

ZESZYTY NAUKOWE  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

---

SCIENTIFIC LETTERS  
OF RZESZOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---

NR 297  
(e-ISSN 2300-6358)

# ELEKTROTECHNIKA

Kwartalnik  
tom XXVI  
zeszyt 37 (nr 1/2018)  
styczeń-marzec



WYDZIAŁ  
ELEKTROTECHNIKI  
I INFORMATYKI  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Redaktor naczelny  
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej  
prof. dr hab. Grzegorz OSTASZ

Rada Naukowa  
prof. Lúboimir BEŇA (Słowacja), prof. Victor BOUSHER (Ukraina)  
prof. Stanisław GRZYBOWSKI (USA), prof. Michał KOLCUN (Słowacja)  
prof. Stefan KULIG (Niemcy), dr hab. Grzegorz MASŁOWSKI (Polska)  
prof. Stanisław PIRÓG (Polska), prof. Leszek TRYBUS (Polska)  
dr hab. Marian WYSOCKI (Polska)

Komitet Redakcyjny  
(afiliacja: Polska)

*redaktor naczelny*

prof. dr hab. inż. Lesław GOŁĘBIEWSKI

*redaktorzy tematyczni (naukowi)*

dr hab. inż. Adam BRAŃSKI, prof. PRz, dr hab. inż. Robert HANUS, prof. PRz,  
prof. dr hab. inż. Jacek KLUSKA, prof. dr hab. inż. Andrzej KOLEK,  
dr hab. inż. Mariusz KORKOSZ, prof. PRz, dr hab. inż. Stanisław PAWŁOWSKI, prof. PRz,  
dr hab. inż. Jerzy POTENCKI, prof. PRz, dr hab. inż. Zbigniew ŚWIDER, prof. PRz

*redaktor statystyczny*

dr inż. Wiesława MALSKA

*sekretarz redakcji*

dr inż. Robert ZIEMBA

*członkowie*

dr inż. Marek GOŁĘBIEWSKI, dr inż. Maciej KUSY  
dr inż. Mariusz MAĆZKA, dr inż. Dominik STRZAŁKA  
dr inż. Bartosz TRYBUS

Redaktor językowy  
Piotr CZERWIŃSKI

Przygotowanie matryc  
Robert ZIEMBA

e-ISSN 2300-6358

p-ISSN 0209-2662

Wersja drukowana Zeszytu jest wersją pierwotną.

Redakcja czasopisma: Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki,  
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów (e-mail: ziemba@prz.edu.pl)  
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika>

Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów (e-mail:oficyna@prz.edu.pl)  
<http://oficyna.prz.edu.pl>

Informacje dodatkowe – str. 63

## SPIS TREŚCI

Kamil FILIK, Grzegorz MASŁOWSKI: Analiza zaburzeń piorunowych indukowanych w modelu wiązki kablowej statku powietrznego .....	5
Robert ŻELAZNY: Harmoniczne prądu w liniach i urządzeniach elektrycznych zasilających odbiorców kolejowych .....	25
Robert ŻELAZNY: Jakość energii elektrycznej w liniach zasilających odbiorniki PKP PLK S.A.....	37
Kamil KOŁODZIEJ: Analiza ograniczania wyższych harmonicznym nieliniowych odbiorników przy wykorzystaniu filtra aktywnego .....	49



**Kamil FILIK<sup>1</sup>**  
**Grzegorz MASŁOWSKI<sup>2</sup>**

## **ANALIZA ZABURZEŃ PIORUNOWYCH INDUKOWANYCH W MODELU WIĄZKI KABLOWEJ STATKU POWIETRZNEGO**

W artykule dokonano analizy zaburzeń pochodzenia piorunowego, indukowanych w odcinku modelowej wiązki kablowej, ułożonej nad płaszczyzną metalową, w oparciu o przedstawione wyniki badań eksperymentalnych oraz komputerowych. Do przygotowania układu fizycznego użyto typowych lotniczych przewodów i oplotu ekranującego. Badania przeprowadzono dla wybranych wartości obciążenia linii oraz przy kilku sposobach uziemienia ekranu otaczającego wybrane przewody. W nieekranowanej linii tej samej wiązki wymuszano przepływ prądu udarowego. Zarejestrowano przebiegi czasowe napięć i prądów w określonych punktach systemu, będące efektem obecności zaburzenia piorunowego oraz sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych pomiędzy przewodami. Wyniki badań eksperymentalnych były podstawą do weryfikacji rezultatów symulacji komputerowej wykonanej w pakiecie oprogramowania CST Studio Suite 2017. Na bazie przygotowanej struktury trójwymiarowej badanego układu program umożliwił uzyskanie obwodowego modelu linii transmisyjnej, użytego w późniejszych obliczeniach w dziedzinie czasowej. Badania wykazały zależność konfiguracji obciążenia linii i sposobu jej ekranowania na kształt i wartość szczytową obserwowanych przepięć w układzie. Rezultaty obliczeń komputerowych charakteryzowały się dobrą zgodnością z wynikami eksperymentalnymi. Różnice wynikały między innymi ze stopnia dokładności odzwierciedlenia struktury 3D modelu fizycznego, sposobu zdefiniowania prądu wymuszającego oraz parametrów samej symulacji komputerowej.

**Słowa kluczowe:** przepięcia atmosferyczne, wieloprzewodowa linia transmisyjna, sprzężenia elektromagnetyczne, ekranowanie przewodów, badania eksperymentalne i komputerowe.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Kamil Filik, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651298, kfilik@prz.edu.pl,

<sup>2</sup> Grzegorz Masłowski, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651253, maslowski@prz.edu.pl.

## 1. Wstęp

W wyniku wyładowania atmosferycznego może dojść do bezpośredniego przepływu prądu przez elementy konstrukcyjne statku powietrznego, który znalazł się w bezpośrednim kontakcie z kanałem pioruna lub do wnikania w głębię płatowca zmiennego pola elektromagnetycznego, które powstało przez pobliskie wyładowanie atmosferyczne. Oba zjawiska mogą być źródłem groźnych sygnałów prądowych i napięciowych indukowanych w systemach pokładowych statków powietrznych [1]. Ich poziom i kształt zależy od wielu czynników. Jedną z dróg propagacji tego typu przepięć są sprzężenia indukcyjne i pojemnościowe pomiędzy przewodami ułożonymi w wiązkach i leżącymi blisko siebie oraz między nimi a elementami konstrukcyjnymi.

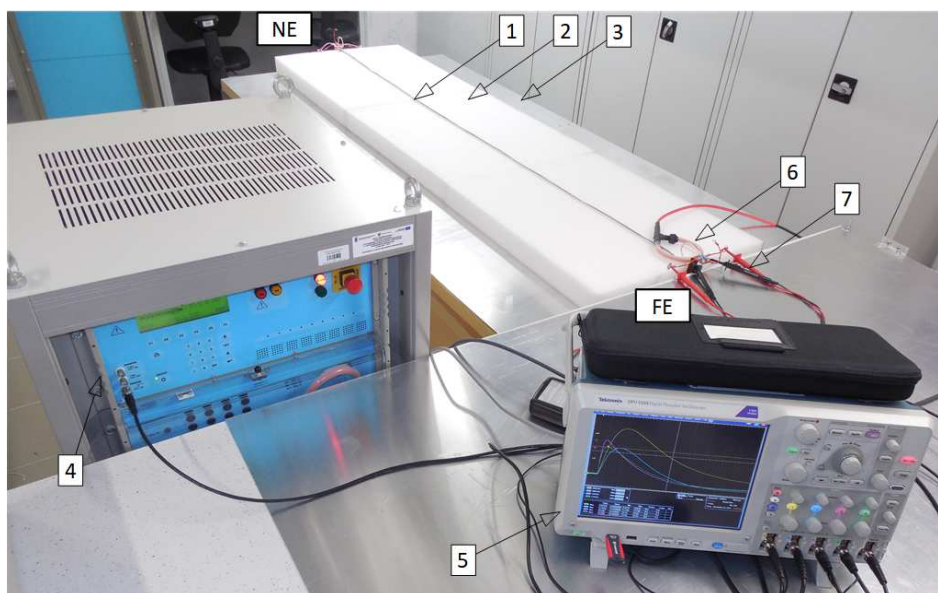
Przedstawione badania są kontynuacją prac prowadzonych od kilku lat w Laboratorium przepięciowych badań awioniki Politechniki Rzeszowskiej. Dotyczą one szczególnie zagadnienia efektów pośrednich wyładowań atmosferycznych w statkach powietrznych [2]. Unikalne wyposażenie laboratorium, pozwala na odwzorowanie w warunkach laboratoryjnych zaburzeń, jakie docierają do układów elektrycznych i elektronicznych awioniki. Są nimi między innymi czasowe sygnały prądowe i napięciowe o określonym charakterze zmian, przyjętym na podstawie rzeczywistych rejestracji.

Sytuację propagacji przepięć w wiązce kablowej samolotu, kiedy w jednym z jej przewodów popłynął prąd o znacznej wartości i impulsowym charakterze odwzorowano podczas eksperymentalnych i symulacyjnych badań. Przygotowano model linii zbudowanej z trzech przewodów lotniczych ułożonych nad metalową płaszczyzną. Badania przeprowadzono dla różnych wartości rezystancji obciążenia dwóch linii na obu jej końcach oraz przy kilku wariantach uziemienia ekranu otaczającego te przewody, traktowane jako sygnałowe. Jako źródło zaburzenia w trakcie prób eksperymentalnych wybrano generator pojedynczych impulsów prądowych, który wymuszał przepływ udarowego prądu w trzecim, nieekranowanym przewodzie.

Rejestrowane przebiegi napięciowe i prądowe o spodziewanym charakterze były odniesieniem dla rezultatów uzyskanych w badaniach komputerowych, wykonanych przy użyciu pakietu CST Studio Suite 2017. Porównanie wyników pozwoliło na ocenę używanego od niedawna oprogramowania w zastosowaniach do tego typu zagadnień. Poznanie nowego narzędzia komputerowego i nauka poprawnego modelowania w nim efektów wtórnych od wyładowań atmosferycznych były pośrednim celem pracy.

## 2. Układ probierczo-pomiarowy

Badanie eksperymentalne propagacji przepięć w wieloprzewodowej linii wykonano na stanowisku probierczo-pomiarowym zaprezentowanym na rys. 1.

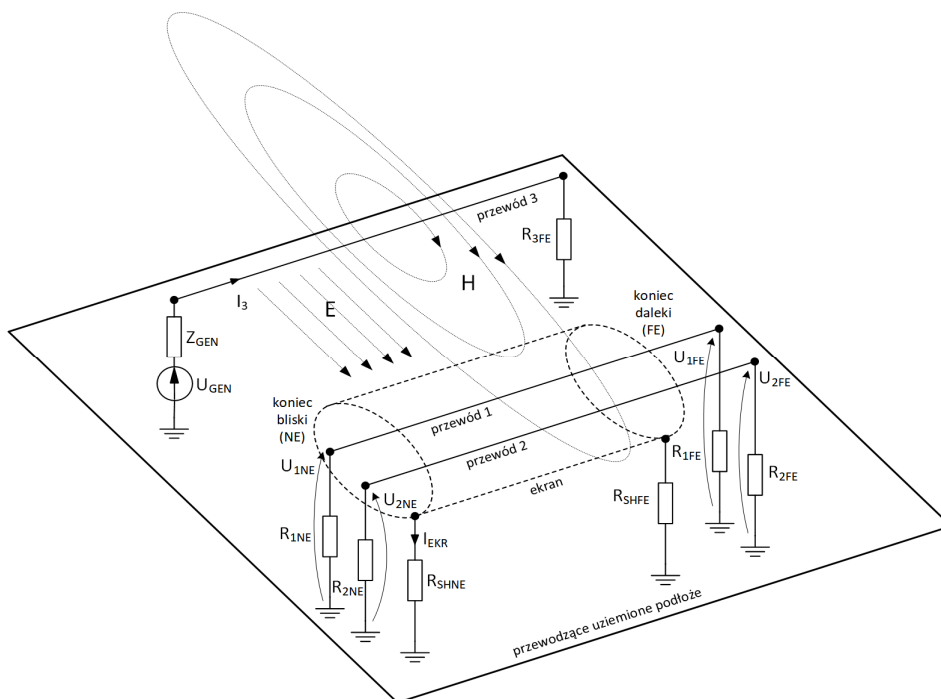


Rys. 1. Widok układu probierczo-pomiarowego: 1 – badana wiązka przewodów, 2 - podkładka izolująca, 3 - uziemiona aluminiowa płyta, 4 - modułowy generator impulsów, 5 - oscyloskop cyfrowy, 6 - sonda prądowa Rogowskiego, 7 - różnicowa sonda wysokonapięciowa

Fig. 1. View of test-measurement system: 1 – tested cable bundle, 2 - insulating pad, 3 - grounded aluminum plate, 4 - modular impulse generator, 5 - digital oscilloscope, 6 - Rogowski current probe, 7 - high voltage differential probe

Modelową wiązkę (1) tworzyły trzy przewody LYc-L miedziane ocynowane, w izolacji z polwinitu ciepłoodpornego, o napięciu pracy do 600 V oznaczone jako „1”, „2” oraz „3”. Przewody „1” i „2” – o powierzchni przekroju żył 0,35 mm<sup>2</sup> i grubości izolacji 0,6 mm, otoczone plecionką miedzianą ocynowaną o powierzchni przekroju 3,4 mm<sup>2</sup> (24 włókna o średnicy 0,15 mm, po 8 w grupie i kącie nachylenia 15°) traktowano jako sygnałowe. Wzdłuż nich ułożono przewód trzeci „3” o powierzchni przekroju żyły 1,5 mm<sup>2</sup> i grubości izolacji 0,7 mm. W modelu odzwierciedlał on przewód zasilający, w którym w wyniku wyładowania atmosferycznego popłynął prąd udarowy. Dwumetrowy odcinek przygotowanej linii ułożono nad aluminiowym arkuszem blachy (3) o szerokości 1 m i długości 2 m, wzdłuż jego dłuższej osi symetrii. Płaszczyznę metalową połączono z szyną uziemiającą PE. Dla zachowania równoległości wiązki w stosunku do aluminiowej płyty zastosowano podkładkę (2) z pianki polietylenowej o grubości 66 mm i szerokości 0,56 m. Przeciwnie końce wiązki kablowej nazwano NE (od ang. *near end*) oraz FE (od ang. *far end*). Generator pojedynczych udarów MIG0618SS (4), dedykowany do badań odporności awioniki na indukowane

przebiegi pochodzenia atmosferycznego, daje możliwość tworzenia powtarzalnych pod względem kształtu i poziomu impulsów. Dzięki temu generując za każdym razem ten sam udar powtarzano pomiar dla każdej konfiguracji obciążeń badanej linii i sposobu uziemienia ekranu. Tak samo, ze względu na ograniczoną ilość kanałów pomiarowych, postępowano w celu rejestracji oscyloskopem cyfrowym (5) przebiegów prądowych w przewodzie „3” i ekranie oraz napięciowych na końcach linii, zmieniając lokalizację sond prądowych (6) i napięciowych (7). Oba końce przewodu „3” podłączono do zacisków wyjściowych generatora. Kształt i poziom uzyskanego udaru prądowego wynikał z wybranych nastaw generatora oraz wypadkowej impedancji w jego obwodzie wyjściowym. Wybrano ustawienia zapewniające maksymalny poziom wartości szczytowej impulsu oraz najkrótszy czas jego narastania. Przy takich założeniach uzyskiwano udar prądowy o wartości maksymalnej 1,96 kA i czasie narastania czoła do 28  $\mu$ s. Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat badanego układu.



