaci praktycznych realizacji układów stosowanych w przemyśle. Szczególnie szerokie zastosowanie przyrządy te znalazły w energoelektronicznych przekształtnikach mocy zasilających napędy elektryczne.

Burzliwy rozwój energoelektroniki i nowych technik sterowania pracą napędów elektrycznych [1, 2] wywołuje w ostatnich latach lawinowy wzrost liczby użytkowanych przekształtników mocy przy występowaniu dużej ich różnorodności.

Szacuje się, że w krajach najbardziej rozwiniętych technologicznie (USA, Japonia) około 80% ogólnej ilości zużywanej energii elektrycznej jest przetwarzane za pośrednictwem energoelektronicznych przekształtników mocy. Intensywny wzrost zużycia energii przetwarzanej za pomocą energoelektronicznych przekształtników mocy występuje także w kraju.

W polskim górnictwie węgla kamiennego już od ponad 40 lat obserwuje się wprowadzanie energoelektronicznych przekształtników mocy. Początkowo dotyczyło to układów prostownikowych [3, 4] wykorzystywanych do zasilania dołowej trakcji elektrycznej i układów ładowania baterii trakcyjnych.

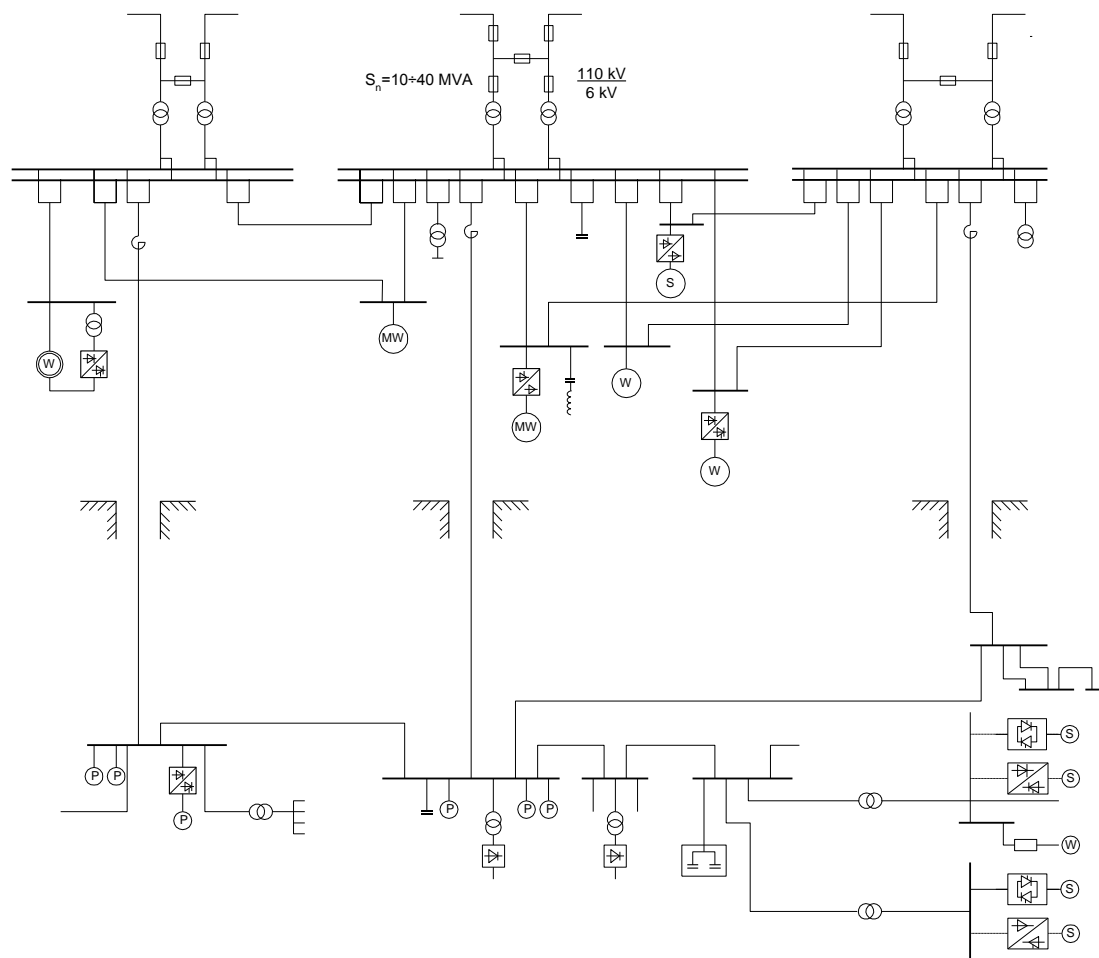
Na początku lat 70. ubiegłego wieku wprowadzono tyrystorowe układy prostownikowe do zasilania silników prądu stałego stanowiących napędy maszyn wyciągowych (1974 r. – maszyna wyciągowa z napędem prostownikowym – KWK Staszic, 1983 r. – maszyna wyciągowa w układzie Leonarda z tyrystorowym wzbudzeniem – KWK Czeczot).

Wprowadzono również układy półprzewodnikowe do zasilania silników prądu przemiennego (1982 r. – maszyna wyciągowa w układzie kaskady zaworowej – KWK Czeczot, 1994 r. – maszyna wyciągowa z cyklokonwertorowym napędem asynchronicznym – KWK Jankowice, 1985 r. – maszyna wyciągową z cyklokonwertorowym napędem synchronicznym – KWK Wieczorek).

Począwszy od początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia wdrożono szereg napędów w układzie kaskady zaworowej na wentylatorach głównego przewietrzania i sprężarkach sprężonego powietrza, co wynikało z konieczności ograniczenia zużycia energii elektrycznej przy zmniejszonym zapotrzebowaniu na sprężone powietrze i na powietrze do wentylacji wyrobisk [7, 9].

Dostępność energoelektronicznych przekształtników mocy przeznaczonych do pracy w podziemiach kopalń [11÷17] powoduje coraz szersze ich wykorzystywanie.

W okresie zatem ostatnich kilkunastu lat w dołowych sieciach górniczych stosuje się energoelektroniczne przekształtniki mocy (softstarty, przemienniki częstotliwości) głównie w układach sterowania pracą napędów przenośników dołowych, wentylatorów



Rys. 1. Przykładowy układ zasilania kopalni węgla kamiennego

lutniowych i pomp głównego odwadniania [5, 6, 10] oraz do zasilania wentylatorów głównego przewietrzania [8].

Cechą charakterystyczną przeważającej większości przekształtników mocy jest to, że pobierają one z sieci zasilających prądy odkształcone od przebiegów sinusoidalnych. Z tego względu są one określane jako odbiory nieliniowe.

Przepływy prądów odkształconych w układach zasilających wywołują na liniowych elementach torów prądowych (impedancjach) odkształcone spadki napięcia. W efekcie powyższego zjawiska w pośrednich punktach torów prądowych (rozdzielnicach) występują napięcia odkształcone. Odbiory tzw. liniowe przyłączone w tych punktach do sieci zasilającej pod wpływem odkształconego napięcia zasilającego pobierają odkształcone prądy.

Większość odbiorów jest jak wiadomo wrażliwa na zasilanie napięciem odkształconym. Ze względu na znaczne długości dołowych sieci kablowych (a więc i duże wartości impedancji zastępczych), dużą ilość potencjalnych odbiorów, które mogą być zasilane z energoelektronicznych przekształtników mocy, skutki odkształcenia napięcia i przepływów prądów

odkształconych mogą być szczególnie dotkliwie odczuwalne w tych sieciach.

