ELEKTROTECHNIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ELECTRICAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-E/2009
ZESZYT 15
ROK 106
ISSUE 15
YEAR 106

GRZEGORZ SKARPETOWSKI*

WYBRANE PROBLEMY ZWIĄZANE Z MODELOWANIEM I WYMIAROWANIEM PRZEKSZTAŁTNIKA WEJŚCIOWEGO LOKOMOTYWY ZASILANEJ Z SIECI NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

EFFECTS TO BE CONSIDER BY THE DIMENSIONING OF THE AC LOCOMOTIVE INPUT CIRCUIT

Streszczenie

Artykuł przedstawia w bardzo skróconej formie wybrane problemy, które należy uwzględniać przy wymiarowaniu obwodów wejściowych lokomotyw przekształtnikowych zasilanych z sieci napięcia przemiennego. Pierwszy problem związany jest z transformatorem znajdującym się na lokomotywie. Przekształtniki statyczne będące obciążeniem tego transformatora generują napięcia o prawie prostokątnej formie. Wewnętrzne sprzężenia między uzwojeniami tego transformatora powodują dodatkowe zniekształcenia tych napięć. Drugi problem dotyczy samego przekształtnika i częstotliwości jego przełączania. Linia zasilająca może zostać wzbudzona do oscylacji z częstotliwością przełączania przekształtnika statycznego i wygenerować przepięcia zdolne zniszczyć elementy lokomotywy lub linii zasilającej. Te dwa istotne elementy układu trakcyjnego muszą być specjalnie zabezpieczone przy projektowaniu przekształtnikowych napędów trakcyjnych zasilanych z sieci napięcia przemiennego.

Słowa kluczowe: przekształtnik trakcyjny AC, przekształtnik czerokwadrantowy, transformator, linia zasilająca AC

Abstract

The paper presents in a very short way selected problems which have to be considered during the dimensioning of the input circuit of AC supplied converter locomotive. The first problem is connected with the line transformer of the loco. The input converter operation principle generates rectangular voltages on secondary transformer side. Internal transformer couplings cause voltage form distortions. The second problem is connected with the converter and converter switching frequency. The supply line can oscillate with the converter switching frequency and generate overvoltage able to destroy elements of line and/or vehicles. The two selected important elements of the dimensioning have to be respected by developing of converter AC supplied traction drives.

Keywords: AC traction converter, 4-quadrant converter, transformer, AC supply line