Rys. 2. Uproszczony schemat badanego układu

Fig. 2. Simplified diagram of the test system

Jako obciążenia przewodów sygnałowych zastosowano rezystory metalizowane, które poprzez połączenia skręcane podłączono między poszczególne końce przewodów i uziemioną płytę (rys. 2). Aby ułatwić montaż na



wysokości ułożenia wiązki dodano dodatkowe płaskowniki miedziane przymocowane prostopadle do płyty aluminiowej po stronie NE i FE. W celu uziemienia oplotu ekranującego zastosowano także połączenia skręcane końców ekranu bezpośrednio lub poprzez rezystor drutowy w obudowie ceramicznej do tych płaskowników. Wartości oporności rezystorów pokazanych na rys. 2 dla wszystkich wariantów pomiarowych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości rezystancji rezystorów przedstawionych na rys. 2 w zależności od konfiguracji obciążenia linii i uziemienia oplotu ekranującego

Table 1. The resistance values of resistors shown in Fig. 2 depending on the configuration of load of lines and grounding of braided shield

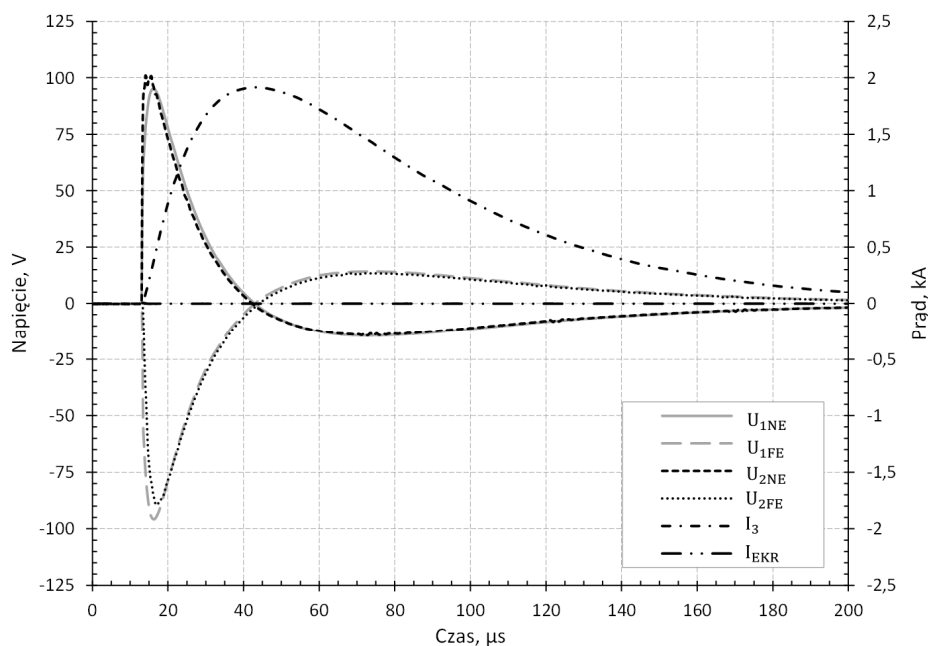
Wariant	R <sub>1NE</sub> [Ω]	R <sub>1FE</sub> [Ω]	R <sub>2NE</sub> [Ω]	R <sub>2FE</sub> [Ω]	R <sub>SHNE</sub> [mΩ]	R <sub>SHFE</sub> [mΩ]	Komentarz
AG	68,8	68,4	8,27 k	8,38 k	∞	∞	obciążenia linii jednakowe po obu stronach, ekran nieuziemiony
BE	68,8	68,4	67,3	68,8	1	∞	takie same obciążenia każdej linii, ekran uziemiony po stronie NE
BF	68,8	68,4	67,3	8,38 k	1	∞	niesymetria obciążenia przewodu „2” na obu końcach, ekran uziemiony po stronie NE
BG	68,8	68,4	8,27 k	8,38 k	1	∞	obciążenia linii jednakowe po obu stronach, ekran uziemiony po stronie NE
CE	68,8	68,4	67,3	68,8	1	678	takie same obciążenia każdej linii, podwyższona rezystancja uziemienia strony FE ekranu
CG	68,8	68,4	8,27 k	8,38 k	1	678	obciążenia linii jednakowe po obu stronach, podwyższona rezystancja uziemienia strony FE ekranu
DE	68,8	68,4	67,3	68,8	1	1	takie same obciążenia każdej linii, ekran obustronnie uziemiony
DG	68,8	68,4	8,27 k	8,38 k	1	1	obciążenia linii jednakowe po obu stronach, ekran obustronnie uziemiony

Impedancję zastosowanych rezystorów analizowano przed rozpoczęciem prób mostkiem LCR w zakresie od 0 Hz do 10 MHz. Zmierzone wartości impedancji dla częstotliwości do 1 MHz nie zmieniały się znacząco, natomiast powyżej obserwowano wpływ pasożytniczych pojemności i indukcyjności. Dla zastosowanego w próbach impulsu prądowego o czasie narastania około 28 μs wybrane rezystory modelowano w symulacjach komputerowych tylko poprzez ich rezystancje. Właściwe pomiary wykonano dla czterech różnych wariantów uziemienia ekranu otaczającego przewody „1” i „2” przy tej samej konfiguracji obciążeń tych przewodów po obu stronach linii.

Dodatkowo dla wybranych sposobów uziemienia końców ekranu zmieniano wartości rezystancji obciążenia. Łącznie badania przy tym samym udarze prądowym wygenerowanym w przewodzie „3” przeprowadzono zgodnie z tabelą 1 dla ośmiu przypadków.

### 3. Analiza wyników badań eksperymentalnych

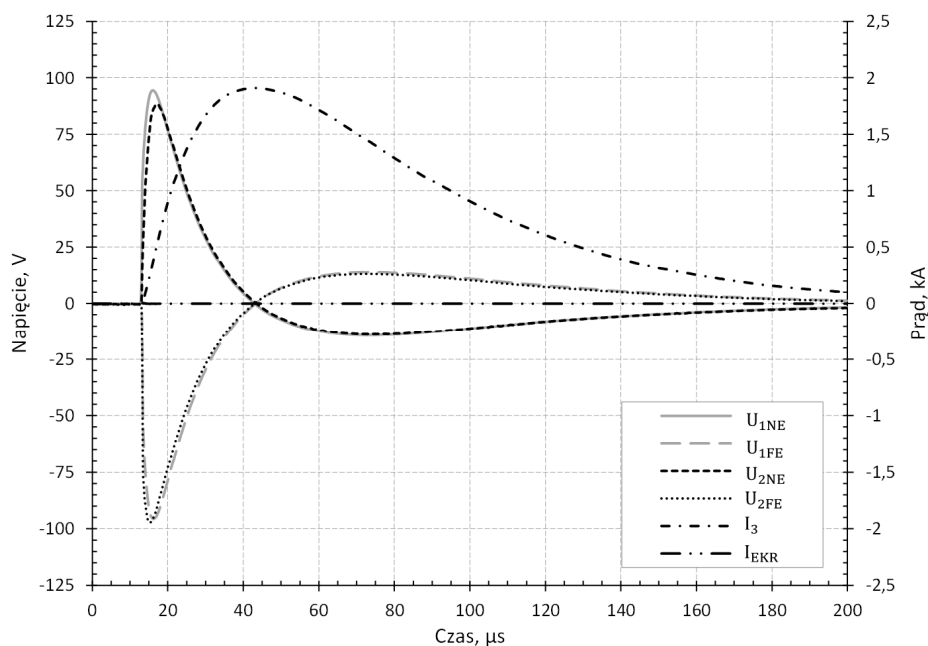
Na rys. 3 przedstawiono wyniki pomiarów dla wariantu AG, w którym zmierzono napięcia na obu końcach przewodów „1” ( $U_{1NE}$ ,  $U_{1FE}$ ) oraz „2” ( $U_{2NE}$ ,  $U_{2FE}$ ), a także prądy płynące w przewodzie „3” ( $I_3$ ) i oplocie ekranującym ( $I_{EKR}$ ).



Rys. 3. Wyniki pomiaru napięć i prądów w układzie dla wariantu AG

Fig. 3. Measurement results of voltages and currents for AG configuration

W ogólnym przypadku napięcia indukowane w przewodach są efektem sprzężeń magnetycznych i elektrycznych. Przy zadanym udarze prądowym z generatora zarejestrowane przepięcia osiągnęły wartość szczytową bliską 100 V. Ich kształt na końcach przewodów sygnałowych po tej samej stronie nie różnił się znacznie. Redukcja sprzężeń pojemnościowych dokonana poprzez uziemienie jednego z końców oplotu ekranującego widoczna jest na przebiegach pokazanych na rys. 4.



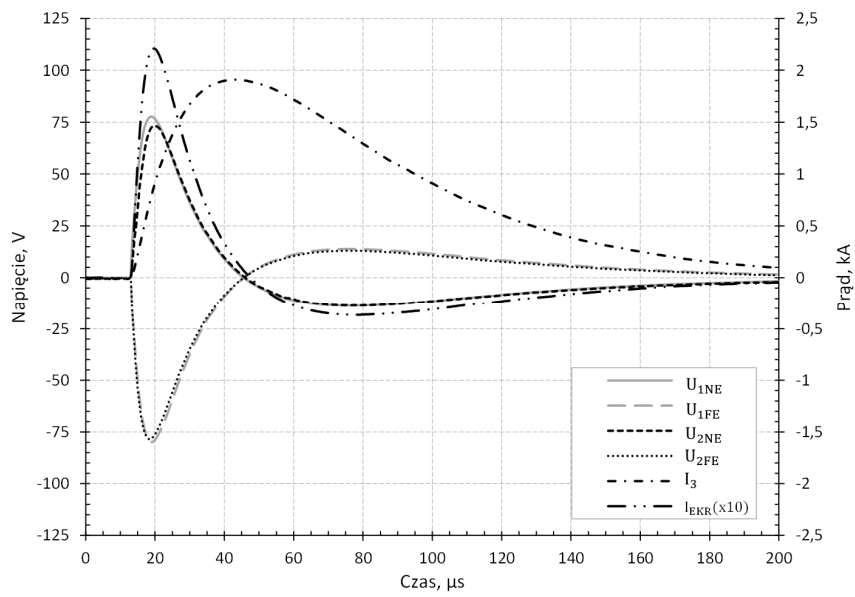
Rys. 4. Wyniki pomiaru napięć i prądów w układzie dla wariantu BG

Fig. 4. Measurement results of voltages and currents for BG configuration

W porównaniu z wcześniejszym przypadkiem zmniejszyły się wartości szczytowe obserwowanych napięć. Wprowadzone uziemienie miało szczególnie wpływ na poziom napięć na końcach przewodu „2”. Przypadek obustronnego uziemienia oplotu ekranującego przewody sygnałowe, kiedy po stronie FE występuje zwiększona do  $678 \text{ m}\Omega$  rezystancja połączenia z płaszczyzną masy, przedstawiono na rys. 5. Prąd płynący w ekranie w wyniku zamknięcia obwodu przez dołączenie drugiego końca oplotu poprzez rezystor do masy spowodował redukcję wartości maksymalnych indukowanych przepięć o 25 % oraz dwukrotny wzrost czasu narastania sygnału w stosunku do wariantu z nieuziemionym ekranem.

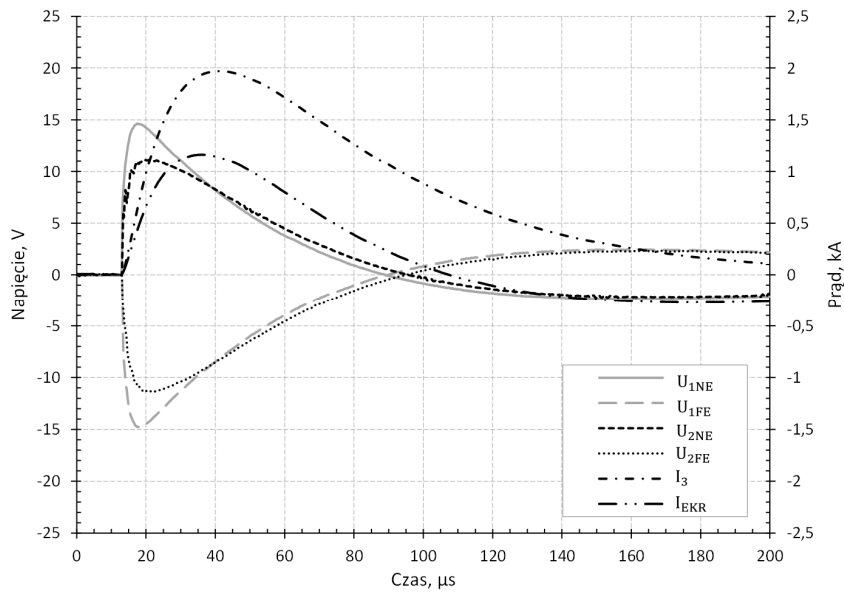
Istotnym parametrem wpływającym na ograniczenie przepięć indukowanych w osłoniętych ekranem przewodach jest wartość impedancji wypadkowej w obwodzie ekran-masa. Rys. 6 przedstawia zarejestrowane sygnały dla przypadku prawidłowego połączenia końców oplotu z metalową płytą.

Poziomy rejestrowanych przepięć znacznie zmniejszyły się w porównaniu do przypadku obustronnego odłączenia oplotu od masy. Wskutek różnych wartości rezystancji obciążających każdą linię obserwowano różnice w kształcie i wartości szczytowej pomiędzy napięciami przewodów „1” i „2”.