2. CHARAKTERYSTYKA KOPALNIANYCH UKŁADÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH

Eksploatacja układu elektroenergetycznego w kopalniach węgla kamiennego prowadzona jest zwykle w taki sposób, że sieć powierzchniowa zasilana jest z jednego systemu szyn zbiorczych rozdzielni głównej za pomocą wydzielonego transformatora. Sieć dołowa zaś zasilana jest z drugiego systemu szyn zbiorczych, zasilanego z drugiego transformatora (uproszczony schemat przykładowego zasilania zakładu górniczego przedstawiono na rys. 1). Powyższe rozwiązanie zapobiega przeniesieniu stosunkowo częstych zakłóceń w pracy sieci dołowej do odbiorów powierzchniowych (wentylatory głównego przewietrzania, maszyny wyciągowe). W określonych jednak sytuacjach eksploatacja może być prowadzona przy połączonych systemach szyn zbiorczych. W układzie tym

w części powierzchniowej można wyróżnić szereg odbiorów nieliniowych, takich jak:

- tyrystorowy napęd prądu stałego (napęd maszyny wyciągowej),
- napęd asynchroniczny w układzie kaskady zaworowej (napędy wentylatorów głównych przewietrzania, napędy sprężarek sprężonego powietrza),
- napęd z wykorzystaniem przemiennika częstotliwości (napędy wentylatorów głównego przewietrzania).

W części dołowej kopalnianego układu zasilającego można wyróżnić także odbiory nieliniowe, do których należą:

- napęd pompy głównego odwadniania z wykorzystaniem przemiennika częstotliwości,
- przewoźne zautomatyzowane stacje tyrystorowe typu APSP, APST do zasilania trakcji elektrycznej,
- zespoły przekształtnikowe do ładowania trakcyjnych baterii akumulatorowych,
- napędy przenośników dołowych za pomocą urządzeń łagodnego rozruchu – softstartów,
- napędy przenośników dołowych z wykorzystaniem przemienników częstotliwości,
- napędy wentylatorów lutniowych z wykorzystaniem przemienników częstotliwości.

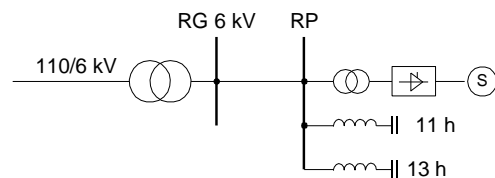
Przy stosunkowo zatem niedużych wartościach mocy poszczególnych odbiorów – od kilkudziesięciu do kilkuset kW – duża ich ilość może wywoływać niepożądane i odczuwalne skutki. Skutki te mogą być tym groźniejsze, że większość tych odbiorów zasilana jest na napięciu niskim (do 1 kV), a więc odkształcone prądy przepływają przez stacje transformatorowe 6 kV/nn o stosunkowo dużych wartościach impedancji zastępczych (wzdłużnych).

3. PRZYKŁADY ODDZIAŁYWANIA ODBIORÓW NIELINIOWYCH NA KOPALNIANE UKŁADY ZASILAJĄCE

W zależności od rodzaju zastosowanego odbioru nieliniowego, formy pracy urządzenia zasilanego oraz stanu pracy zastosowanych filtrów wyższych harmonicznych odkształcenie przebiegów prądów i napięć w różnych miejscach układu zasilającego może być bardzo różne. Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów dla wybranych kopalnianych odbiorów nieliniowych.

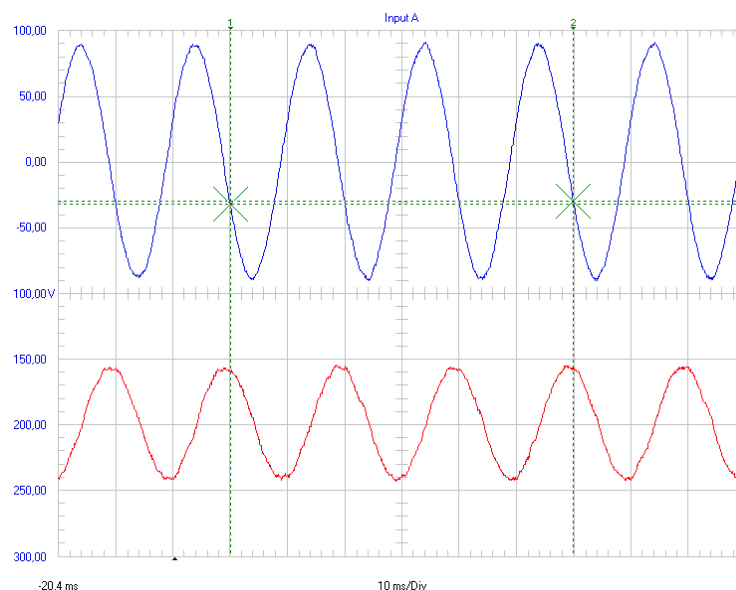
3.1. Tyrystorowy napęd prądu stałego (napęd maszyny wyciągowej)

Przykładowy schemat elektrycznego zasilania tyrystorowego napędu maszyny wyciągowej przedstawiono na rys. 2.