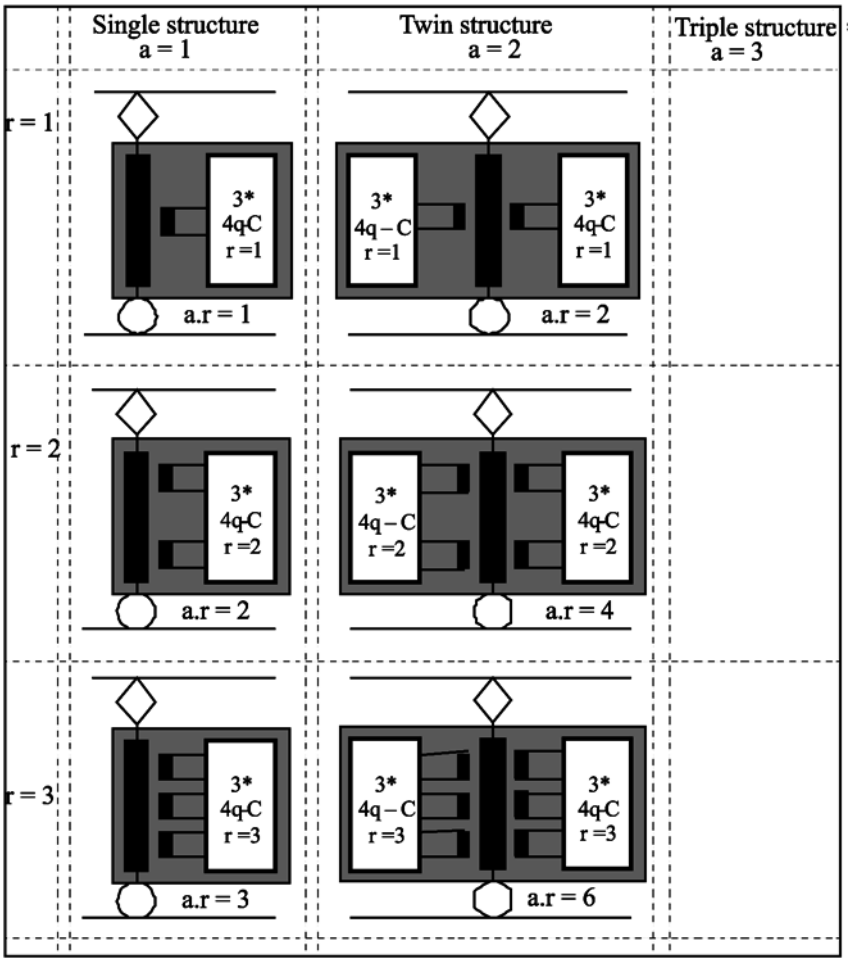
* Dr hab. inż. Grzegorz Skarpetowski, prof. PK, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Tam, gdzie zachodzi potrzeba podniesienia mocy napędowych układów trakcyjnych, obserwuje się wzrost zainteresowania dość już rozpowszechnionymi w Europie systemami wykorzystującymi znormowane europejskie zasilanie przemysłowe 25 kV, 50 Hz. Dotyczy to przede wszystkim właścicieli systemów wykorzystujących zasilanie 3 kV DC, którzy muszą w bliskiej przyszłości zdecydować o dalszym kierunku rozwoju ich trakcji elektrycznej. Porównywanie własności i osobliwości tych systemów zasilania nie jest łatwe i zawsze może być zrobione tendencyjnie. Autor nie zamierza więc dokonać ogólnego porównania tych systemów, aby uniknąć stronniczości, a jedynie pragnie podzielić się swoim wieloletnim doświadczeniem w tej dziedzinie. Artykuł ten poświęcony jest przedstawieniu dwóch zagadnień związanych z wymiarowaniem oraz modelowaniem obwodów wejściowych nowoczesnej lokomotywy przekształtnikowej. Obwód wejściowy takiej lokomotywy w zależności od mocy może składać się nawet z kilku układów przekształtnikowych połączonych równolegle i zasilanych ze wspólnego wielouzwojeniowego transformatora jednofazowego. Omówione zostaną problemy związane z wymiarowaniem tego transformatora oraz dopasowaniem przekształtnika wejściowego do własności linii zasilającej.

2. Obwód wejściowy lokomotywy przekształtnikowej AC

Typowe rozwiązania układowe obwodów wejściowych lokomotywy zasilanej z sieci napięcia przemiennego pokazane są na rys. 1. Rozróżnia się proste układy pojedyncze (*single structure*), złożone układy podwójne (*twin structure*) oraz układy potrójne (*triple structure*). Łatwe do odczytania są symbole przedstawiające uzwojenia transformatora wchodzącego w skład tych obwodów. Obciążeniem przekształtników przedstawionych w postaci bloku i oznaczonych symbolem 4q-C jest obwód pośredni zasilający trójfazowy przekształtnik trakcyjny z silnikami asynchronicznymi, które nie zostały pokazane na tym rysunku. Złożoność struktury obwodów wejściowych opisuje się symbolami „a” oraz „r”. O ile „a” przedstawia właściwie liczbę częściowo niezależnych układów napędowych zasilanych ze swoich oddzielnych obwodów pośrednich (odpowiadająca najczęściej liczbie wózków lokomotywy), o tyle „r” opisuje liczbę obwodów równoległych zasilających ten sam wózek, czyli liczbę uzwojeń transformatora trakcyjnego zasilających ten sam obwód pośredni. Ze specyfiki zasilania trakcyjnego wynika, że jest to transformator jednofazowy, ale wykonany z wieloma uzwojeniami wtórnymi. Na rys. 1 pokazano tylko uzwojenia zasilające przekształtnikowe układy trakcyjne, a pominięto dla zwiększenia przejrzystości rysunku inne uzwojenia, takie jak zasilenie napędów pomocniczych, zasilenia pokładowe i zasilenie szyny zbiorczej pociągu. Cechą charakterystyczną transformatorów trakcyjnych jest ich wielouzwojeniowość, co uniemożliwia zastosowanie znanego z literatury prostego schematu zastępczego ważnego dla transformatorów dwuuzwojeniowych [4].