Rys. 5. Wyniki pomiaru napięć i prądów w układzie dla wariantu CG

Fig. 5. Measurement results of voltages and currents for CG configuration



Rys. 6. Wyniki pomiaru napięć i prądów w układzie dla wariantu DG

Fig. 6. Measurement results of voltages and currents for DG configuration

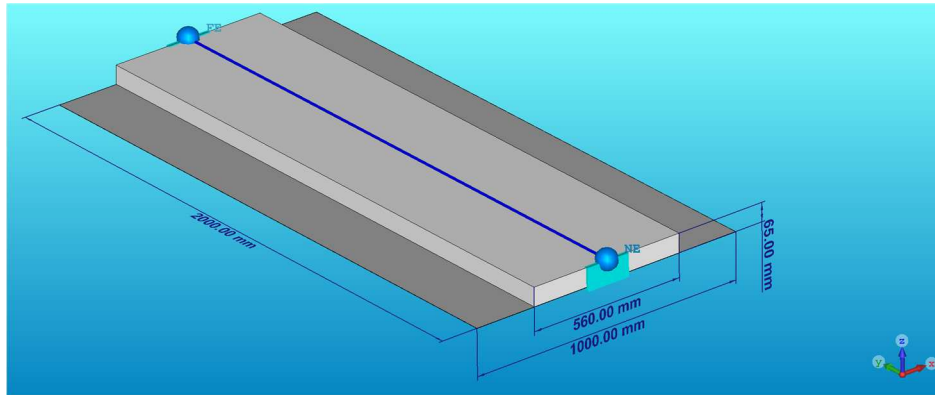
Występowanie napięcia na końcach przewodów oraz różnice w ich kształcie można tłumaczyć kilkoma powodami. Pierwszy z nich wynika ze sposobu wykonania oplotu. Skuteczność jego ekranowania maleje ze wzrostem częstotliwości i zależy od stopnia pokrycia powierzchni otaczającej przewody ze względu na istniejące przerwy pomiędzy włóknami plecionki [3]. Drugim powodem jest wypadkowa rezystancja w obwodzie ekran-płaszczyzna masy, która wpływa na dolną częstotliwość graniczną charakterystyki ekranowania magnetycznego. Przy mniejszych wartościach rezystancji występuje skuteczniejsze tłumienie zewnętrznych zaburzeń o niższych częstotliwościach [3]. Kolejną przyczyną może być różnica napięć pomiędzy lokalnymi punktami masy w końcach NE i FE, wynikająca ze spadku napięcia wzdłuż płyty przy przepływie prądu, równego płynącemu w ekranie. Innym powodem może być samo ułożenie przewodów „1” i „2” wewnątrz ekranującego oplotu oraz efekt odsłonięcia ich odcinków na końcach wiązki w celu połączenia z rezystorami (ang. *pigtail effect*) [4]. Sytuacje wzrostu napięcia wzdłuż drogi przepływu prądu piorunowego przez przewodzące elementy, jak aluminiowe poszycie, obserwuje się w rzeczywistości w statkach powietrznych. Dlatego przy planowaniu wykorzystania przewodzących elementów płatowca jako obwodu powrotnego lub płaszczyzny uziemienia należy wziąć pod uwagę wiele czynników [5].

#### 4. Model komputerowy badanego układu

Badania symulacyjne dla opisanych wcześniej doświadczeń przeprowadzono przy użyciu pakietu CST Studio Suite 2017 [6]. Ich wyniki odniesiono do rezultatów eksperymentalnych. Pośrednim ich celem było poznanie podstawowych możliwości nowego oprogramowania, sposobu tworzenia w nim modelu badanego układu, konfigurowania parametrów symulacji oraz ocena jego przydatności w zakresie prowadzonych prac badawczych. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem interfejsu CST Cable Studio, ułatwiającego analizę sygnałów w rozbudowanych wiązkach przewodów. Wśród wielu funkcji oprogramowanie umożliwia między innymi przejście z modelu trójwymiarowego analizowanego układu do jego reprezentacji obwodowej, a następnie wykonanie obliczeń w dziedzinie czasu bądź częstotliwości.

Na wstępie w oparciu o układ fizyczny przygotowano model 3D najbliższego otoczenia, w jakim znajduje się badana wiązka przewodów (rys. 7), pomijając elementy odległe i mniej istotne. Zdefiniowano wymiary i parametry materiałowe płyty aluminiowej i znajdującej się na niej warstwy izolacji z pianki PE. Następnie zadeklarowano położenie punktów końcowych grupy przewodów (nazwano je NE i FE, na rys. 7 oznaczone niebieskimi kulami), definiując w ten sposób trasę ułożenia wiązki w przestrzeni. W programie istnieje możliwość przypisania ułożenia grupy kabli wzdłuż krzywej rysowanej odrębnie lub opisanej analitycznie. Do biblioteki programu wprowadzono typy przewodów wiązki,

podając parametry geometryczne ich przekrojów oraz dane materiałowe żył i izolacji.

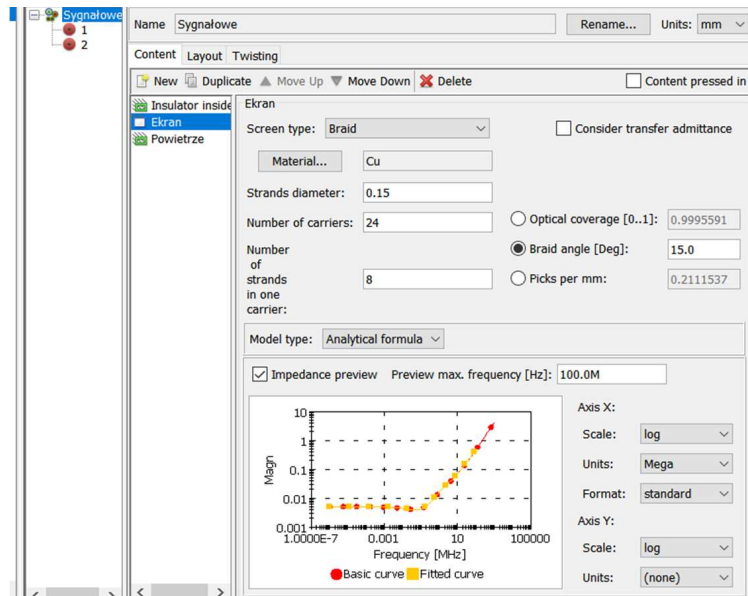


Rys. 7. Model 3D uwzględnionego otoczenia wiązki z zaznaczonym jej ułożeniem

Fig. 7. 3D model of considered environment of the cable bundle with marked route of the line

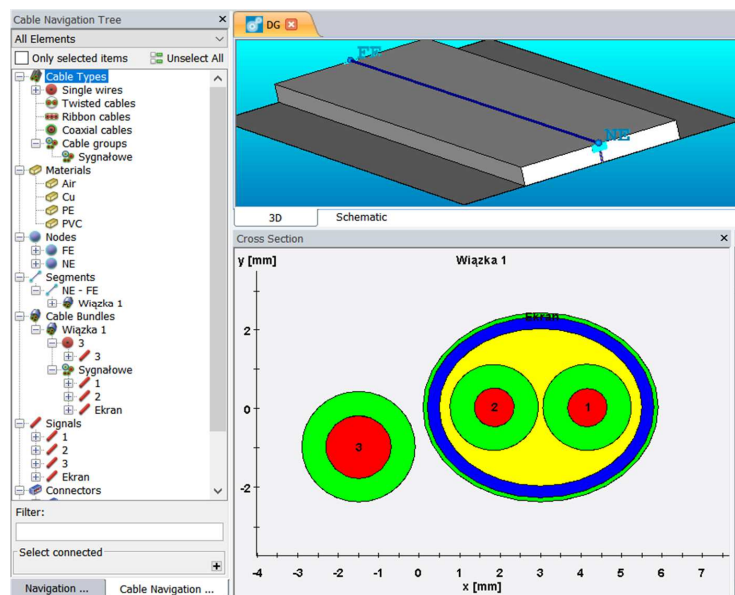
Następnie zdefiniowano grupę przewodów, nazwaną jako „Sygnałowe”, dla których uwzględniono: rodzaje przewodów i ich wzajemne usytuowanie, sposób skręcenia i ekranowania, rodzaj powłoki zewnętrznej i wypełnienie całej grupy. Przykładowe okno konfiguracyjne dla grupy przewodów przedstawiono na rys. 8, według którego przewody „1” i „2” umieszczono wewnątrz oplotu ekranującego, a izolacja powietrzna wypełniała wolną przestrzeń wewnątrz i na zewnątrz oplotu. Dodatkowo na rys. 8 wyświetlana jest charakterystyka impedancji transferowej ekranu, tworzona na podstawie wzorów analitycznych [7] lub obliczeń z użyciem wbudowanego kalkulatora. Odzwierciedla ona skuteczność ekranowania oplotu w zależności do częstotliwości zmian zewnętrznego pola magnetycznego. Przygotowana w programie wiązka nazwana „Wiązka 1” składała się grupy przewodów „Sygnałowe” oraz przewodu „3”, które ustawiono względem siebie jak na rys. 9.

Następnie końce przewodów oraz ekranu po stronach NE i FE otrzymały przypisanie do umownych nazw złączy i ich terminali na potrzeby późniejszej analizy obwodowej. Dla tak przygotowanego modelu trójwymiarowego wybrano metodę obliczeniową opartą na teorii linii długiej. Po zaznaczeniu jakie przewody w wiązce mają być brane pod uwagę i jaki maksymalny dystans między przewodami będzie uwzględniany przy ich sprzężeniach, cała wiązka podzielono na skończoną liczbę prostych segmentów. Program uwzględnił wpływ metalowych obiektów w sąsiedztwie przewodów, definiując ostatecznie przekrój każdego segmentu. Obliczono parametry jednostkowe linii długiej ( $R'$ ,  $L'$ ,  $C'$ ,  $G'$ ) za pomocą statycznego modułu 2D. Ostatecznie utworzono model sekcyjny linii



Rys. 8. Okno konfiguracyjne grupy przewodów. Parametry oplotu ekranującego

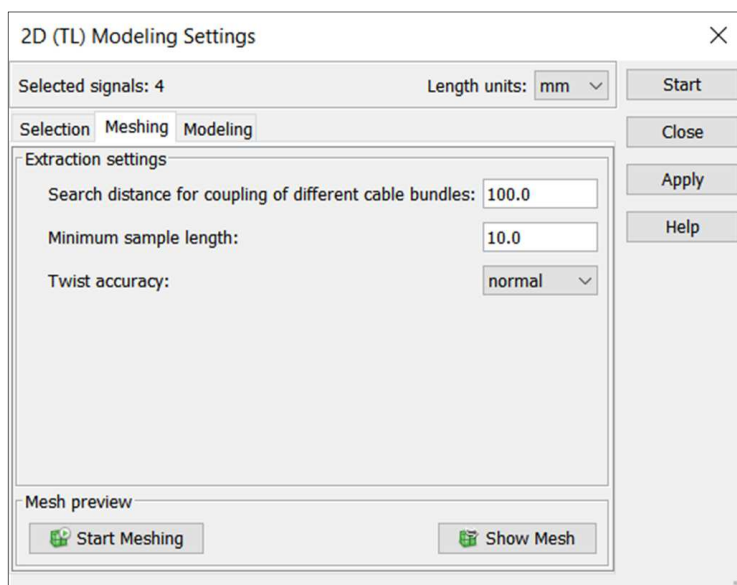
Fig. 8. Setup window for cable group. Braided shield properties



Rys. 9. Okno programu z widocznym przekrojem wiązki

Fig. 9. Program window with visible cross section of the cable bundle

uwzględniający efekt naskórkowy oraz straty dielektryczne, słuszny w tym przypadku dla częstotliwości poniżej 100 MHz (rys. 10).



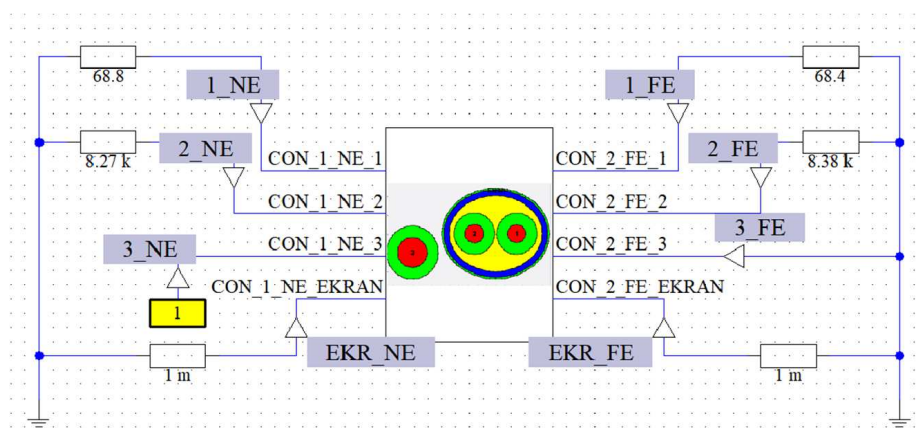
Rys. 10. Okno ustawień modelowania obwodowego wiązki przewodów

Fig. 10. Window of equivalent circuit modeling settings

Model ten następnie zaimportowano do wbudowanego symulatora obwodowego działającego w dziedzinie czasu i częstotliwości. W symulatorze [6] istnieje także możliwość eksportowania uzyskanego modelu do zewnętrznego programu z rodziny PSpice. Gotowy schemat obwodowy dla przypadku DG (symetryczne obciążenie każdej linii na obu końcach, ekran obustronnie uziemiony) przedstawiono na rys. 11. Wiązkę przewodów i jej otoczenie w postaci płyty metalowej, reprezentuje automatycznie utworzony blok o ośmiu zaciskach, których nazwy odpowiadają poprzednio zdefiniowanym określeniom złącz i ich terminali, które przypisano do końców zadanej w 3D linii obciążanej zestawionymi w tabeli 1 rezystorami. W trakcie symulacji porównywano wpływ uwzględnienia ich paraszytnych pojemności i indukcyjności na wyniki obliczeń. Wartości parametrów dla każdego rezystora uzyskano z opisanego w p. 2 pomiaru mostkiem LCR. Do wprowadzenia zaburzenia w postaci udaru prądowego wykorzystano możliwość, jaką daje blok typu zacisk zewnętrzny, oznaczony na rys. 11 w postaci prostokąta z cyfrą 1 (numer zacisku). Można poprzez niego modelować zewnętrzne źródła lub obciążenia, wskazując charakter zmian jego napięcia lub prądu oraz impedancji. Blok ten połączono z zaciskiem końcowym przewodu „3” po stronie NE.



Drugi, ukryty jego zacisk połączono z umowną masą odniesienia. Istnieje możliwość zdefiniowania na wiele sposobów impedancji wewnętrznej tego bloku (widzianej pomiędzy jego zaciskami), charakteryzującej zachowanie zewnętrznego układu. W analizowanym przypadku pozostawiono ją jako nieskończoną. Na przedstawionym schemacie w odpowiednich punktach umieszczono sondy (symbol trójkąta), aby umożliwić wyświetlenie właściwych sygnałów napięciowych i prądowych.