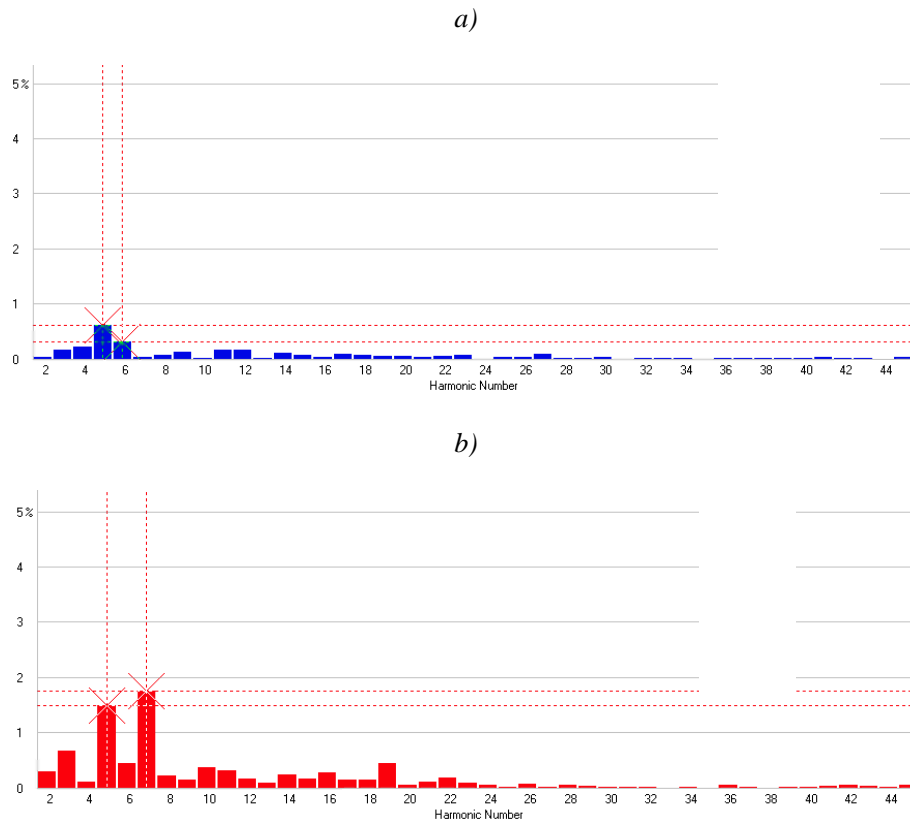


Rys. 2. Przykładowy schemat zasilania tyrystorowego napędu maszyny wyciągowej

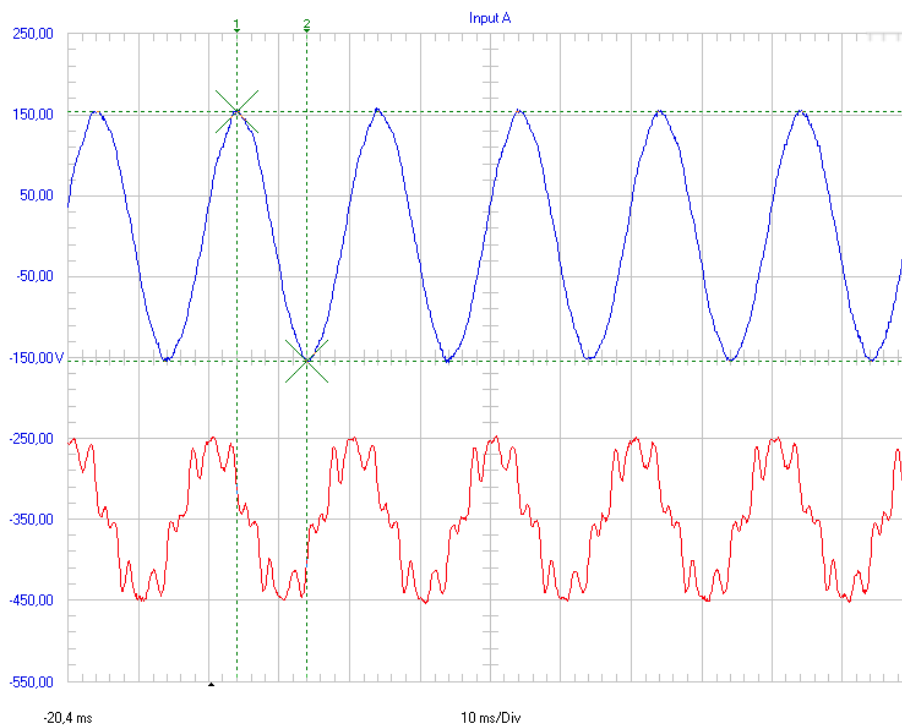
Przebiegi prądów i napięć zarejestrowane w różnych punktach układu zasilającego mogą być zatem odkształcone w różnym stopniu, co widać z porównania przebiegów pokazanych na rys. 3÷16.



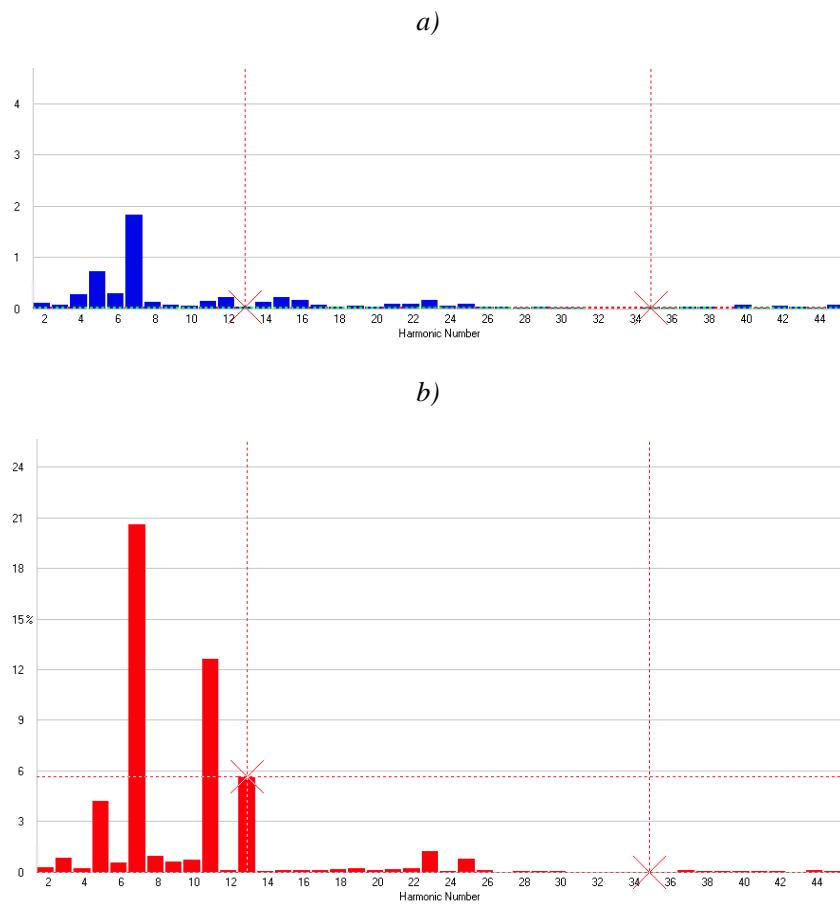
Rys. 3. Przebieg napięcia U_1 i prądu I_1 na zasilaniu rozdzielni RG po stronie 6 kV – transformator 16 MVA



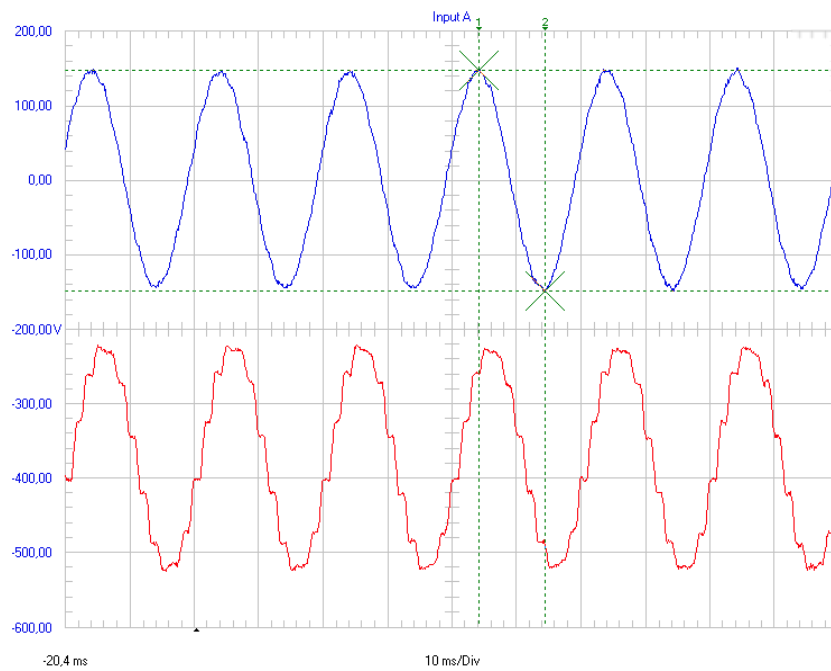
Rys. 4. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia U_1 (a) i prądu I_1 (b) na zasilaniu rozdzielni RG – transformator 16 MVA