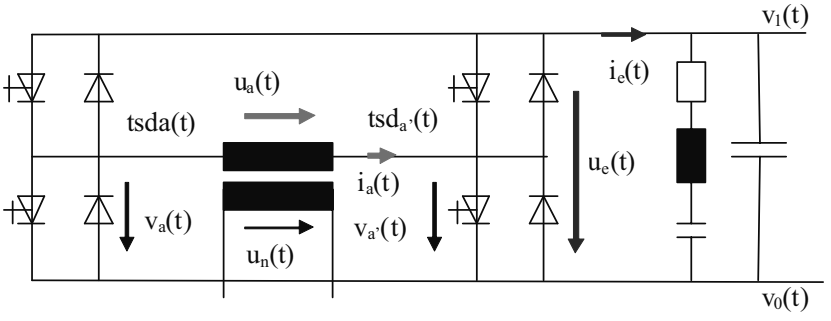
Rys. 1. Rozwiązania układowe obwodów wejściowych lokomotywy zasilanej z sieci AC

Fig. 1. Input circuit configuration of locomotives with AC supply

3. Warunki pracy transformatora trakcyjnego w lokomotywie przekształtnikowej

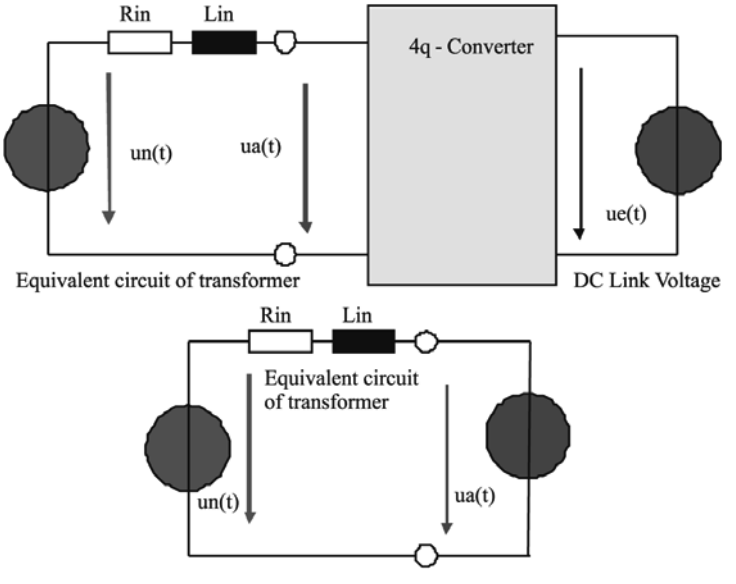
Transformator jest elementem łączącym linię zasilającą z przekształtnikiem statycznym znajdującym się w obwodzie wejściowym lokomotywy. Pełni on dwa podstawowe zadania: dopasowuje napięcie sieci do poziomu dopuszczalnego przekształtnika oraz wytwarza charakter impedancyjny wymagany do poprawnej pracy tego przekształtnika. Warunki pracy transformatora trakcyjnego w lokomotywie przekształtnikowej na uproszczonym przykładzie dwuuzwojeniowego transformatora jednofazowego przedstawione są na rys. 2.

Przyjmując znany z literatury schemat zastępczy dwuuzwojeniowego transformatora jednofazowego, przechodzi się do schematu zastępczego obwodu wejściowego lokomotywy podanego na rys. 3.



Rys. 2. Warunki pracy transformatora trakcyjnego w obwodzie przekształtnika czterokwadrantowego

Fig. 2. Operation conditions of transformer with 4-quadrant converter load



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu wejściowego z blokiem przekształtnika czerokwadrantowego