Rys. 11. Model obwodowy analizowanego układu dla konfiguracji pomiarowej DG

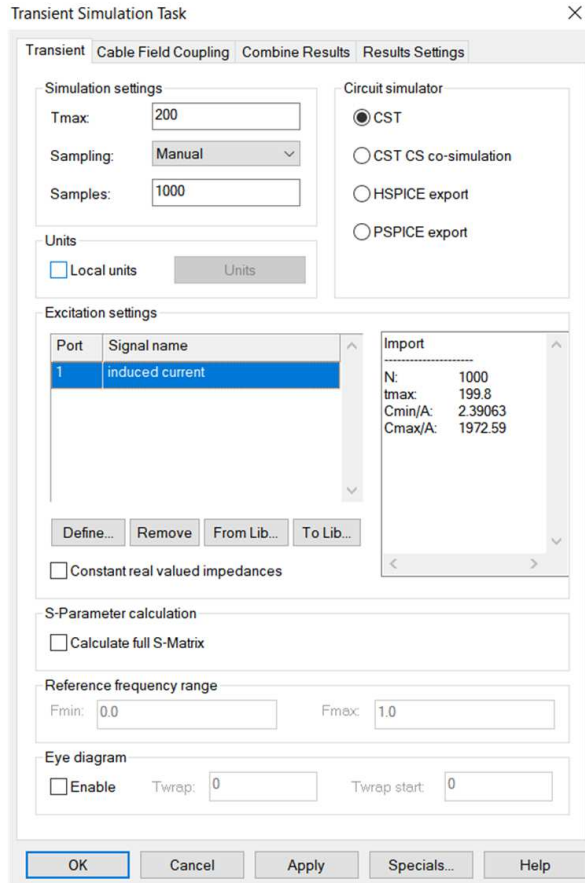
Fig. 11. Equivalent circuit of the analyzed system for the DG measurement variant

Schemat pokazany na rys. 11. traktuje masę odniesienia w sposób uproszczony. Należy pamiętać, że w trakcie badań eksperymentalnych istniały dwa punkty połączenia obciążeń linii, końców ekranu i sond napięciowych do płyty aluminiowej, stanowiącej masę. Jeden po stronie NE, drugi po stronie FE. Przy przepływie prądu pomiędzy tymi punktami występowała różnica napięć. Aby efekt ten odzwierciedlić, należało dodatkowo w modelu 3D powiązać każdy koniec oplotu ekranującego z najbliższym kątcem płyty aluminiowej. Przedstawione w dalszej części pracy rezultaty symulacji otrzymano w oparciu o zmodyfikowany model sekcyjny linii, uwzględniający wpływ tego połączenia.

## 5. Rezultaty badań komputerowych

W celu odniesienia do badań na stanowisku laboratoryjnym skupiono się na tym etapie na wykonaniu obliczeń jedynie w dziedzinie czasu przy zadanym prądzie  $I_3$  przewodu „3”. Rys. 12 przedstawia okno konfiguracyjne dla symulacji czasowej. Wykorzystano zarówno możliwość zastosowania dostępnego z biblio-

teki przebiegu dwuwykładniczego, najbardziej zbliżonego do użytego w badaniach eksperymentalnych, jak i zdefiniowania sygnału na podstawie rejestracji rzeczywistego prądu generatora, wczytanej w postaci pliku tekstowego ASCII.



Rys. 12. Okno konfiguracji symulacji czasowej obwodu

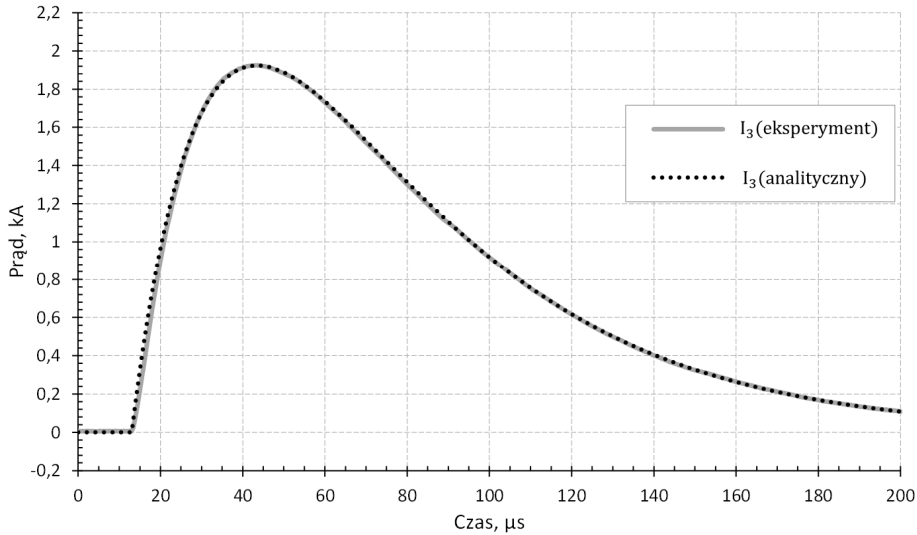
Fig. 12. Window of transient simulation setup

Parametry  $I_m = 7700$  A,  $\alpha = 22727$  s<sup>-1</sup> oraz  $\beta = 45454$  s<sup>-1</sup> zastosowanego dla wariantu AG przebiegu dwuwykładniczego prądu:

$$i(t) = I_m(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

obliczono na podstawie dopasowania, metodą najmniejszych kwadratów, krzywej opisanej zależnością (1) do wykresu przebiegu prądowego, zarejestrowanego w czasie prób eksperymentalnych.

Obliczenia symulacyjne wykonano dla konfiguracji badanego układu według wariantów opisanych w tabeli 1, przy czasie symulacji 200  $\mu\text{s}$  oraz przy zarówno stałych, jak i automatycznie dobieranych czasach próbkowania sygnału wymuszenia i kroku obliczeniowego. Rys. 13 przedstawia porównanie dwóch wymuszeń prądowych użytych do symulacji.



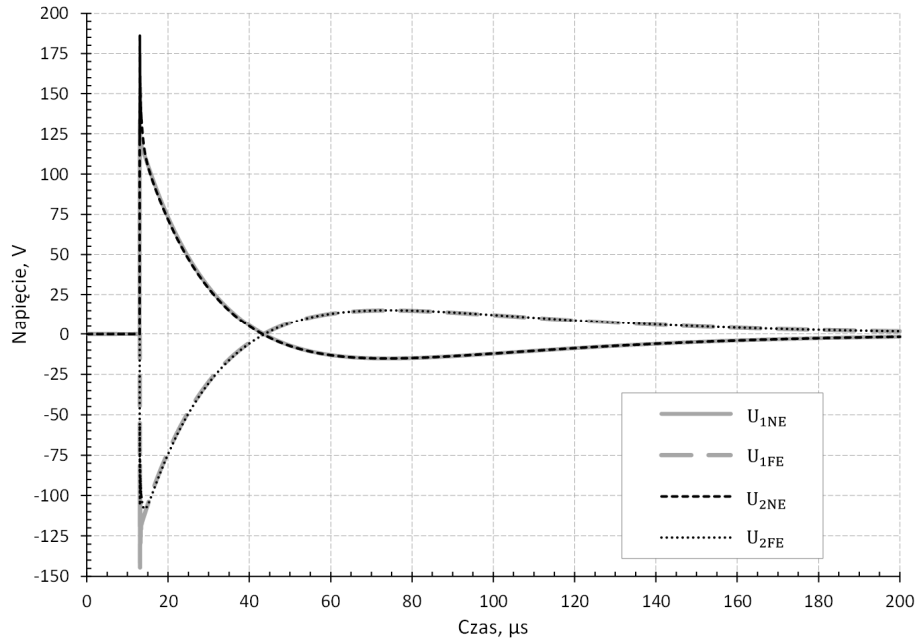
Rys. 13. Porównanie zadanych przebiegów prądu udarowego  $I_3$ : szary – zarejestrowany w czasie badań eksperymentalnych, kropkowany czarny – aproksymowany zależnością dwuwykładniczą

Fig. 13. Comparison of applied  $I_3$  current curves: gray - recorded during experimental investigations, dotted black - approximated by the double exponential relationship

Przebieg szary zadano w programie na podstawie pliku ze zbiorem dyskretnych wartości prądu udarowego, uzyskanych z jego rejestracji w czasie prób eksperymentalnych. Przebieg czarny kropkowany otrzymano poprzez wybór wymuszenia prądowego w programie jako dwuwykładniczy, zgodnie z zależnością (1) i dla parametrów:  $I_m = 7700 \text{ A}$ ,  $\alpha = 22727 \text{ s}^{-1}$  oraz  $\beta = 45454 \text{ s}^{-1}$ .

Pomimo względnie dobrego dopasowania zależności analitycznej (1) do danych pomiarowych, ten rodzaj przybliżenia prądu piorunowego posiada pewne wady opisane między innymi w [8, 9], szczególnie, jeśli chodzi o ciągłość pochodnej prądu w czasie równym zero. Wybrane wyniki obliczeń z użyciem źródła prądowego określonego taką zależnością zaprezentowano na rys. 14. Uzyskane napięcia odznaczały się znacznie krótszym czasem narastania niż miało to miejsce w modelu fizycznym (rys. 3). Dodatkowo występujące w obliczeniach analitycznych oscylacje na zboczu narastającym prowadzą w porównaniu do badań

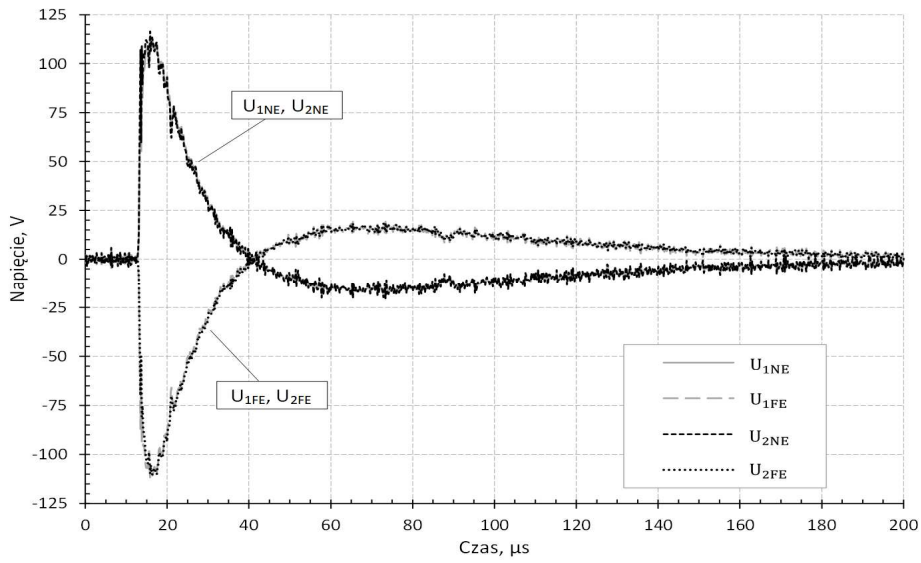
eksperymentalnych do uzyskania większych o prawie 80% wartości szczytowych. Momenty przejścia impulsów napięciowych przez zero praktycznie odpowiadały sytuacji z badań eksperymentalnych.



Rys. 14. Wyniki obliczeń napięć na końcach przewodów dla wariantu konfiguracyjnego AG i prądu udarowego  $I_3$  opisanego zależnością dwuwykładniczą (1)

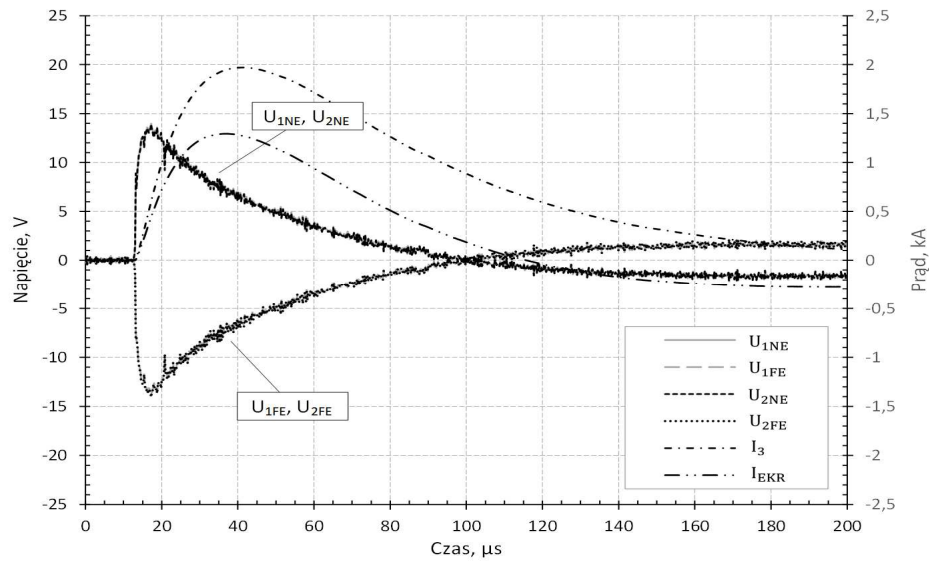
Fig. 14. Computation results of the voltages at the both ends of wires for configuration variant AG and excitation current  $I_3$  based on equation (1)

Rezultaty obliczeń przy tej samej konfiguracji układu (AG), lecz z zastosowaniem wymuszenia określonego zbiorem dyskretnych wartości, wczytanych z pliku, przedstawiono na rys. 15. Prąd płynący w przewodzie „3” ( $I_3$ ) określono z krokiem czasowym  $t_s = 0,2 \mu\text{s}$ . Wykonano też próby z innymi, wyższymi częstotliwościami próbkowania, które dla tego modelu i ustawień prowadziły do znacznie większego zaszumienia otrzymywanych wyników symulacji komputerowej, szczególnie przy braku prądu ekranu  $I_{EKR}$ . Mimo, że rezultaty obliczeń nie są gładkimi przebiegami, ich parametry są bliskie własnościom zmierzonych sygnałów w modelu fizycznym (rys. 3). Napięcia na rys. 15 posiadają nieco wyższe wartości szczytowe (do 15 %) w porównaniu do otrzymanych na stanowisku pomiarowym. Na rys. 16 przedstawiono natomiast rezultaty obliczeń przy obustronnie uziemionym oplocie ekranującym i tym samym rodzaju wymuszenia prądowego.



Rys. 15. Wyniki obliczeń napięć na końcach przewodów dla wariantu AG i prądu  $I_3$  wczytanego bezpośrednio z rejestracji dokonanej podczas badań eksperymentalnych

Fig. 15. Computation results of the voltages at the both ends of wires for configuration variant AG and  $I_3$  excitation current data loaded directly to simulator from experimental measurement



Rys. 16. Wyniki obliczeń napięć na końcach przewodów dla wariantu DG i prądu  $I_3$  wczytanego bezpośrednio z rejestracji dokonanej podczas badań eksperymentalnych

Fig. 16. Computation results of the voltages at the both ends of wires for configuration variant DG and  $I_3$  excitation current data loaded directly to simulator from experimental measurement

Napięcia przewodu „1” i „2” obserwowane po tej samej stronie linii są praktycznie sobie równe. Zupełnie inne poziomy wartości szczytowej i czasu narastania sygnałów na końcu linii „1” i „2” po tej samej stronie uzyskano w badaniach eksperymentalnych (rys. 6).

## 6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i symulacyjnych dokonano analizy przepięć w modelu lotniczej wiązki kablowej, jakie powstają w wyniku przepływu prądu piorunowego w systemie pokładowym statku powietrznego. Podczas eksperymentów badano model fizyczny dwumetrowej wiązki przewodów ułożonej nad metalową płaszczyzną. Zaburzenie w postaci prądu udarowego o wartości szczytowej bliskiej 2 kA i czasie narastania prawie 30  $\mu$ s wprowadzono do jednego z przewodów badanej linii poprzez bezpośrednie połączenie jego końców z generatorem pojedynczych udarów napięciowych o niskiej impedancji wyjściowej. Indukowane przepięcia w dwóch pozostałych przewodach, otoczonych opłotem ekranującym, wynikały z istnienia sprzężeń elektrycznych i magnetycznych pomiędzy liniami. Biorąc pod uwagę charakter zmian indukowanych napięć, w głównej mierze wpływ na ich obecność miały sprzężenia indukcyjne. Obserwowany kształt i poziom przepięć zależał od wartości obciążenia końców danego przewodu wiązki oraz od sposobu połączenia ekranu z metalową uziemioną płytą.