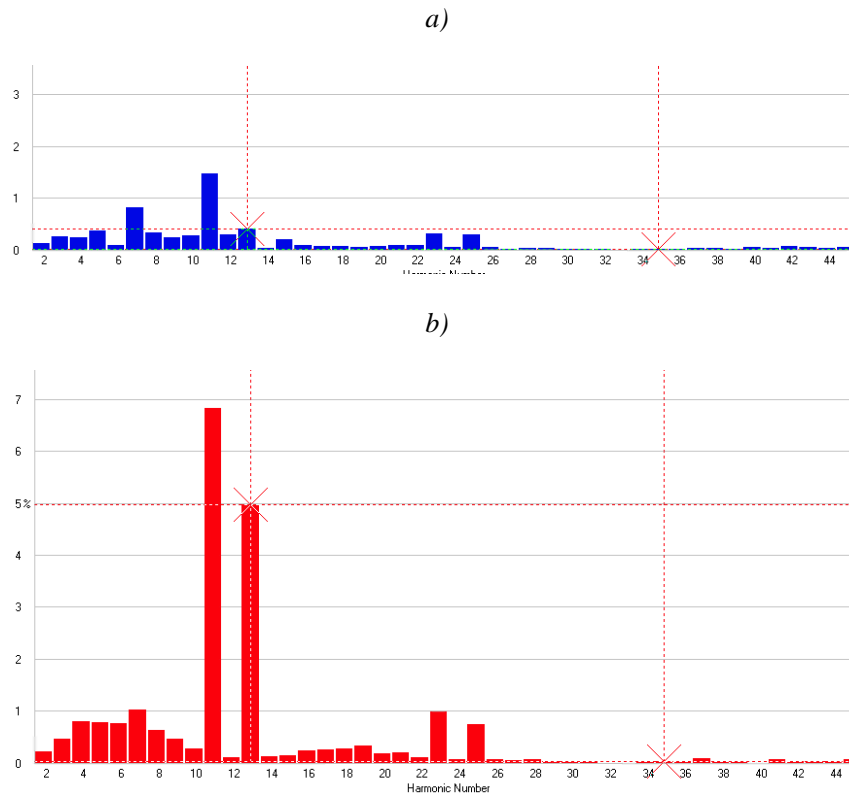
Rys. 5. Przebieg napięcia U_1 i prądu I_1 na odpływie z rozdzielni RG – odpływ do maszyny tyrystorowej



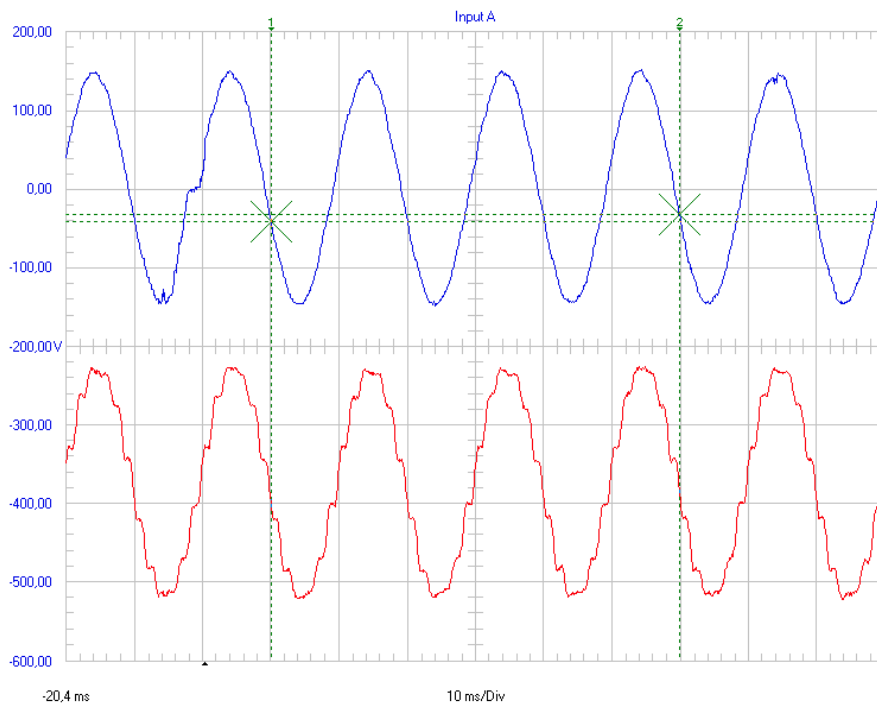
Rys. 6. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia U_1 (a) i prądu I_1 (b) na zasilaniu rozdzielni RG – odpływ do maszyny tyrystorowej



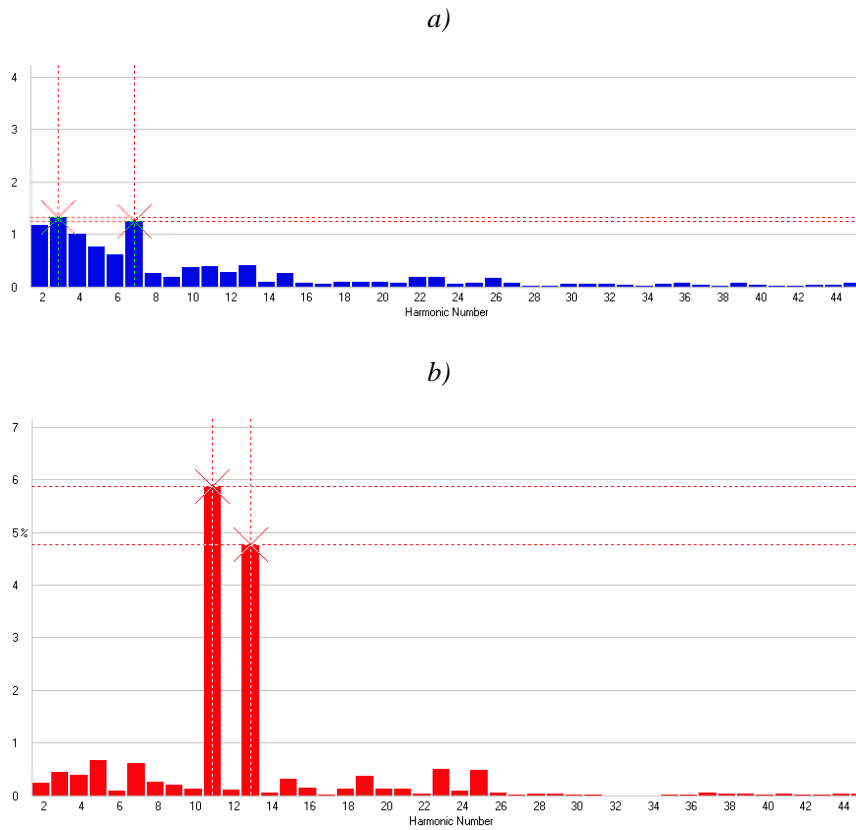
Rys. 7. Przebieg napięcia U_1 i prądu I_1 na zasilaniu rozdzielni RP (oba mostki prostownicze złączone) faza rozruchu, filtry 11-13 h wyłączone



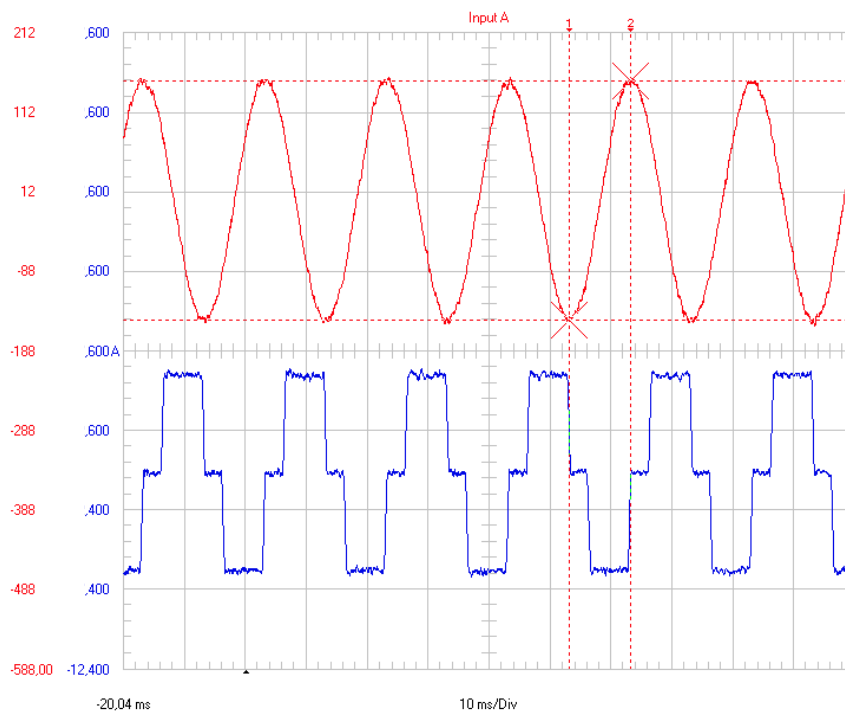
Rys. 8. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia U_1 (a) i prądu I_1 (b) na zasilaniu rozdzielni RP (oba mostki prostownicze złączone) faza rozruchu, filtry 11-13 h wyłączone