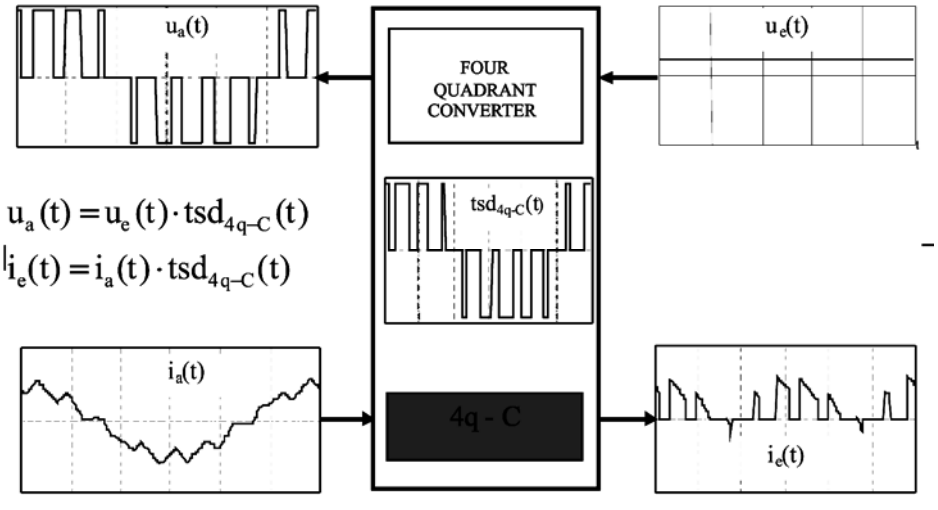
Fig. 3. Equivalent schema of input circuit with 4-quadrant converter box

Pominięcie prądu magnesującego transformatora umożliwia uproszczenie jego schematu zastępczego do elementów wzdłużnych zsumowanych do Rin oraz Lin. Napięcie $u_2(t)$ otrzymuje teraz oznaczenia un(t), a napięcie wytwarzane przez przekształtnik czterokwadrantowy jest oznaczone jako ua(t). Napięcie w obwodzie pośrednim wynosi ue(t).

Przekształtnik czterokwadrantowy działa na tej samej zasadzie co jednofazowy generator synchroniczny, z tą różnicą, że jest on jednofazowym statycznym generatorem napięcia odkształconego. Forma napięcia występującego na jego zaciskach odpowiada sposobowi sterowania stanów przewodzenia i stanów nieprzewodzenia jego zaworów [3]. Przekształtnik ten zamienia unipolarne napięcie obwodu pośredniego w napięcie przemienne, a prąd wywołany tym napięciem w pulsujący prąd unidirekcjonalny [1, 2].

Jeśli zająć się tylko harmoniczną podstawową napięcia przekształtnika, to można łatwo porównać jego pracę do przypadku obciążenia sieci za pomocą jednofazowej maszyny synchronicznej i w ten sposób analizować stany pracy układu. W zależności od wartości napięć un(t) i ua(t) można wywoływać różne stany obciążenia obwodu pokazanego po prawej stronie na rys. 3. Możliwy jest stan biegu jałowego, nazywany stanem synchronizacji. Jeśli podstawowe harmoniczne napięć un(t) i ua(t) mają tę samą amplitudę, częstotliwość i fazę, w obwodzie nie płynie prąd podstawowej harmonicznej. Płyną prądy wyższych harmonicznych, nazywane okładem prądowym, wywołane odkształconą formą napięcia przekształtnika [2]. Zmieniając amplitudę oraz fazę napięcia przekształtnika przez zmianę impulsów sterujących (napięcie sieci nie daje się tak łatwo zmieniać), można [1] wywoływać wszystkie znane stany współpracy dwóch źródeł napięcia przemiennego:

– stany wymiany mocy rzeczywistej,
– pobór energii z sieci, oddawanie energii do sieci,
– wymianę mocy biernej i wytwarzanie stanów kompensacji mocy biernej.



Rys. 4. Przekształtnik czterokwadrantowy jest statycznym generatorem napięcia przemiennego