Badania symulacyjne w dziedzinie czasu wykonano w programie CST Studio Suite / Cable Studio. Model obwodowy wiązki powstał w oparciu o teorię linii długiej, w wyniku przeliczenia przygotowanej trójwymiarowej reprezentacji układu. Pozwoliło to na znaczne uproszczenie obliczeń. Schemat obwodowy zawierał dodatkowo zestaw rezystorów modelujących obciążenia linii oraz źródło prądowe. Uzyskano odpowiedzi dla dwóch sposobów definiowania przebiegu prądu wymuszającego. Najlepsze rezultaty otrzymano poprzez bezpośrednie wgranie pliku rejestracji prądu udarowego dokonanej w części eksperymentalnej. Model wykazywał dużą wrażliwość na częstotliwość próbkowania wgrywanego dyskretnego przebiegu prądu wymuszającego. Zgodność wyników obliczeń z pomiarami eksperymentalnymi należy uznać za dobrą. Rezultaty symulacji przy zastosowaniu analitycznie opisanego prądu udarowego różniły się z wynikami eksperymentalnymi szczególnie w obszarze zbocza narastającego i szczytu. Większość ustawień symulacji czasowej i modułów analizujących pozostawiono jako domyślne. Modyfikowano głównie sposób dyskretyzacji sygnału wymuszenia oraz zmian kroku czasowego obliczeń. Sprawdzone, że na wyniki obliczeń nie miało zauważalnego wpływu uwzględnienie pasożytniczych pojemności i indukcyjności rezystorów obciążających linie.

Stopień odwzorowania rzeczywistego układu mógł być powodem różnic pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych i symulacyjnych. W modelu 3D nie

brano pod uwagę zmian ułożenia wzajemnego przewodów, jakie naturalnie istnieją wzdłuż długości wiązki (oddalenia, przemieszczenia, skręcenia). Obciążenie linii w fizycznym modelu wymagało wprowadzenia rezystorów i odsłoniętych fragmentów przewodów, co prowadziło do indukowania się dodatkowych napięć. Takich odwzorowań nie uwzględniono w modelu, ponieważ na schemacie obwodowym stosowano wyłącznie rezystory.

Planowane są dalsze prace z wykorzystaniem przedstawionego oprogramowania, szczególnie w rozszerzeniu o obliczenia obwodowe w dziedzinie częstotliwości oraz obliczenia obwodowo-polowe.

*Badania sfinansowano z dotacji DS/M.ET.17.002.*

## Literatura

- [1] K. Filik: Badanie odporności zespołów awioniki statków powietrznych na narażenia LEMP, Przegląd Elektrotechniczny, R. 90, Nr 10, 2014, s. 60-63.
- [2] K. Filik, G. Masłowski: Analiza przepięć indukowanych pochodzenia atmosferycznego w systemie nawigacyjno-komunikacyjnym statku powietrznego, Przegląd Elektrotechniczny, R. 92, Nr 8, 2016, s. 263-267.
- [3] P.R. Clayton: Introduction to Electromagnetic Compatibility, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [4] H.W. Ott: Electromagnetic Compatibility Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [5] F.A. Fisher, J.A. Plumer, R.A. Perala et al.: Lightning Protection of Aircraft, Lightning Technologies Inc., 1990.
- [6] CST Computer Simulation Technology GmbH: CST STUDIO SUITE® help documentation, 2017, <http://www.cst.com>.
- [7] H. Kaden: Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik, Springer Verlag, 1950.
- [8] F. Hiedler, J. Cvetić: A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front, European Transactions on Electrical Power, Volume 12, Issue 2, Version of Record online: 22 MAR 2007.
- [9] F. Heidler, Z. Flisowski, W. Zischank, Ch. Bouquegneau, C. Mazetti: Parameters of lightning current given in IEC 62305 – Background, experience and outlook, 29<sup>th</sup> ICPL conference, 2008, Uppsala, Sweden.

## ANALYSIS OF LIGHTNING INDUCED TRANSIENTS IN AN AIRCRAFT CABLE BUNDLE MODEL

### Summary

The paper presents an analysis of lightning overvoltages induced in the section of cable harness, located above the conductive metal plane, based on the presented results of experimental and computer studies. For the preparation of the physical model, typical wires and braided shield for aviation industry were used. The tests were carried out for various harness configuration. First of all, both the values of the resistive loads on both ends of the wires and the method of grounding the screen surrounding the selected wires were changed. In the unshielded wire of the same bundle, the lightning current was forced using a single impulse generator MIG0618SS with high accuracy and repeatability of generated disturbances. The overvoltages were transferred to the other wires of the line by capacitive and inductive coupling. Voltage and current waveforms at specific points of the system were recorded using a digital oscilloscope. The results of experimental research were the basis for verification of the computer simulation computation made in the CST Studio Suite 2017 software package. On the basis of the prepared 3D structure of the studied system, the program made it possible to obtain an equivalent transmission line model, used for later calculations in the time domain. Studies showed a clear and also the expected relationship of load configuration and the shield grounding method of the cable bundle on the shape and peak value of transients observed in the system. The differences resulted among other, from the degree of 3D model accuracy and the method defining the forcing current and parameters of the simulation. It is planned to use the presented software in further work on the analysis of lightning induced signals in electrical and electronic systems.

**Keywords:** lightning overvoltages, multi-conductor transmission line, electromagnetic coupling, electromagnetic shielding, experimental and computer studies

DOI: 10.7862/re.2018.1

*Tekst złożono w redakcji: grudzień 2017*

*Przyjęto do druku: grudzień 2017*



Robert Żelazny<sup>1</sup>

## HARMONICZNE PRĄDU W LINIACH I URZĄDZENIACH ELEKTRYCZNYCH ZASILAJĄCYCH ODBIORCÓW KOLEJOWYCH

W artykule przedstawiono funkcjonujące definicje, które wynikają z obowiązujących unormowań prawnych oraz technicznych. Przedstawiono również elementy układu prostowniczego podstacji, które podczas pracy awaryjnej powodują nieprawidłowości dotyczące występujących zaburzeń wprowadzanych do sieci zasilania oraz do odbiorców zasilanych z urządzeń podstacji trakcyjnej. Wymieniono poziomy napięcia zasilania w liniach zasilających podstacje trakcyjne. Wymieniono również niekorzystne oddziaływania harmonicznym na pracę wybranych odbiorników energii elektrycznej oraz sposoby ich zmniejszenia. Opisano wpływ harmonicznym na wybrane elementy takie jak: transformatory, kondensatory, generatory i silniki. Zostały również przedstawione podstawowe wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej w urządzeniach PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. oraz wymieniono typy podstawowych odbiorów kolejowych, które przede wszystkim służą do zapewnienia bezpiecznego prowadzenia ruchu pociągów.

**Słowa kluczowe:** podstacja trakcyjna, harmoniczne prądu, zespół prostownikowy

### 1. Wprowadzenie

Odbiorniki nieliniowe są źródłem obniżenia jakości energii elektrycznej, ponieważ pobierany przez nie prąd z sieci nie jest sinusoidalny. Wyższe harmoniczne są przyczyną dużych strat energetycznych. Minimalizowanie prądów wyższych harmonicznym jest zagadnieniem, które jest przedmiotem wielu prac badawczych w różnych ośrodkach całego świata. Wprowadzane są coraz bardziej restrykcyjne normy, które wymuszają u dostawców energii elektrycznej minimalizowanie negatywnego wpływu wyższych harmonicznym.

W celu określenia wartości zniekształceń napięciowych, konieczna jest analiza zniekształceń prądowych oraz impedancji zwarciowej układu. Powstające zniekształcenia napięciowe zależne są od parametrów układu zasilania, a znie-

---

<sup>1</sup> Robert Żelazny, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. oraz Politechnika Częstochowska Wydział Elektryczny, email: Robert1980@interia.eu

kształcenia prądowe są zależne od indywidualnych cech danego urządzenia. Podstacje trakcyjne są jednym z większych odbiorców podłączonych do systemu elektroenergetycznego. Kolejowy system elektroenergetyczny przede wszystkim ma za zadanie zasilanie wszystkich pojazdów trakcyjnych napięciem znamionowym o wartości 3000 V prądu stałego. Dodatkowo z podstacji trakcyjnej zasilane są odbiorniki PKP PLK S.A., które są niezbędne do bezpiecznego prowadzenia ruchu pociągów [1, 2, 3] oraz inni odbiorcy podłączeni do linii potrzeb nietrakcyjnych. Energia elektryczna jest towarem, który można dostarczać innym odbiorcom, dlatego poza atrakcyjną ceną musi spełniać określone wymagania pod względem jakości [4, 5, 6, 7]. Wymagania te dotyczą zarówno energetyki zawodowej, jak również energetyki kolejowej. Dopuszczalna wartość odkształcenia prądu zależy od grupy przyłączeniowej, do jakiej dany odbiorca jest zakwalifikowany [8, 9].

## **2. Definicje, przepisy, dyrektywy i normy dotyczące harmonicznych prądu i napięcia w sieci zasilającej oraz ich klasyfikacje**

Wymagania dotyczące poziomów zawartości harmonicznych prądu są znormalizowane, lecz dotyczy to tylko odbiorników przyłączonych do sieci niskiego napięcia. Odbiorniki w sieciach niskiego napięcia są podzielone na dwa przedziały dotyczące znamionowego prądu fazowego: mniejsze lub równe od 16 A [6] oraz większe od 16 A i mniejsze lub równe od 75 A [7]. Na podstawie norm [6, 7] operatorzy systemu elektroenergetycznego opracowują instrukcje, w których są zamieszczone dane dotyczące dopuszczalnych zawartości harmonicznych jako wartości obligatoryjne [4, 10]. Sieci o napięciu znamionowym wyższym od 1kV nie są objęte unormowaniami dotyczącymi dopuszczalnych poziomów generacji harmonicznych. W celu obliczenia poziomów zawartości harmonicznych w odkształconych przebiegach napięć lub prądów wprowadzono pojęcie współczynnika THD (ang. Total Harmonic Distortion). Współczynnik THD oznacza wartość całkowitej zawartości harmonicznych i jest zdefiniowany dla zawartości harmonicznych prądu. Dla porównania zawartości harmonicznych oraz współczynnika odkształcenia prądu  $THD_I$  można posłużyć się postanowieniami normy IEEE [11].

### **Klasyfikacja harmonicznych**

Wyższe harmoniczne mogą występować zarówno w przebiegach prądów jak i przebiegach napięć. Ze względu na częstotliwość składowych analizowanego przebiegu, w odniesieniu do częstotliwości podstawowej harmonicznej, harmoniczne dzielimy na:

- Interharmoniczne, które definiuje się jako składowe o rzędach nie będących całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej harmonicznej, mogące pojawiać się jako częstotliwości dyskretne lub jako szerokopasmowe spektrum. Interharmoniczne powstają w wyniku szybkich zmian prądu w urządzeniach. Wartość interharmonicznych zwiększa się na skutek wzrostu zastosowań przemienników częstotliwości i podobnych urządzeń sterujących. W określonych przypadkach interharmoniczne, niekiedy nawet o małych wartościach, powodują powstanie migotania światła lub powodują znaczne zakłócenia w pracy układów sterowania częstotliwości akustycznej [12].
- Subharmoniczne, które definiuje się jako składowe o częstotliwości niższej od podstawowej harmonicznej. Przyczyną występowania subharmonicznych jest praca odbiorników nieliniowych, takich jak np. falowniki, piece indukcyjne oraz odbiorników charakteryzujących się dużymi zmianami (w czasie) pobieranej mocy, np. pieców łukowych.

W układach zawierających elementy przekształtnikowe można dodatkowo różnić dwie grupy:

- harmoniczne charakterystyczne, które występują w prądach przekształtnika w idealnych warunkach pracy.
- harmoniczne niecharakterystyczne, które występują w prądach przekształtnika w rzeczywistych warunkach pracy, gdzie obecność nie wynika z liczby pulsów przekształtnika, np. 8 harmoniczna w przekształtniku 12-pulsowym.

### **3. Źródła oraz klasyfikacja skutków obecności wyższych harmonicznych**

Wyższe harmoniczne pojawiają się w wyniku występowania w sieci urządzeń, które powodują odkształcenia przebiegu prądu (tab. 1). Urządzenia, o których mowa to:

- urządzenia elektroniczne i energoelektroniczne.
- urządzenia łukowe: piece łukowe, urządzenia spawalnicze, wyładowcze źródła światła.
- urządzenia z rdzeniami magnetycznymi: silniki, transformatory.

Podstacje trakcyjne jako element systemu elektroenergetycznego są zbudowane w taki sposób, aby poprzez linie zasilające o napięciu 15, 20, 30 lub 110 kV i urządzenia podstacji trakcyjnych zasilac (przez sieć trakcyjną) pojazdy trakcyjne napięciem 3000 V prądu stałego. Dodatkowo system ten w części przemiennoprądowej służy do zasilania odbiorów nietrakcyjnych przez linię potrzeb nietrakcyjnych (LPN). W podstacjach trakcyjnych zamontowane urządzenia mające wpływ na jakość energii elektrycznej prądu stałego oraz przemiennego to zespół prostownikowy współpracujący z dławikiem (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Zespół prostownikowy typu PK 17/3,3-3

Fig. 1. PK 17 / 3,3-3 rectifier unit



Rys. 2. Dławik typu XLEB4 120

Fig 2. Choke type XLEB4 120

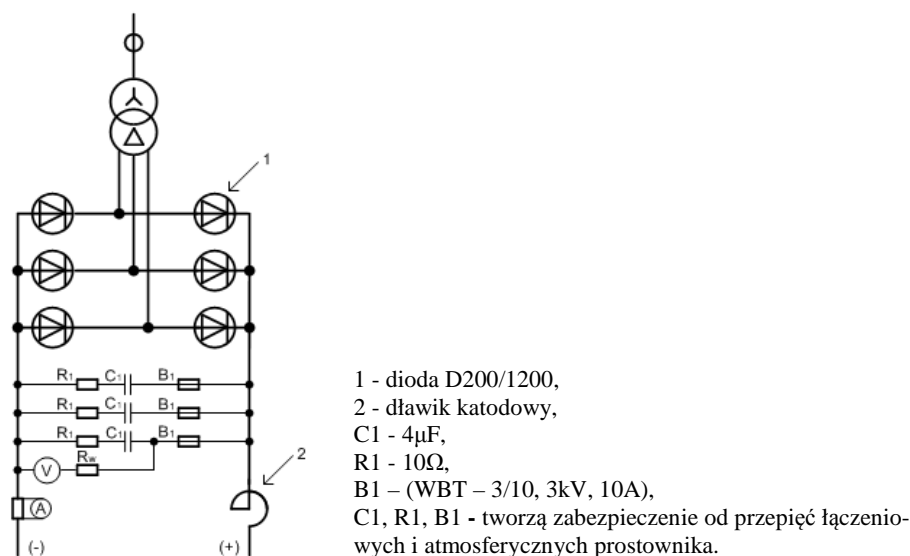
Tabela 1. Klasyfikacja skutków występowania harmonicznych w liniach i urządzeniach elektrycznych

Table 1. Classification of the effects of harmonic appearance in lines and electrical devices

Klasyfikacja	Skutki	Opis wpływu harmonicznych na pracę odbiorników energii elektrycznej
Charakter fizyczny odkształconego przebiegu	Napięciowe	Wpływ poprzez wartość odkształconego przebiegu napięcia.
	Prądowe	Harmoniczne prądu są powodem wzrostu temperatury w urządzeniach i skrócenia ich żywotności. Wpływ poprzez wartość chwilową lub uśrednioną w trakcie przepływu prądu np. poprzez wzrost temperatury maszyn, wzrost strat w liniach zasilających, itp.
Czas występowania	Chwilowe lub o charakterze natychmiastowym	Są to wadliwe działania urządzeń lub ich uszkodzenia. Przykładowe urządzenia to urządzenia pomiarowe, zabezpieczające, sterujące, sprzęt elektroniczny oraz sprzęt komputerowy, itp.
	Długotrwałe	Podstawowy wpływ jest związany z długotrwałym oddziaływaniem temperatury na urządzenia. W efekcie tego działania następuje przyspieszony proces starzenia się izolacji i następnie skrócenie żywotności danego urządzenia.
Miejsca występowania	W liniach zasilających oraz rozdzielniach	W liniach średniego napięcia może pojawić się zjawisko rezonansu napięcia co powoduje większe odkształcenia napięcia (bezpośredni wpływ na pracę transformatorów)
	W sprzęcie oraz w urządzeniach elektrycznych	Dla linii nN napięcia harmoniczne prądu powodują bezpośredni wpływ na pracę silników oraz kondensatorów, co jest przyczyną wielu uszkodzeń i awarii
Składowe odkształconych przebiegów	Składowa stała	Obecnie wpływ zastosowanych prostowników oraz elektronicznego sprzętu w gospodarstwach domowych i przemyśle może być powodem występowania składowej stałej w napięciu. Efektem tego może być doprowadzenie do nasycenia rdzeni transformatorów. Może również spowodować zakłócenia w pracy układów pomiarowych oraz zabezpieczeń.