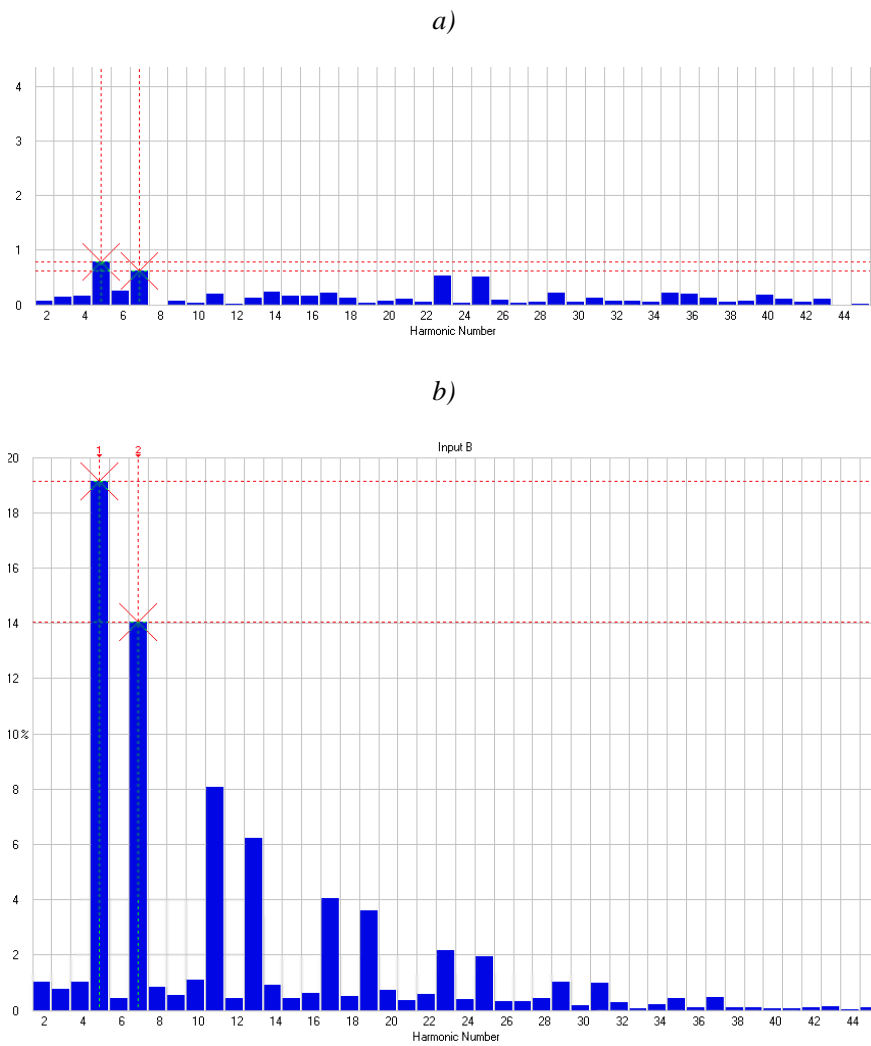
Rys. 9. Przebieg napięcia U_1 i prądu I_1 na zasilaniu rozdzielni RP (oba mostki prostownicze złączone) faza rozruchu, filtry 11-13 h załączone



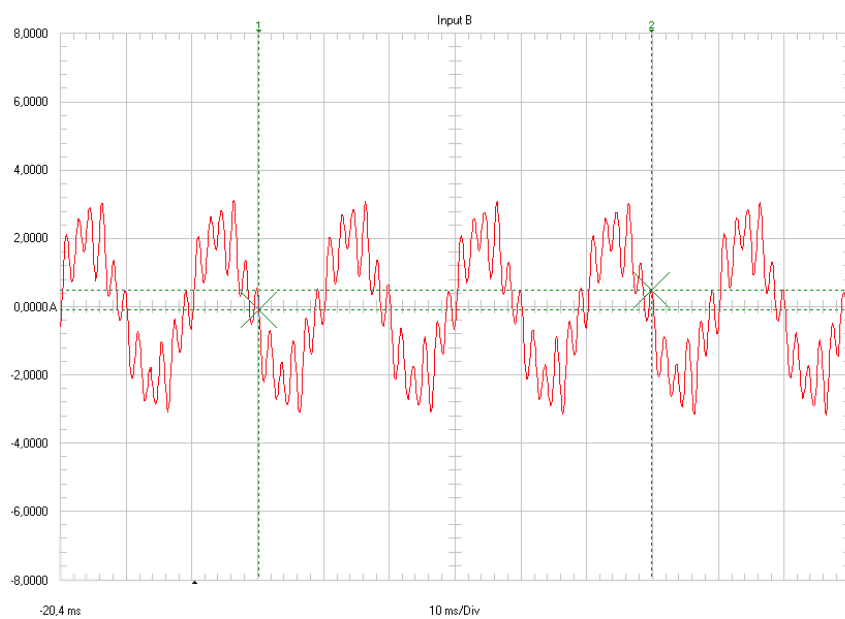
Rys. 10. Zawartość wyższych harmonicznnych w przebiegu napięcia $U_{1(a)}$ i prądu I_1 (b) na zasilaniu rozdzielni RP (oba mostki prostownicze załączone) faza rozruchu, filtry 11-13 h załączone



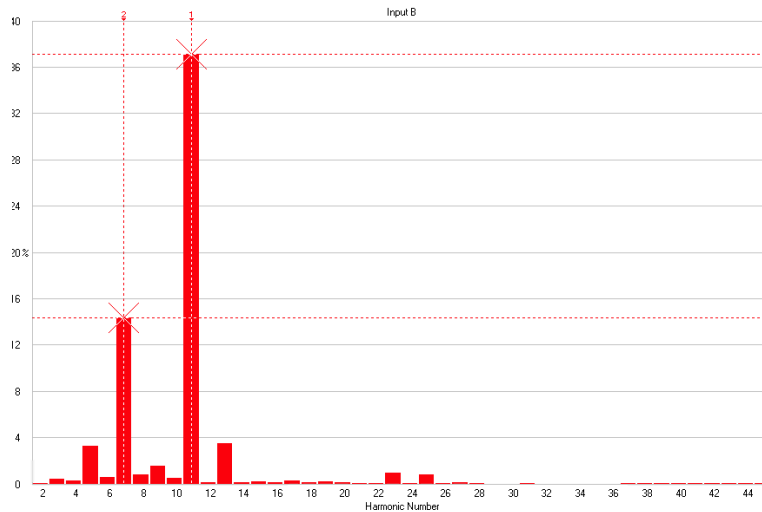
Rys. 11. Przebieg napięcia U_1 i prądu I_1 na zasilaniu jednego 6-pulsowego mostka prostownikowego maszyny wyciągowej