Fig. 4. 4-quadrant converter as a static generator of alternating voltage

4. Wymiarowanie transformatora

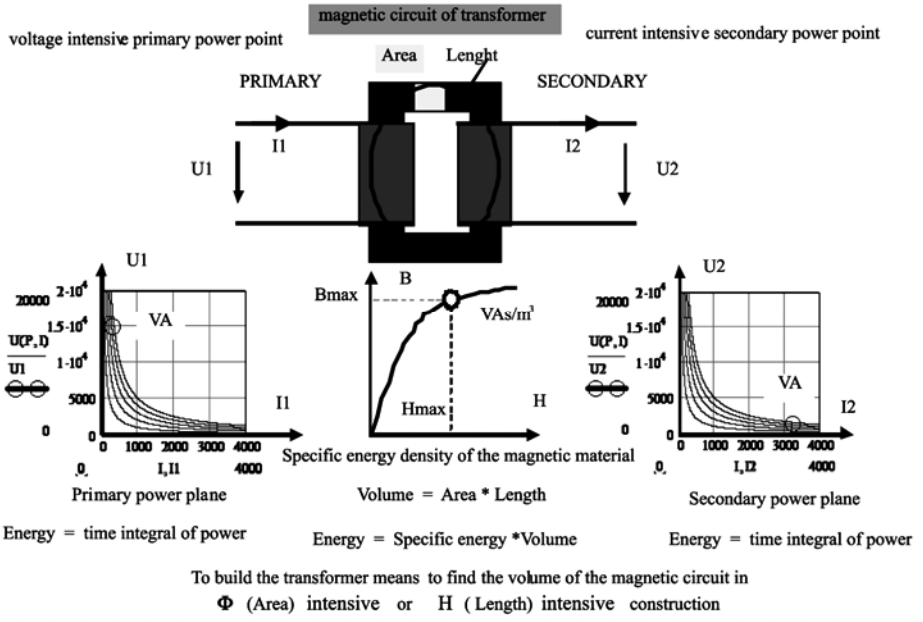
Wymiarowanie transformatora oznacza wstępnie wyznaczenie dwóch parametrów transformatora w oparciu o założenia dotyczące przenoszonej mocy oraz zakresu zmienności

napięcia sieci zasilającej. Są to przekładnia transformatora oraz indukcyjność zwarciowa Lin. Parametry te opisują wstępnie własności transformatora i stanowią podstawę jego konstrukcji. Szczegóły konstrukcyjne nie będą tu omawiane.

Na czym polega wymiarowanie transformatora, przedstawia rys. 5. Wychodząc z częstotliwości oraz mocy elektrycznej, która ma być przenoszona przez transformator po stronie pierwotnej lub wtórnej (należy wtedy uwzględnić sprawność), znajduje się energię, jaka ma być przenoszona przez obwód magnetyczny transformatora. Z danych materiału magnetycznego opisujących jego własności energetyczne (VAs/m^3) znajduje się objętość tego obwodu, wykonując go jako obwód z intensywnym strumieniem (Φ) lub jako obwód z intensywnym polem (H). To przesunięcie, stanowiące największą tajemnicę konstrukcji transformatorów, nabiera wyjątkowego znaczenia w przypadku transformatorów trakcyjnych. Ich specyfiką jest jednofazowość oraz wielouzwojeniowość. Konstrukcja takiego transformatora znacznie się komplikuje, a znana teoria transformatorów dwuuzwojeniowych nie jest w stanie opisać własności tego urządzenia.

Od lat poszukiwano modelu matematycznego wielouzwojeniowego transformatora trakcyjnego. Firmy zajmujące się budową lokomotyw prądu przemiennego dużych mocy muszą przeprowadzać obliczenia modelowe układów trakcyjnych po to, by wprowadzane rozwiązania nie były dziełem przypadku, ale efektem zamierzonego działania i spełniały wymagania stawiane przed rozwijanym układem napędowym.

W wyniku długoletnich badań wprowadzony został model takiego transformatora w postaci poligonu impedancji zastępczych [4], który przedstawiony zostanie w dalszej części tego artykułu.



Rys. 5. Wymiarowanie obwodu magnetycznego transformatora

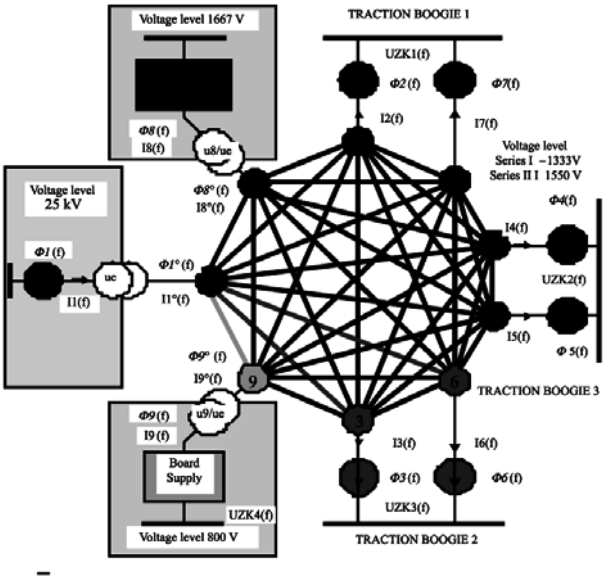
Fig. 5. Dimensioning of transformer magnetic circuit