### Jakość energii elektrycznej na podstacji trakcyjnej (PT)

Urządzenia zainstalowane na podstacji trakcyjnej mają duży wpływ na jakość energii elektrycznej. Standardy jakościowe podmiotów zaliczanych do grup przyłączeniowych I i II dotyczą w przypadku podstacji trakcyjnych zasilanych napięciem 110 kV z transformacją jednostopniową 110/3 kV. Standardy jakościowe podmiotów zaliczanych do grup przyłączeniowych III - V dotyczą podstacji trakcyjnych zasilanych napięciem 15, 20 i 30 kV. Zamontowane w podstacji trakcyjnej zespoły prostownikowe w rozdzielni prądu stałego są elementami nieliniowymi dużej mocy (rys. 3), które pobierają za pomocą linii zasilających prąd odkształcony od dostawcy energii elektrycznej. Pobierany prąd powoduje występowanie zjawiska odkształcenia napięcia na liniach zasilających.



Rys. 3. Schemat obwodu głównego zespołu prostownikowego PK-17/3,3-3

Fig 3. Diagram of the circuit of the main rectifier unit PK17/3,3-3

Zjawisko to powoduje pogorszenie parametrów energii elektrycznej szczególnie, kiedy dodatkowy odbiorca jest podłączony do tej samej linii zasilającej lub szyn zbiorczych rozdzielni średniego napięcia (dotyczy grup przyłączeniowych III – V badanej podstacji). Znaczący wpływ na jakość energii elektrycznej ma wartość mocy zwarciowej na szynach rozdzielni prądu przemiennego, zasilanego przez dostawcę energii elektrycznej oraz typ zastosowanych zespołów prostownikowych. Widmo harmonicznych prądu zespołów prostownikowych zależy od liczby pulsacji (1), które można obliczyć wg wzoru:

$$n = m \cdot p \pm 1 \quad (1)$$

gdzie:  $n$  - rząd harmonicznej prądu,  
 $m = 1, 2, 3$  (kolejne liczby naturalne),  
 $p$  - liczba pulsacji zespołu prostownikowego,

## 4. Problemy wynikające z dużego poziomu zawartości wyższych harmonicznych i ich wpływ na odbiorniki energii

### 4.1. Transformatory

Transformatory znacznie doświadczają skutków oddziaływania wyższych harmonicznych, ponieważ oprócz zakłóceń akustycznych, występuje tam wzrost strat mocy w rdzeniu. Straty te są przede wszystkim związane z histerezą magnetyczną i zwiększają się proporcjonalnie do częstotliwości, a straty związane z prądami wirowymi zwiększają się proporcjonalnie do kwadratu częstotliwości. Następną kwestią są straty w uzwojeniach, które są następstwem wzrostu wartości skutecznej prądu oraz zwiększonej rezystancji, co jest związane z efektem naskórkowości. W wyniku powyższych negatywnych wpływów na izolację uzwojeń transformatora, dochodzi do podwyższenia temperatury, a w efekcie skrócenie żywotności transformatorów. Nie bez znaczenia jest obecność składowej stałej prądu, co jest efektem podłączenia prostowników lub innych odbiorników elektronicznych jako obciążenia transformatorów. W wyniku tego następuje nasycenie rdzenia transformatora i następnie dalszy wzrost odkształcenia przebiegu prądu. Inne przyczyny strat mocy w transformatorach, to połączone w trójkąt uzwojenia stanowiące obwód zwarty dla prądów harmonicznych rzędu trzeciego i rzędów będących wielokrotnością trzech.

Mając na uwadze wyżej wymienione negatywne zjawiska, projektanci i producenci transformatorów są zmuszeni do projektowania oraz wykonania takich transformatorów, które już mają zawarte wszystkie zmiany konstrukcyjne w celu zmniejszenia strat.

W USA i Kanadzie wprowadzono inny sposób oznaczania transformatorów o zmniejszonych stratach mocy, które są przystosowane konstrukcyjnie do współpracy z odbiornikami o charakterystyce nieliniowej. Charakteryzują się one zwiększonymi zdolnościami akumulacji ciepła w porównaniu z typowymi jednostkami takiej samej mocy znamionowej, ponieważ zastosowano w nich zmiany konstrukcyjne powodujące zwiększoną redukcję strat mocy. Transformatory te są oznaczone symbolem „K” wraz z liczbą ze znormalizowanego szeregu: 4, 9, 13, 20, 30, 40 i 50 [13] oraz stosowane do różnego rodzaju obciążenia np.:

- K-4 - spawarki, zgrzewarki, urządzenia do nagrzewania indukcyjnego,
- K-13 - instalacje stosowane w biurach, szkołach oraz w szpitalach,
- K-20 - obwody w sieciach telekomunikacyjnych oraz do przesyłania danych.

## 4.2. Kondensatory

Kondensatory są elementami, które w bardzo dużym stopniu doświadczają skutków pracy w czasie, gdy przebieg sinusoidy energii elektrycznej jest odkształcony. Producenci podają na tabliczkach znamionowych dopuszczalne współczynniki przeciążeniowe, które określają krotność ich wartości znamionowych. Wyznaczają one dla kondensatorów dopuszczalny zakres pracy, który w przypadku ich przekroczenia powoduje znaczące skrócenie ich żywotności. Wzrost zawartości wyższych harmonicznych może być powodem zwiększenia wartości szczytowej napięcia, która negatywnie wpływa na izolację kondensatorów. Może ona w konsekwencji spowodować częściowe wyładowanie w dielektryku i zwarcie między foliami izolacyjnymi. Takie problemy występujące w kondensatorach i w większości mają charakter prądowy. Harmoniczne obecne w przebiegach napięcia powodują przepływ dodatkowych prądów, które mogą rosnąć wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej. W bateriach kondensatorów, przy znacznym przepływie prądu, występują negatywne zjawiska w postaci zwiększenia strat mocy, a w ekstremalnych przypadkach dochodzi do przepalenia bezpieczników. Takie zjawiska powodują przyspieszenie procesu starzenia i w konsekwencji znaczne skrócenie żywotności kondensatorów.

## 4.3. Generatory oraz silniki

Wyższe harmoniczne napięcia i prądu w maszynach synchronicznych i asynchronicznych powodują zwiększenie strat mocy, co skutkuje zwiększeniem temperatury pracy tych maszyn. Źródłem strat są uzwojenia maszyny oraz jej rdzeń, co w efekcie powoduje wzrost temperatury. Konsekwencją wzrostu temperatury są negatywne skutki w postaci pogorszenia parametrów izolacji, co w przypadku długotrwałego występowania powoduje skrócenie żywotności maszyny. W silnikach, obecność wyższych harmonicznych powoduje dodatkowe oscylacje momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik. Oscylacje momentu są źródłem drgań, mogących powodować mechaniczne uszkodzenia silnika oraz napędzanej maszyny. Obecność wyższych harmonicznych powoduje w silnikach powstawanie napięć wałowych i przepływ prądów łożyskowych, prowadzących do szybszego zużycia i awarii łożysk silnika oraz maszyny przez silnik napędzanej.

## 5. Metody ograniczania negatywnego wpływu wyższych harmonicznych na urządzenia

a) Metody ograniczania negatywnego wpływu prądów z przebiegami odkształconymi na transformatory to:



- przewymiarowanie uzwojeń połączonych w trójkąt i przewodu neutralnego przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę ze względu na obecność harmonicznego rzędu trzeciego i rzędów będących wielokrotnością trzech (do 200% przekroju przewodów fazowych) [14],
- takie projektowanie rdzeni magnetycznych, aby w znamionowym punkcie pracy uzyskać odpowiednią wartość strumienia magnetycznego (poniżej kolana charakterystyki magnesowania). Uzyskuje się to między innymi poprzez stosowanie rdzeni z żelaza o odpowiedniej jakości i o odpowiednim przekroju poprzecznym [13],
- wykonywanie uzwojeń transformatorów przewodami równoległymi lub z folii (uzwojenia dolnego napięcia) w celu redukcji zjawiska naskórkowości i zmniejszenia strat wiroprowadowych [13],
- stosowanie ekranów elektrostatycznych pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a wtórnym,

**b)** Metody ograniczania negatywnego wpływu prądów z przebiegami odkształconymi na kondensatory to:

- eliminowanie przewodu neutralnego dla baterii połączonych w gwiazdę. Ma to na celu wyeliminowanie obciążenia prądami harmonicznymi rzędu trzeciego i rzędów będących wielokrotnością trzech.
- przebudowa urządzeń energetycznych w taki sposób, aby kondensatory i układy nieliniowe nie miały wspólnego transformatora,
- stosowanie dławików przeciwrzonansowych,

**c)** Metody zmniejszania powstawania odkształcenia przebiegu prądu w podstawach trakcyjnych to:

- zastępowanie zastosowanych zespołów prostownikowych innymi, powodującymi mniejsze odkształcenie parametrów energii elektrycznej. Przykładowo: zespoły 6-cio pulsowe można zastąpić 12-sto pulsowymi.
- stosowanie filtrów.

**d)** Metody zmniejszania odkształcenia przebiegu prądu to:

- stosowanie filtrów aktywnych, które powodują zmianę przebiegu chwilowego prądu w czasie poprzez układ sterujący z przebiegu odkształconego na sinusoidalny. Filtry te są projektowane jako podłużne (szeregowe), poprzeczne (równoległe) oraz jako szeregowo-równoległe.
- stosowanie filtrów pasywnych rezonansowych nazywanych jako „rezonansowe filtry wyższych harmonicznymi”. Filtry te są włączane poprzecznie do układu sieci. W skład filtru wchodzi kondensator oraz dławik.

## 6. Podsumowanie

Zasilanie sieci trakcyjnej PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. jest realizowane napięciem stałym o wartości 3000 V. Transformacja napięcia przemiennego na napięcie stałe odbywa się poprzez transformator oraz zespół prostownikowy w podstacji trakcyjnej. W takich zespołach prostownikowych uzyskuje się napięcie wyprostowane z zawartością wyższych harmonicznych. Harmoniczne te przenoszą się do dostawcy energii elektrycznej poprzez linie zasilające podstację trakcyjną. Dodatkowo odbiorcy energii elektrycznej podłączeni do (LPN) linii potrzeb nietrakcyjnych z podstacji trakcyjnej również są narażeni na negatywny wpływ oddziaływania wyższych harmonicznych na swoje urządzenia. W celu zmniejszenia negatywnego oddziaływania wyższych harmonicznych stosuje się wyżej opisane dławiki, filtry pasywne rezonansowe oraz aktywne. Działania te są niezbędne, aby współczynnik zawartości wyższych harmonicznych napięcia i prądu (THD) zawierał się w granicach obowiązujących norm. W celu zapewnienia bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego należy spełnić wszystkie wymienione w artykule wymagania i podstawowe parametry jakości energii elektrycznej. Harmoniczne prądu, osiągając wartości przewyższające poziomy normatywny, mają bardzo negatywny wpływ na podstawowe elementy systemu energetycznego, które mogą spowodować zwiększenie ilości awarii oraz skrócić ich żywotność.

## Literatura

- [1] Opracowanie wymagań na zasilanie energią elektryczną urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Praca CNTK nr 4034/10, Warszawa 2003.
- [2] PN-EN 50121-2: 2004. Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie.
- [3] Standardy techniczne – szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości  $V_{max} \leq 200$  km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem). Warszawa 2009.
- [4] Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej. Część 4. Wyższe harmoniczne napięć i prądów.
- [5] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997r. z późniejszymi zmianami Prawo energetyczne Dz.U. z 2012r., poz. 1059. Z 2013r., poz. 984 i poz.1238, z 2014r., poz. 457, poz. 490, poz. 900, poz. 942, poz. 11010, poz. 1662 oraz z 2015r. poz. 151, poz. 478 i poz. 942.
- [6] PN - EN 61000-3-2: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-2: Poziomy dopuszczalne - Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika  $\leq 16$  A).
- [7] PN-EN 61000-3-12: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Część 3-12: Dopuszczalne poziomy – Dopuszczalne poziomy harmonicznych prądów powodowa-

- nym działaniem odbiorników, które mają być przyłączone do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia z fazowym prądem zasilającym odbiornika  $> 16 \text{ A}$  i  $\leq 75 \text{ A}$ .
- [8] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych zasad funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 r. Nr 93, poz. 623, z późn. zm.), s. 5665-5668.
  - [9] PN-IEC 60364: 2006-2009. Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych.
  - [10] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (zatwierdzona decyzją Prezesa URE nr DRR-4321-29(5)/2013/MKo4 z dnia 10 września 2013 r.), s. 99-101.
  - [11] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. AN-SI/IEEE Std 519-1992.
  - [12] PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych, s.13.
  - [13] „K-Factor Isolation Transformer” (AET-2009-AET\_K13-Factor\_400V\_R1.pdf), [www.aet.com.sg](http://www.aet.com.sg).
  - [14] Jagieła K., Rak J., Gała M., Kępiński M., Straty mocy w transformatorach energetycznych zasilających dużych odbiorców przemysłowych *Energoenergetyka*, nr 3(9)/2011.