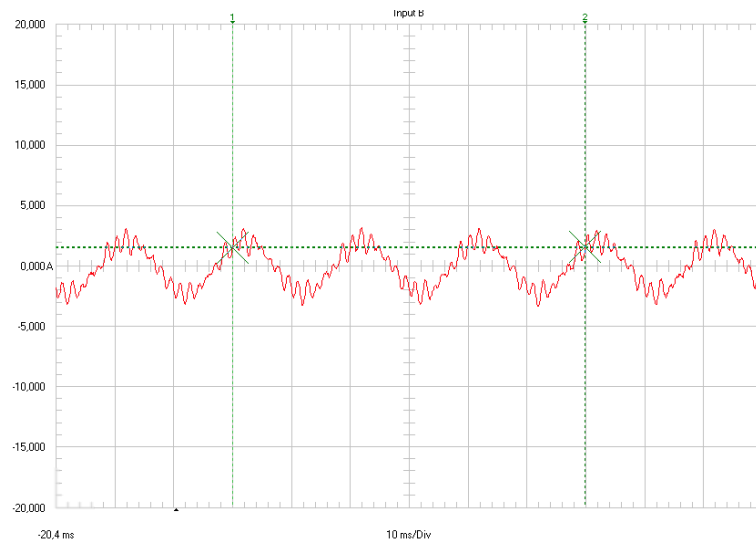
Rys. 12. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia U_1 (a) i prądu I_1 (b) na zasilaniu jednego 6-pulsowego mostka prostownikowego maszyny wyciągowej



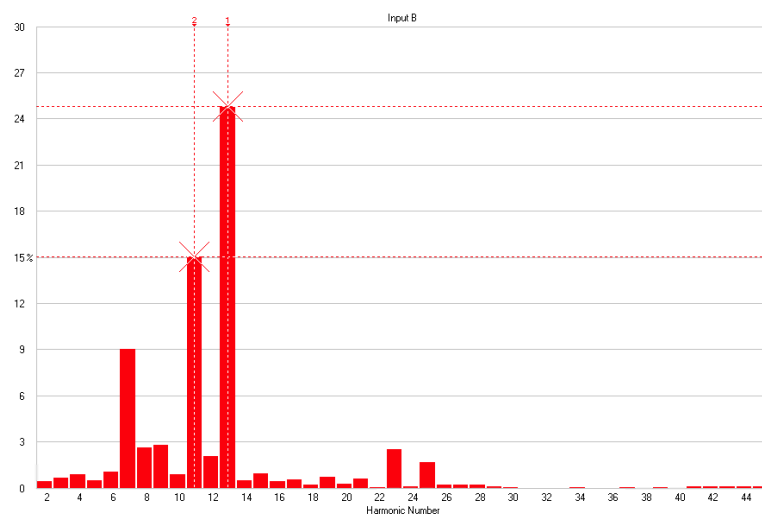
Rys. 13. Przebieg prądu I w filtrze 11. harmonicznej, maszyna wyciągowa – jazda ustalona



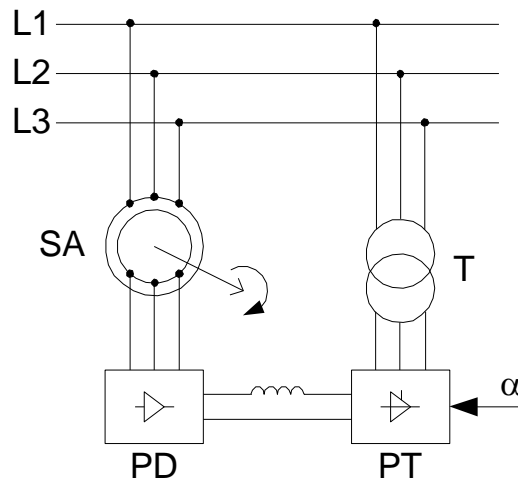
Rys. 14. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu prądu I w filtrze 11. harmonicznej, maszyna wyciągowa – jazda ustalona



Rys. 15. Przebieg prądu I w filtrze 13. harmonicznej, maszyna wyciągowa – postój



Rys.16. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu prądu I w filtrze 13. harmonicznej, maszyna wyciągowa – postój



Rys.17. Schemat ideowy kaskady zaworowej ($M=const.$)
 SA – silnik asynchroniczny; PD – prostownik diodowy; PT – prostownik sterowany;
 T – transformator dopasowujący

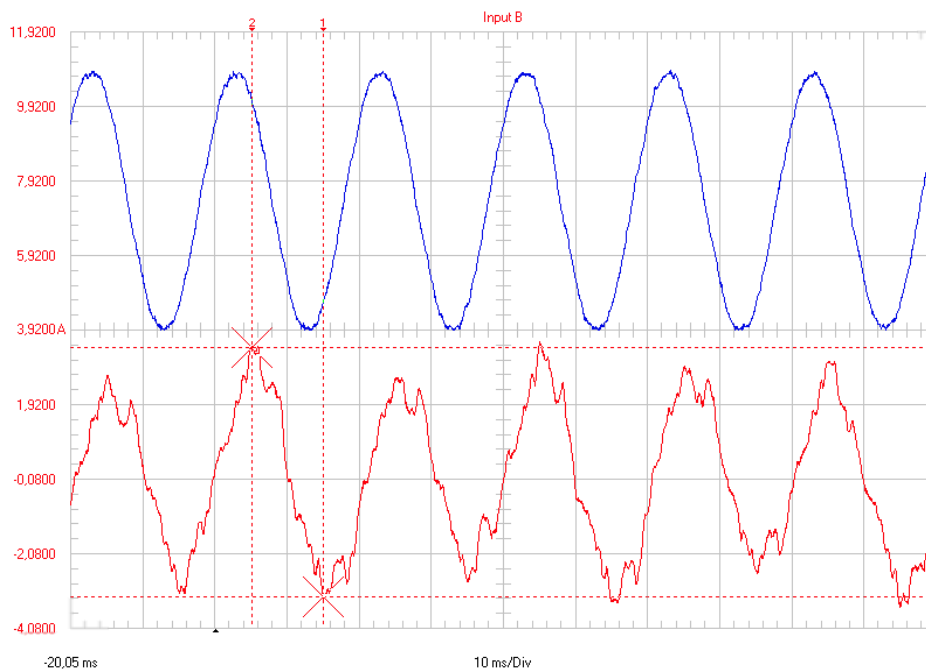
Z zarejestrowanych przebiegów napięć i prądów w czasie widać wyraźnie, że charakteryzują się one znacznym udziałem wyższych harmonicznych.

3.2. Napęd wentylatora głównego przewietrzania w układzie kaskady zaworowej [5]

Schemat ideowy układu kaskady zaworowej przedstawiono na rys. 16.

Przebiegi napięcia i prądu w czasie zarejestrowane na zasilaniu stojana silnika asynchronicznego przedstawiono na rys. 17, 18.

Jak widać z powyższych rysunków, przebieg napięcia charakteryzuje się minimalną zawartością wyższych harmonicznych, natomiast w przebiegu prądu udział wyższych harmonicznych (głównie 5. i 7.) znacznie wzrasta.



Rys. 18. Przebieg napięcia U_1 i prądu I_1 zasilanie kaskady podsynchronicznej, stojan wirnika ($P = 800 \text{ kW}$, $n = 77\% n_{z\text{nam.}}$)

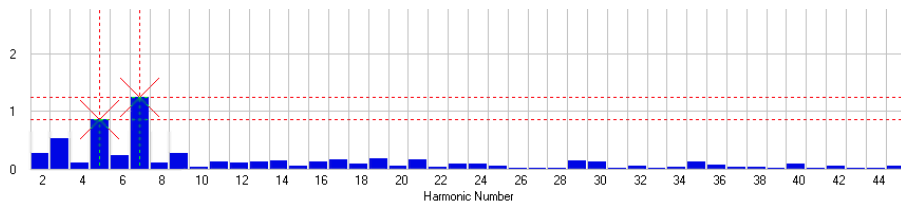
3.3. Napęd wentylatora głównego przewietrzania z wykorzystaniem przemiennika częstotliwości [6]

Dla układu zasilania wentylatora za pośrednictwem przemiennika częstotliwości jak na rys. 20 zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu w cza-