5. Model transformatora wielouzwojeniowego

Identyfikacji parametrów zastępczych transformatora trakcyjnego dokonuje się w próbach zwarciowych transformatora. W artykule tym przedstawiony został schemat zastępczy transformatora 9-uzwojeniowego. Przeniesienie wniosków wynikających z tego przykładu na inną liczbę uzwojeń nie powinno stanowić dla czytającego ten artykuł żadnego problemu. Próby zwarcia przeprowadzane są metodą klasyczną. Liczba niezbędnych prób zwarcia PZ, potrzebnych do stworzenia schematu zastępczego transformatora „N" uzwojeniowego, opisana jest równaniem PZ = 0,5*(N*(N–1)). Zestaw impedancji zwarciowych transformatora musi być przeliczony w poligon impedancji zastępczych o takich właściwościach, że każda z impedancji zwarciowych oddzielnie jest odwzorowywana przez ten poligon.

Konieczność stosowania tej metody modelowania transformatorów trakcyjnych uwidaczniają przedstawione poniżej wyniki.

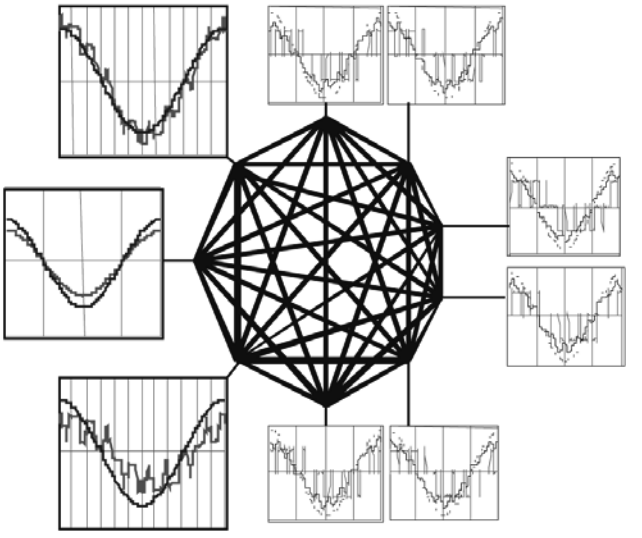
Rysunek 6 ukazuje złożoność układu wejściowego lokomotywy przekształtnikowej. Pokazany przykład dotyczy 6 MW lokomotywy zasilanej z sieci 25 kV 50 Hz. Transformator trakcyjny ma 9 uzwojeń jednofazowych. Strona pierwotna oznaczona jest numerem „1". Występuje 6 uzwojeń zasilających trakcyjne układy napędowe (nr 2 do7), jedno uzwojenie zasilające napędy pokładowe lokomotywy (nr 9) oraz jedno uzwojenie zasilające szynę zbiorczą pociągu (nr 8). Lokomotywa ma trzy niezależne układy napędowe, każdy zasilany z dwóch uzwojeń wtórnych w celu osiągnięcia wymagań dotyczących poziomu mocy lokomotywy.



Rys. 6. Schemat zastępczy obwodu wejściowego lokomotywy prądu przemiennego z 9-uzwojeniowym transformatorem trakcyjnym

Fig. 6. Input circuit equivalent schema of alternating current locomotive with 9 winding traction transformer

Uzwojenie pierwotne zasilone jest napięciem sinusoidalnym. Przekształtniki wymuszają na wtórnych uzwojeniach trakcyjnych bloki napięcia obciążającego. Sprzężenia wewnętrzne transformatora powodują, że napięcia na zaciskach uzwojeń „8" i „9" (rys. 6), zasilających napędy pomocnicze i szynę zbiorczą pociągu, są znacznie odkształcone, co dobrze widać na rys. 7.