## CURRENT HARMONICS IN POWER LINES AND DEVICES SUPPLYING RAILWAY CONSUMERS

### Summary

The article presents functioning definitions, which result from applicable legal and technical regulations. Also shown elements of the substation rectification circuit, which during emergency operation cause irregularities occurring disturbances introduced to the power grid and to recipients supplied from traction substation devices. Power supply voltage levels in power lines for traction substations are listed. Also the adverse effects of harmonics on the operation of selected electric energy receivers and the ways of their reduction have been mentioned. Describes the effect of harmonics on selected components such as transformers, capacitors, generators and motors. Basic requirements concerning the quality of electric energy in PKP Polish Railway Lines S.A. were also presented and the types of basic railway trains were exchanged, which are primarily used to ensure safe operation of trains.

**Keywords:** Traction substation, current harmonics, rectifier unit

DOI: 10.7862/re.2018.2

*Tekst złożono w redakcji: grudzień 2017*

*Przyjęto do druku: grudzień 2017*



Robert Żelazny<sup>1</sup>

## JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W LINIACH ZASILAJĄCYCH ODBIORNIKI PKP PLK S.A.

Artykuł prezentuje definicje wynikające z aktualnych uwarunkowań prawnych i technicznych. Przedstawiono również problemy związane z jakością energii elektrycznej w podstacjach trakcyjnych w czasie pracy awaryjnej. Stan awaryjny powoduje nieregularności, które skutkują występowaniem zakłóceń wprowadzanych do sieci zasilającej i odbiorów zasilanych z podstacji trakcyjnych. Ponadto, przedstawiono wpływ występowania harmonicznych prądu na pracę wybranych odbiorów energii elektrycznej, jak również metody jego ograniczania. Wymieniono podstawowe wymagania co do jakości energii elektrycznej w PKP PLK S.A.

**Słowa kluczowe:** podstacja trakcyjna, harmoniczne prądu, zespół prostownikowy.

### 1. Wprowadzenie

Wyższe harmoniczne prądów i napięć [1, 3, 8, 9] są przyczyną dużych strat energetycznych. Powodują także uszkodzenia w urządzeniach elektrycznych i elektronicznych. Wprowadzane są coraz bardziej restrykcyjne zapisy norm, które zmuszają firmy dystrybuujące energię elektryczną oraz odbiorców do ograniczania zaburzeń wprowadzanych do sieci energetycznej [1, 5, 8, 9, 10]. Urządzenia generujące wyższe harmoniczne powodują nieprawidłowe działanie innych urządzeń (rys. 1) i w konsekwencji mogą spowodować ich uszkodzenie. Powstające zniekształcenia napięciowe zależne są od parametrów układu zasilania, a zniekształcenia prądowe są zależne od indywidualnych cech danego urządzenia.

---

<sup>1</sup> Robert Żelazny, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. oraz Politechnika Częstochowska Wydział Elektryczny, email: Robert1980@interia.eu

## 2. Jakość energii elektrycznej w podstacjach trakcyjnych

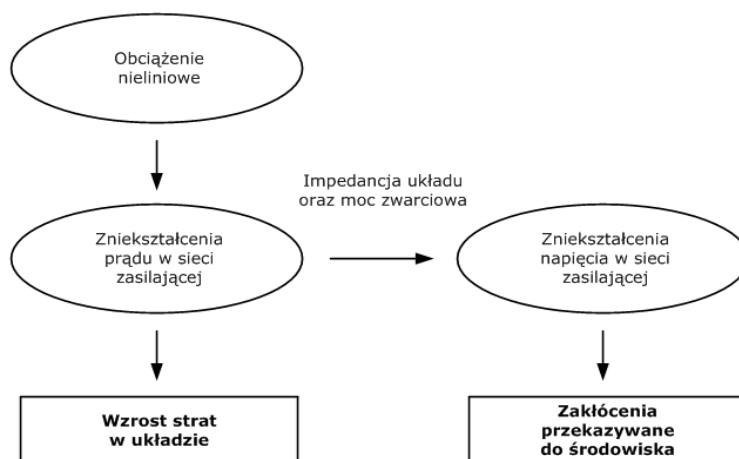
Podstacje trakcyjne (PT) są jednym z większych odbiorów przyłączonych do systemu elektroenergetycznego. Urządzenia podstacji trakcyjnych składają się z dwóch części: przemiennoprądowej i stałoprądowej. System przemiennoprądowy służy przede wszystkim do zasilania urządzeń (PT) oraz do zasilania odbiorów nietrakcyjnych, a system stałoprądowy zasilany przez zespoły prostownicowe (rys. 2) służy do zasilania sieci trakcyjnej. Kolejowy system elektroenergetyczny jest zbudowany w taki sposób, aby poprzez linie zasilające i urządzenia podstacji trakcyjnych zasilac pojazdy trakcyjne napięciem 3000 V prądu stałego. Dodatkowo system ten z części przemiennoprądowej zasila odbiory kolejowe. Dopuszczalna wartość odkształcenia prądu zależy od grupy przyłączeniowej, do jakiej dany odbiorca jest zakwalifikowany [5, 8, 9, 10]. W związku z brakiem w polskim prawodawstwie przepisów regulujących zawartość wyższych harmonicznych prądu w sieciach SN oraz WN, dla porównania zmierzonych wartości harmonicznych można posłużyć się postanowieniami normy IEEE Std 519-2014 [1].

W celu obliczenia poziomów zawartości harmonicznych w odkształconych przebiegach napięć i prądów (rys. 5, 9) wprowadzono pojęcie „całkowitego współczynnika odkształcenia harmonicznych” THD (ang. Total Harmonic Distortion), w dalszej części pracy są stosowane oznaczenia zgodne z normą IEEE 1459-2010 [2]. Współczynnik THD oznacza wartość całkowitej zawartości harmonicznych napięcia i prądu:

$$THDu = \sqrt{\left(\frac{U}{U_1}\right)^2 - 1} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2} \quad (1)$$

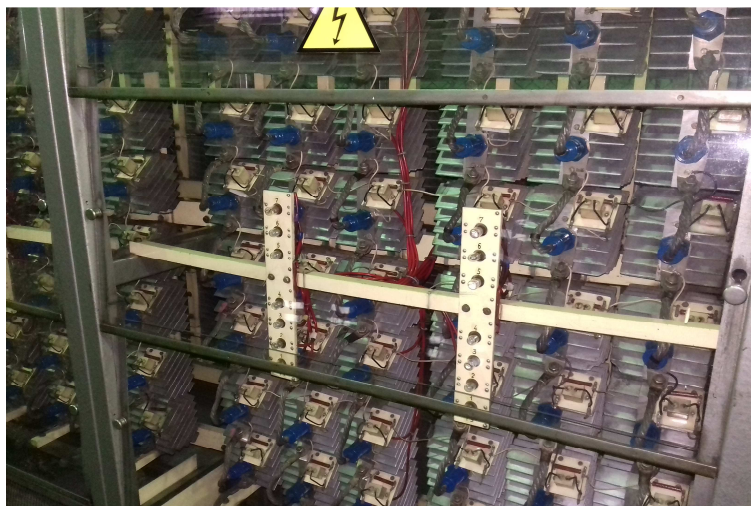
$$THDi = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (2)$$

gdzie:  $U$  - wartość skuteczna napięcia  
 $U_1$  - wartość skuteczna pierwszej harmonicznej  
 $U_h$  - wartość skuteczna h-tej harmonicznej  
 $I$  - wartość skuteczna prądu  
 $I_1$  - wartość skuteczna pierwszej harmonicznej  
 $I_h$  - wartość skuteczna h-tej harmonicznej



Rys. 1. Odbiornik nieliniowy źródłem zniekształceń harmoniczných prądu, który powoduje zniekształcenia napięcia w sieci zasilania

Fig 1. Non-linear receiver sources of current harmonic distortion, which causes voltage distortion in the power supply



Rys. 2. Zespół prostownikowy typu PK 17/3,3-3, o danych znamionowych: prąd 1 700 A, napięcie wyjściowe 3 300 V. Prostownik z zastosowanym typem diod D200/1200. Liczba diod w zespole 288 sztuk

Fig 2. PK 17 / 3,3-3 rectifier unit with nominal data: current 1 700 A, output voltage 3 300 V. Silicon rectifier with diode type D200 / 1200. Number of diodes in 288 units

Urządzenie pomiarowe PQM 701Z podłączone zgodnie z rys. 3.

Wykonano pomiary na podstacji trakcyjnej zgodnie z niżej opisanymi danymi:

### Pomiar 1

Zasilanie podstacji trakcyjnej napięciem 20 kV poprzez linię zasilającą.

Pomiar napięcia przez przekładniki napięciowe  $20\ 000 \sqrt{3} / 100 \sqrt{3}$  [V]

Pomiar prądu przez przekładniki prądowe  $200 / 5$  [A]

### Pomiar 2

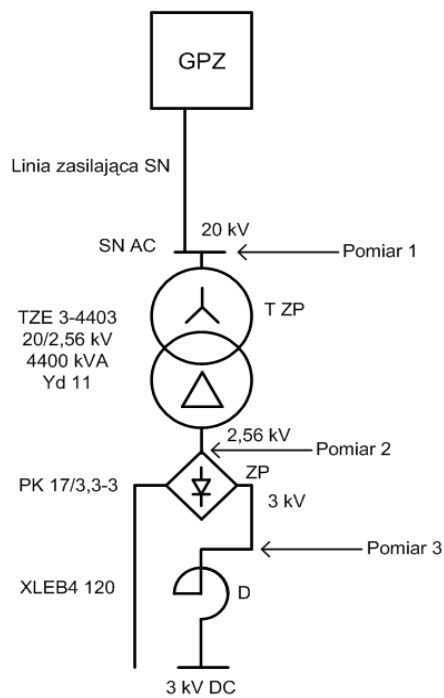
Pomiar napięcia przez przekładniki napięciowe  $6\ 000 \sqrt{3} / 100 \sqrt{3}$  [V] (rys. 4)

Pomiar prądu przez cęgi prądowe przyrządu PQM 701Z [A]

### Pomiar 3

Pomiar napięcia bezpośrednio [V]

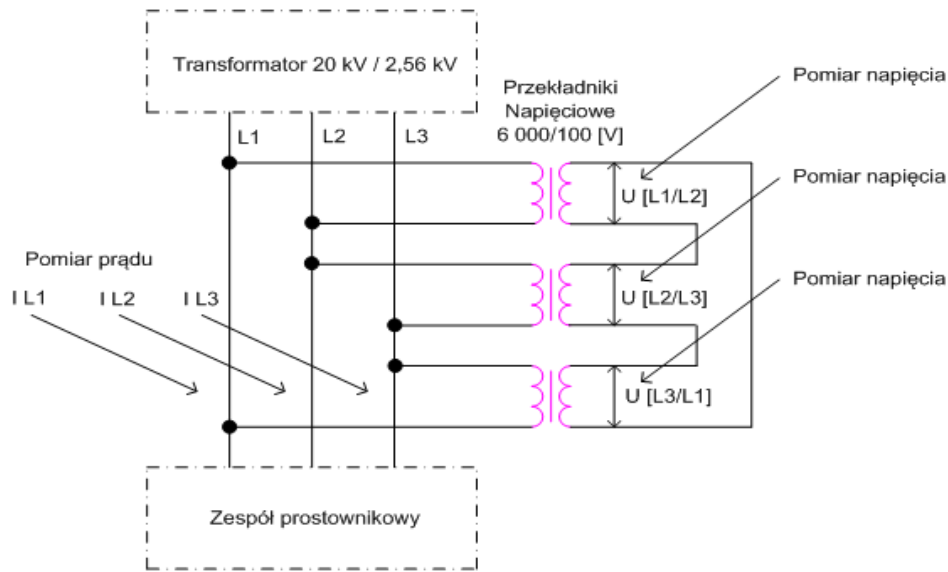
Pomiar prądu przez cęgi prądowe przyrządu PQM 701Z [A]



Rys. 3. Schemat ideowy podstacji trakcyjnej

Fig 3. Schematic diagram of the traction substation





Schemat układu pomiarowego - pomiar 2

Rys. 4. Schemat podłączenia przekładników napięciowych - pomiar 2  
 Fig 4. Connection diagram of voltage transformers - measurement 2

Analizując wyniki pomiarów stwierdzono, że zawartość wyższych harmonicznych prądu, podczas awaryjnej pracy podstacji trakcyjnej, znacznie przekracza dopuszczalne wartości określone w dokumentach normatywnych. Awaryjna praca podstacji trakcyjnej polega na tym, że po uszkodzeniu elementów urządzenia wygładzającego, nastąpiło jego odłączenie przez obsługę w rozdzielni 3000 V prądu stałego. Szczegółowe dane zawartości harmonicznych prądu THDi przedstawione na rys. 8 zawierają się w granicach od 22,8 do 25,8 [%]. Wartości harmonicznych prądu uzyskane z pomiarów porównano ze standardem IEEE 519 [1], które przedstawiono w tabl. 1. W celu ograniczenia negatywnego wpływu harmonicznych odbiorników nieliniowych, szczególnie dla spełnienia wymagań wg IEEE-519 [1], należy zastosować dodatkowe filtry lub inne układy do kompensacji mocy odkształconej. Innym sposobem zmniejszania zawartości harmonicznych jest wymiana zespołów prostownikowych na prostowniki ze zwiększoną liczbą pulsów np. z 6 na 12. Powoduje to znaczny wzrost kosztów budowy układu zasilania, lecz jest to niezbędne w celu zapewnienia zmniejszenia strat energii elektrycznej oraz zmniejszenia prawdopodobieństwa uszkodzeń szczególnie wrażliwych odbiorców energii elektrycznej, tabela 2 i 3.

Tabela 1. Wykaz dopuszczalnych poziomów zawartości harmonicznych nieparzystych prądu wg IEEE-519

Table 1. List of permissible levels of harmonic content of odd currents according to IEEE-519

I <sub>zw</sub> /I <sub>obc</sub>	<20	20...50	50...100	100...1000	>1000
THDi dla n<11	4%	7%	10%	12%	15%
THDi	5%	8%	12%	15%	20%

W tabeli 1 dla standardu IEEE-519 [1] podano wykaz dopuszczalnych poziomów zawartości harmonicznych nieparzystych prądu dla nieliniowych obciążeń w sieciach TN, które współpracują z innymi obciążeniami o napięciach od 120 V do 69 000 V.

Tab. 2. Wykaz dopuszczalnych poziomów zawartości harmonicznych napięcia wg IEEE-519.

Table 2. Permissible levels of harmonic voltage levels according to IEEE-519.