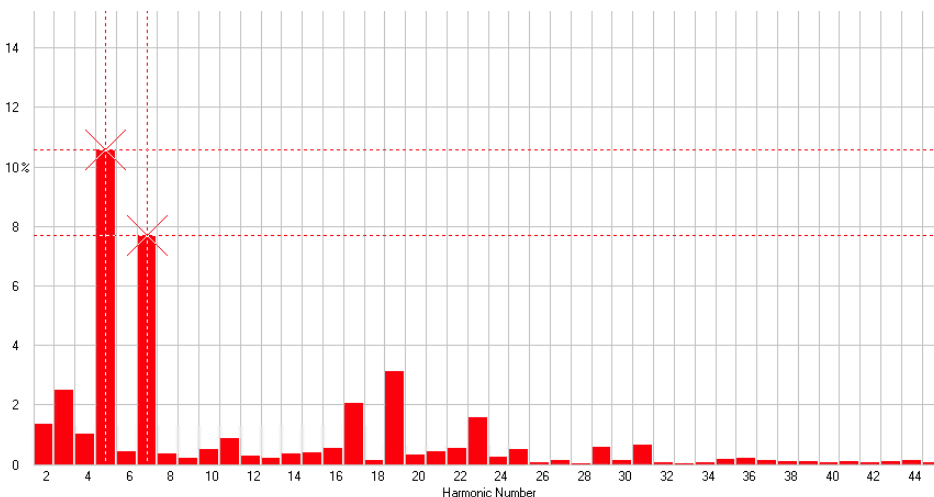
sie w poszczególnych punktach pomiarowych (oznaczonych pp 1-3) przedstawiono na rys. 21÷25.

Dla takich kształtów przebiegów prądowych w widmie wyższych harmonicznych występują również jak widać charakterystyczne dominujące wyższe harmoniczne 5. i 7.

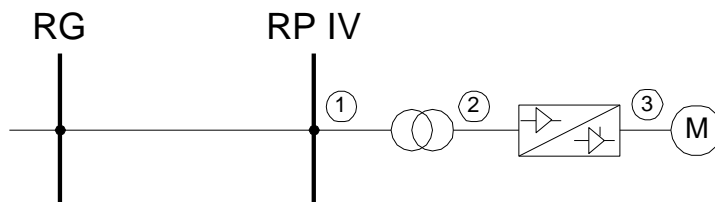
a)



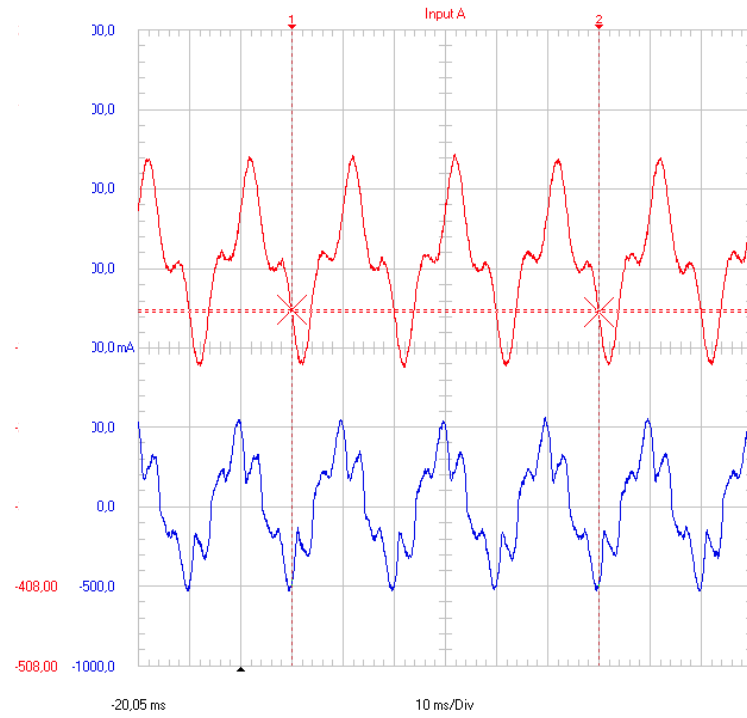
b)



Rys. 19. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia U_1 (a) i prądu I_1 (b) zasilanie kaskady podsynchronicznej, stojan wirnika ($P = 800 \text{ kW}$, $n = 77\% n_{z\text{nam.}}$) ($I_{h=1} = 100\%$; $U_{h=1} = 100\%$)

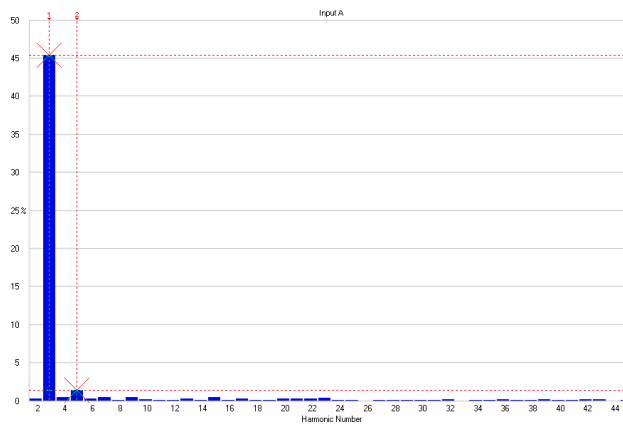


Rys. 20. Schemat układu zasilania wentylatora głównego przewietrzania za pośrednictwem przemiennika częstotliwości

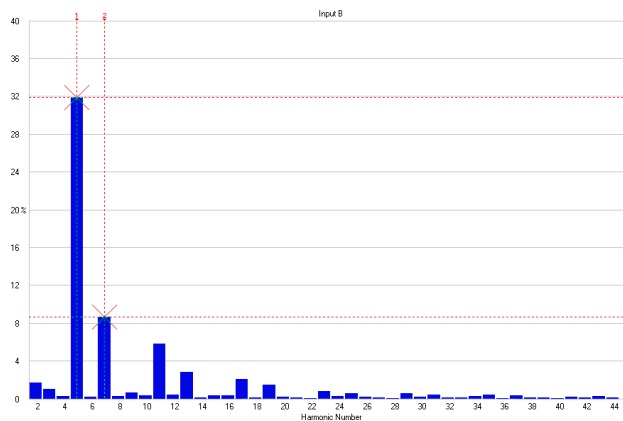


Rys. 21. Przebieg napięcia U_1 i prądu I_1 na odpływie do transformatora 6/0,69 kV (pp. 1) zasilającego przemiennik częstotliwości

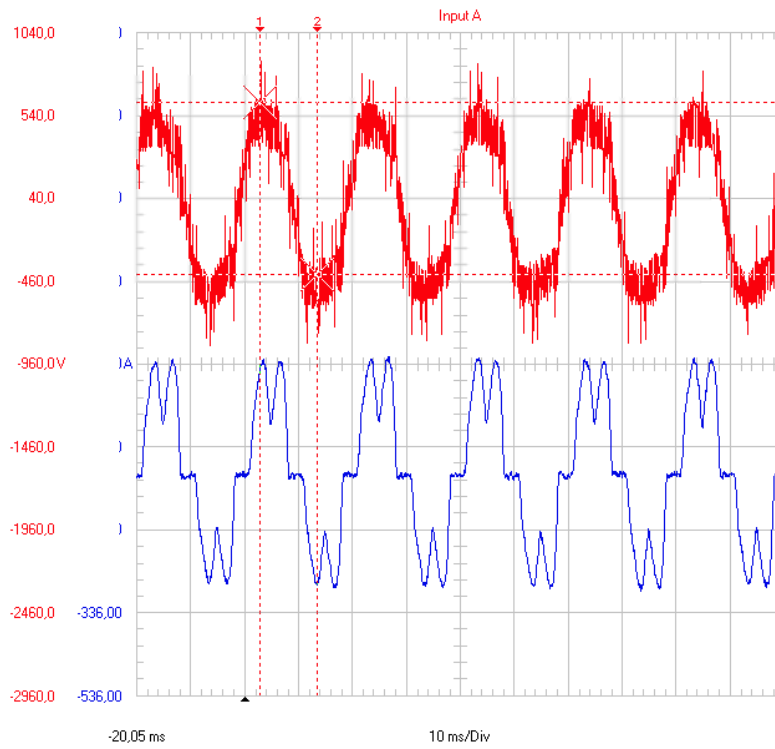
a)



b)