Rys. 7. Przebiegi napięć i prądów w wielouzwojeniowym transformatorze trakcyjnym obciążonym przekształtnikami czterokwadrantowymi

Fig. 7. Voltages and currents of multi-winding traction transformer with 4-quadrant converter load

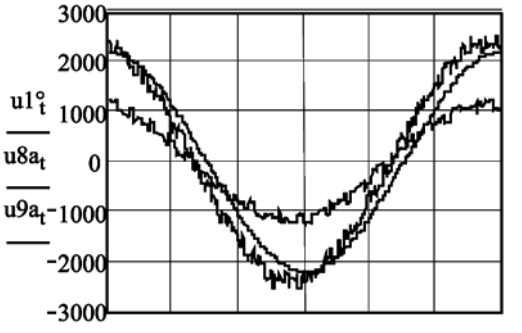
Wielokrotne, niskoczęstotliwościowe przejście poziomu zerowego przez te napięcia może nawet uniemożliwić zasilenie niektórych urządzeń stosowanych w trakcji. W transformatorze trakcyjnym należy uwzględniać sprzężenia wewnętrzne, by skutecznie ograniczyć ich wpływ na formę napięcia występującego na uzwojeniach wtórnych transformatora.

6. Wybrane problemy wymiarowania

Za niewątpliwie udaną można uznać konstrukcję transformatora, jeśli napięcia na uzwojeniach pomocniczych przyjmą formę pokazaną na rys. 8. Sprzężenia między uzwojeniami trakcyjnymi a uzwojeniami pomocniczymi wykazują symetrię powodującą jednoczesny wpływ wszystkich uzwojeń trakcyjnych na uzwojenia pomocnicze transformatora. Wynikiem tego jest obecność tylko tych harmonicznych, które stanowią największą wielokrotność częstotliwości przełączania przekształtników czterokwadrantowych.

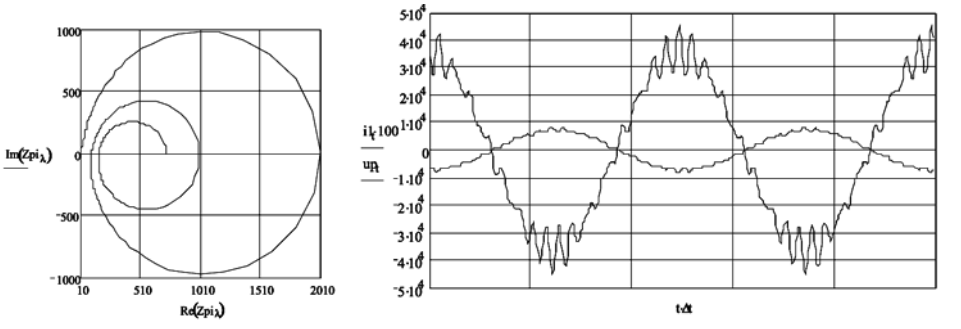
Na specjalną uwagę zasługuje oddziaływanie przekształtnika wejściowego lokomotywy przekształtnikowej na sieć trakcyjną. Skutkiem tego oddziaływania może być rezonans przekształtnika wejściowego lokomotywy z siecią zasilającą. Efekt taki pokazany został po

prawej stronie na rys. 9. Wskutek tego rezonansu dochodzi do deformacji napięcia zasilającego i znacznego podwyższenia wartości maksymalnej napięcia sieciowego, co często prowadzi do uszkodzeń instalacji sieciowych. Pokazane na rysunku przepięcia mogą pojawić się na przykład dopiero w stanie hamowania elektrycznego z oddawaniem energii do sieci. Prąd przekształtnika wejściowego znajduje się wtedy w przeciwfazie do napięcia na odbiorniku prądu.



Rys. 8. Napięcia na uzwojeniach pomocniczych transformatora trakcyjnego w przypadku udanej konstrukcji transformatora

Fig. 8. Voltages at auxiliary winding of transformer in the case of correct transformer construction



Rys. 9. Przykładowy przebieg impedancji linii zasilającej oraz rezonans między częstotliwością przełączania przekształtnika a linią zasilającą

Fig. 9. Example of supply line impedance and example of resonance effects between switching frequency of converter and line

Literatura

[1] Skarpetowski G., *Method of Controlling Electric Valves of a Converter*, US Patent Nr. 5,331,537, 1994.
[2] Skarpetowski G., *Production of Harmonics in Converter Traction Drives*, EPE Conf. 1995, Sevilla.
[3] Skarpetowski G., *Uogólniona teoria przekształtników statycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
[4] Skarpetowski G., *Use of the transformer polygon equivalent circuit in analysis of the input converter in AC traction drives*, EPE Conf. 1999, Lausanne.