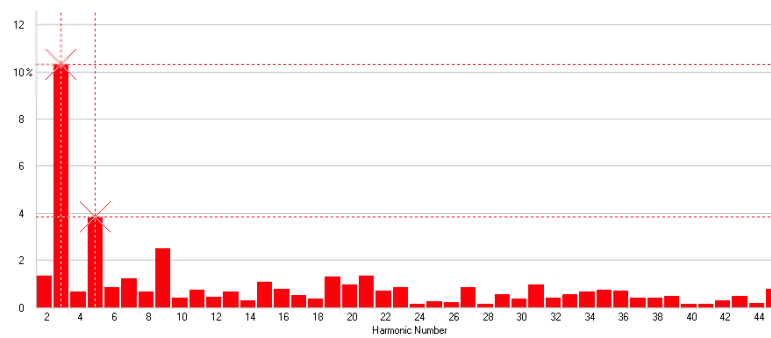


Rys. 22. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia U_1 (a) i prądu I_1 (b) na odpływie do transformatora

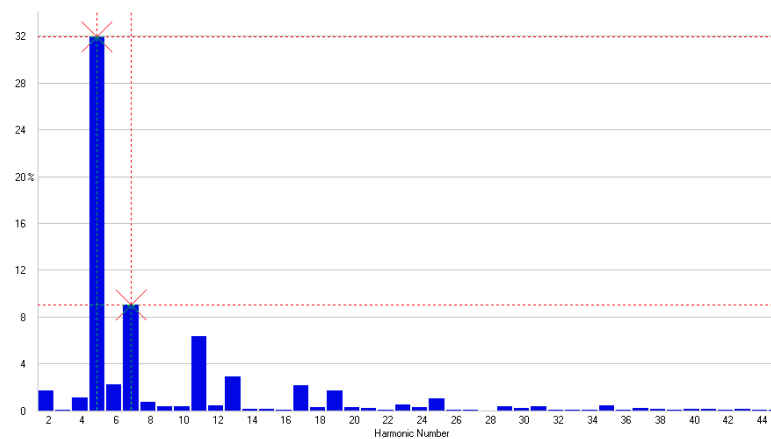


Rys. 23. Przebieg napięcia U_2 i prądu I_2 na wejściu do przemiennika częstotliwości (pp. 2)

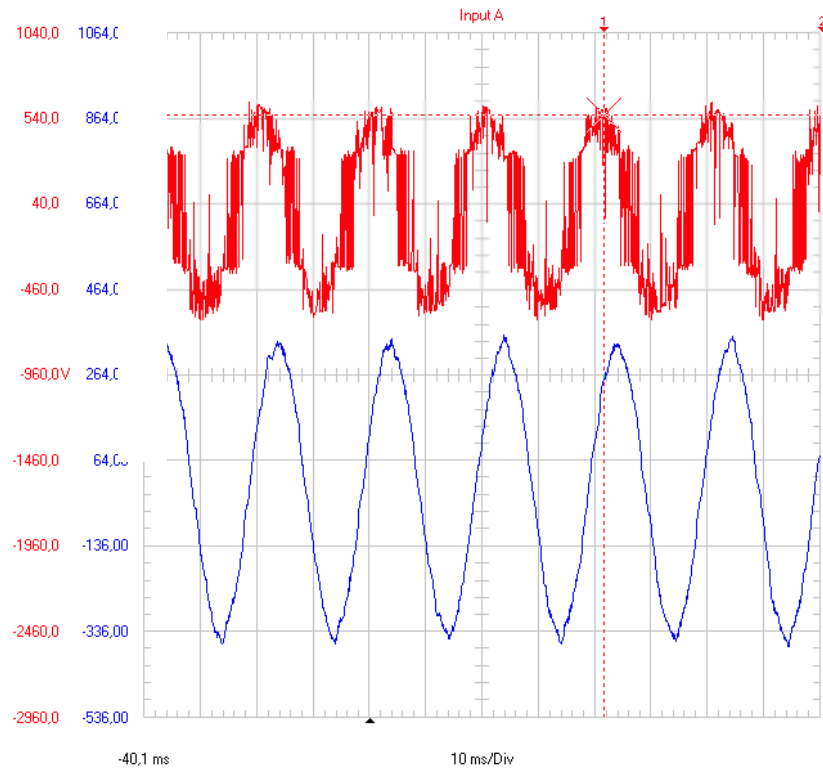
a)



b)



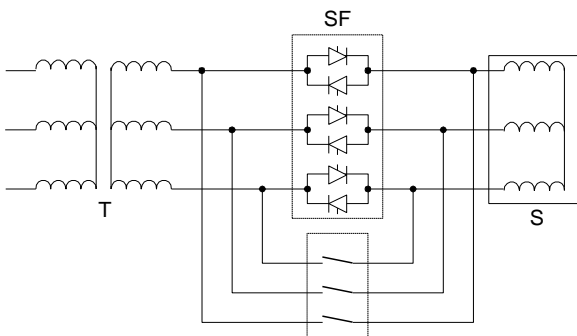
Rys. 24. Zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia U_2 (a) i prądu I_2 (b) na wejściu do przemiennika częstotliwości



Rys. 25. Przebieg napięcia U_1 i prądu I_1 na wyjściu z przemiennika częstotliwości zasilającego wentylator (pp. 3)

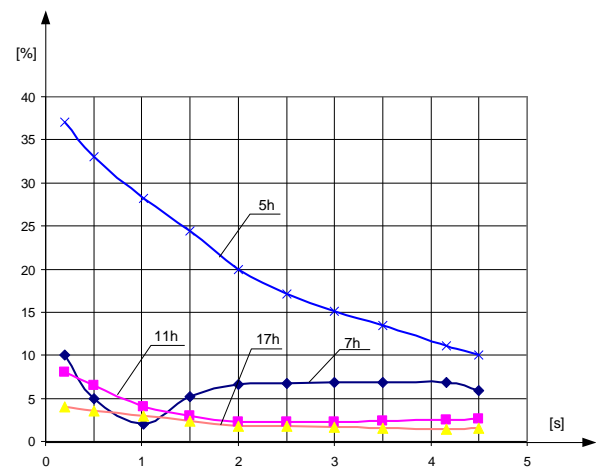
3.4. Napęd przenośnika z wykorzystaniem urządzenia łagodnego rozruchu – soft-startu [7, 8]

W układach łagodnego rozruchu ciąglej zmianie ulega kąt przewodzenia tyrystorów.



Rys. 26. Schemat ideowy soft startu
T – transformator zasilający; SF – softstart;
S – silnik asynchroniczny

W wyniku tego zjawiska zmienia się kształt przebiegu prądowego, skutkiem czego w czasie rozruchu ulega zmianie widmo harmonicznych prądu. Przykładowy przebieg zmian widma prądu rozruchu silnika asynchronicznego z wykorzystaniem softstartu zaczerpnięty z publikacji [29] przedstawiono na rys. 27.



Rys. 27. Zmienność widma harmonicznych podczas rozruchu przenośnika taśmowego (silnik asynchroniczny zasilany z softstartu) [29]

Literatura
w II części artykułu w nr 3/2009

Recenzent: doc. dr inż. Franciszek Szczucki