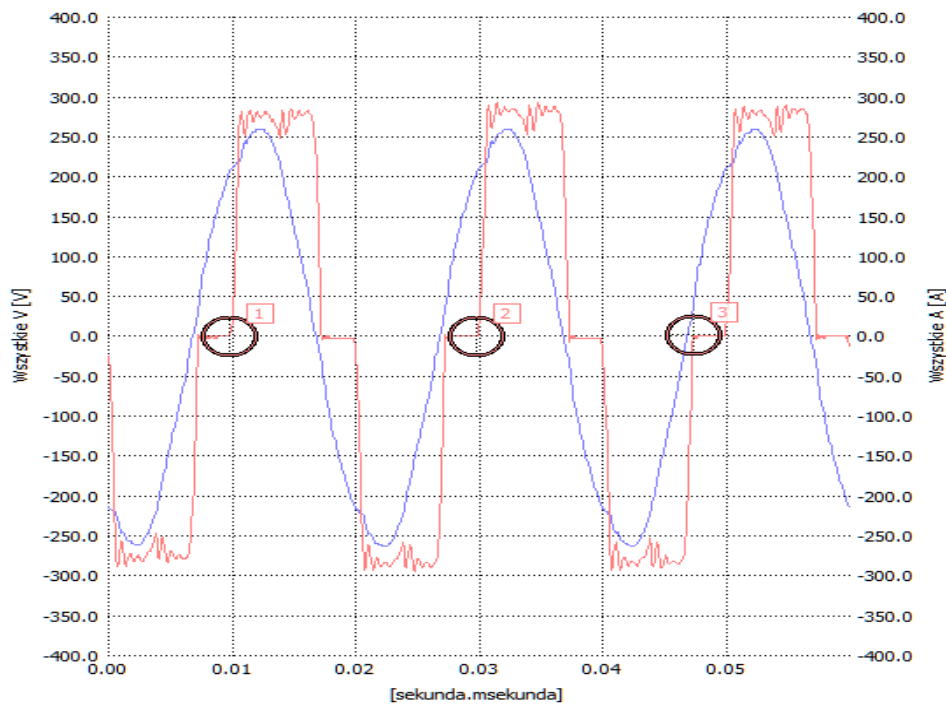
Wrażliwości odbiorów	THDu (%)
Bardzo wrażliwe: lotniska, szpitale	3%
Średnio wrażliwe: Szkoły, biura	5%
Mało wrażliwe: Fabryki	10%

Tab. 3. Wykaz dopuszczalnych poziomów zawartości harmonicznych napięcia THDu w/g różnych norm

Table 3. List of permissible harmonic levels of THD voltage in various standards

	THDu	Zawartość pojedynczej harmonicznej (U <sub>n</sub> /U <sub>1</sub> ) x 100%
IEEE-519	5%	3%
PN-EN 50160	8%	1,5 - 6%

Po analizie zawartości wyższych harmonicznych napięcia oraz prądu można stwierdzić, że wyższe harmoniczne powinny zawierać się w zakresach podanych w tabeli 3 (dodatkowe informacje o poziomach zawartości harmonicznych podano w tabelach 1 i 2). Zwiększona ilość wyższych harmonicznych, szczególnie ponad dopuszczalne wartości określone w dokumentach normatywnych, powoduje bardzo negatywny wpływ na jakość energii elektrycznej i jest bezpośrednim powodem uszkodzenia innych odbiorników, przegrzewania się transformatorów oraz uszkodzeń kabli zasilających. Na podstawie analizy rys. 5 i 7 widać, iż w trakcie pobierania energii elektrycznej z sieci przez podstację trakcyjną prąd jest niesinusoidalny. Odkształcony prąd rozłożono na składowe przedstawione na rys. 6. Składowe te są prądami o częstotliwościach będących wielokrotnością częstotliwości podstawowej. Częstotliwości te są nazywane wyższymi harmonicznymi, które przedstawione na rys. 6 i 10, wskazują wpływ prostownika 6-cio pulsowego jako przyczynę pojawiania się harmonicznych charakterystycznych prądu.



Rys. 5. Przebieg napięcia i prądu na linii zasilającej 20 kV (pomiar 1). Przebieg prądu – kolor czerwony. Przebieg napięcia – kolor niebieski

Fig 5. Voltage and current waveform on the 20 kV power line (measurement 1). Current wave - red. Voltage range - blue

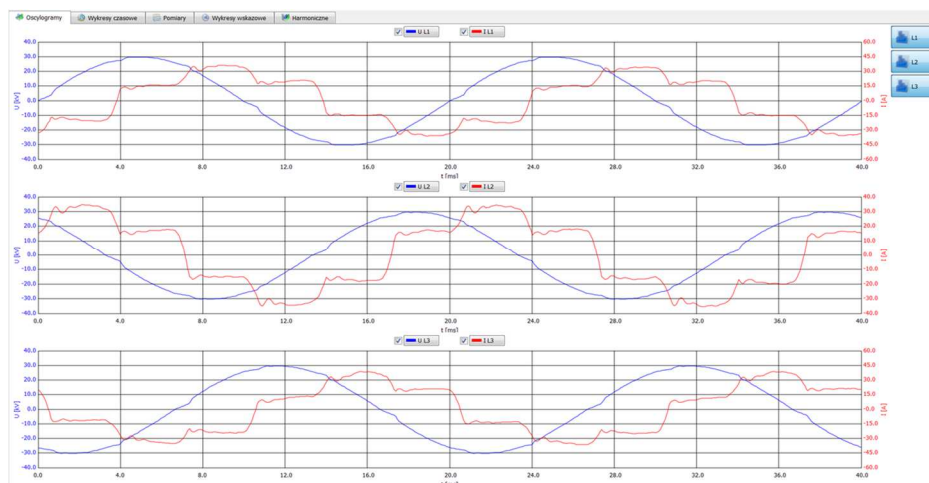
W trakcie poboru energii elektrycznej przez odbiorniki dużej mocy pojawiają się również w sieci zasilającej odkształcenia napięcia. W tym przypadku każdy przyłączony do tej sieci odbiorca będzie zasilany zniekształconym napięciem, na co dystrybutor energii elektrycznej bezwzględnie musi zwracać uwagę [4, 6, 7]. Urządzenia kolejowe, szczególnie te, od których zależy bezpieczeństwo prowadzenia ruchu pociągów, muszą być bezwzględnie zasilane energią elektryczną o właściwych parametrach [11].

W podstacjach trakcyjnych dla poprawy jakości energii elektrycznej stosuje się standardowo urządzenia wygładzające. Wyższe harmoniczne prądu i napięcia, występujące po obydwu stronach zespołu prostownikowego, wywierają szkodliwe oddziaływania na inne urządzenia lub linie np. telekomunikacyjne.



Rys. 6. Wartości wyższych harmonicznych (pomiar 1). ↑ - oznaczenie harmonicznych charakterystycznych

Fig 6. Higher Harmonic Values (Measurement 1). ↑ - characterization of harmonics



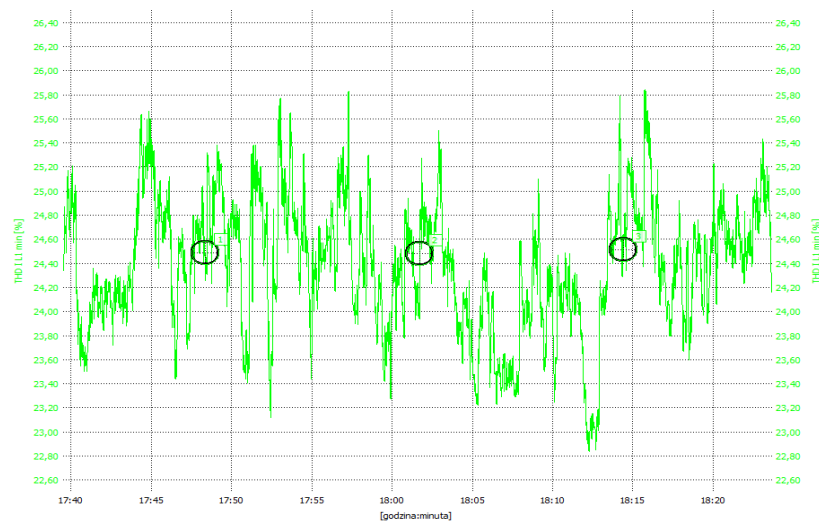
Rys. 7. Zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu zespołu prostownikowego w podstacji trakcyjnej (pomiar 2)

Fig 7. Recorded voltage and current flows of rectifier unit in traction substation (measurement 2)

Dla zakłóceń przekazywanych do sieci trakcyjnej po stronie rozdzielni prądu stałego stosuje się urządzenia wygładzające. Zwykle są to rezonansowe urządzenia wygładzające (LC) z członem aperiodycznym (C). Urządzenia wygładzające współpracują z bezrdzeniowym dławikiem, który o stałej, niezależnej od prądu indukcyjności, włączony jest szeregowo w tor prądowy z reguły o biegunowości dodatniej, za zespołem prostownikowym. W przypadku uszkodzenia elementów mających za zadanie poprawę jakości energii elektrycznej na podstacji trakcyjnej, tzw. „urządzenia wygładzające”, może wystąpić pogorszenie jakości energii elektrycznej. Powodem uszkodzenia elementów urządzeń wygładzających może być wpływ wyższych harmonicznych na kondensatory. Fakt ten wynika z fizycznych właściwości kondensatora tzn. jego reaktancji.

Kondensator, którego opór bierny pojemnościowy jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości harmonicznej prądu przepływającego przez niego, powoduje iż dla każdej wyższej częstotliwości harmonicznej jego reaktancja znacząco maleje. Na skutek przeciążenia kondensatorów prądami większymi od wartości prądu wskazanego na tabliczce znamionowej następuje ich uszkodzenie. Powodem takiego zjawiska jest m. in. wpływ zespołów prostownikowych oraz odbiorników podłączonych do podstacji trakcyjnej. Pomiary zostały wykonane analizatorem jakości zasilania PQM-701Z.

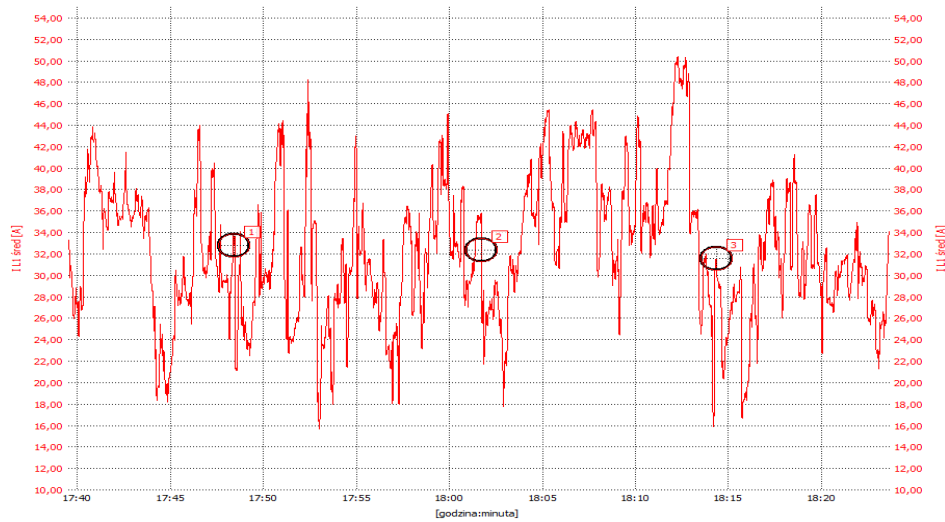
Na rysunku 8 przedstawiono zarejestrowane przebiegi THD i L-1 od wartości 22,83 % do wartości 25,83 %.



Rys. 8. Zarejestrowane przebiegi THD i L-1 (pomiar 2) w podstacji trakcyjnej

Fig 8. Recorded THD and L-1 waveforms (measurement 2) in the traction substation

Na rysunku 9 przedstawiono zarejestrowane przebiegi I L-1 od wartości 15,90 A do wartości 50,40 A.



Rys. 9. Zarejestrowane przebiegi I L-1 (pomiar 2) w podstacji trakcyjnej  
Fig 9. Recorded I L-1 (measurement 2) in the traction substation

Na rys. nr 10 przedstawiono zarejestrowane przebiegi  $I_H$  L-1. Harmoniczne charakterystyczne dla prostownika 6-cio pulsowego.



Rys. 10. Zarejestrowane przebiegi  $I_H$  L-1 (pomiar 2) w podstacji trakcyjnej.  
Fig 10. Recorded  $I_H$  L-1 waveforms (measurement 2) in the traction substation.

### 3. Wnioski

Zasilanie urządzeń energetyki trakcyjnej oraz nietrakcyjnej na terenie PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. jest realizowane poprzez podstacje trakcyjne. W celu zapewnienia bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego należy spełnić wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej. Urządzenia energetyki nietrakcyjnej zasilane są z rozdzielni prądu przemiennego podstacji trakcyjnej, a zasilanie sieci trakcyjnej po transformacji napięcia przemiennego na napięcie stałe odbywa się poprzez transformatory oraz zespoły prostownikowe podstacji trakcyjnej. W takich zespołach prostownikowych efektem niepożądanym jest pojawianie się wyższych harmonicznych napięcia oraz prądu. Harmoniczne te przenoszą się do dostawcy energii elektrycznej poprzez linie zasilające podstację trakcyjną. Dodatkowo odbiorcy energii elektrycznej przyłączeni do LPN (linii potrzeb nietrakcyjnych) oraz pojazdy trakcyjne zasilane (poprzez sieć trakcyjną) z podstacji trakcyjnej również są narażeni na negatywne oddziaływanie wyższych harmonicznych na swoje urządzenia. W celu zmniejszenia negatywnego oddziaływania wyższych harmonicznych stosuje się dławiki, filtry pasywne rezonansowe oraz aktywne. Działania te są niezbędne, aby współczynnik zawartości wyższych harmonicznych napięcia i prądu (THD) nie powodował szkodliwego oddziaływania na sieć energetyczną oraz odbiory podłączone do nich.

W podstacjach trakcyjnych często występują uszkodzenia urządzeń wygładzających. Pomiar jakości energii elektrycznej zostały wykonane na podstacji trakcyjnej, gdzie urządzenie wygładzające zostało odłączone przez obsługę z powodu uszkodzenia. Pomiar jakości energii elektrycznej wykazały bardzo znaczne przekroczenie poziomów normatywnych zawartości wyższych harmonicznych.

### Literatura

- [1] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Std 519-2014.
- [2] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE 1459-2010
- [3] Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej. Część 4. Wyższe harmoniczne napięć i prądów.
- [4] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997r. z późniejszymi zmianami Prawo energetyczne Dz.U. z 2012r., poz. 1059. Z 2013r., poz. 984 i poz.1238, z 2014r., poz. 457, poz. 490, poz. 900, poz. 942, poz. 11010, poz. 1662 oraz z 2015r. poz. 151, poz. 478 i poz. 942.
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych zasad funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 r. Nr 93, poz. 623, z późn. zm.) s. 5665-5668.

- [6] PN-EN 50121-2: 2004. Zastosowania kolejowe. Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie.
- [7] Standardy techniczne – szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości  $V_{max} \leq 200$  km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem). Warszawa 2009.
- [8] PN-EN 61000-3-2 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3-2: Poziomy dopuszczalne - Poziomy dopuszczalne emisji harmoniczných prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika  $\leq 16$  A).
- [9] PN-EN 61000-3-12 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3-12: Dopuszczalne poziomy – Dopuszczalne poziomy harmoniczných prądów powodowanych działaniem odbiorników, które mają być przyłączone do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia z fazowym prądem zasilającym odbiornika  $> 16$  A i  $\leq 75$  A.
- [10] PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych się ciach elektroenergetycznych s.13.
- [11] Żelazny R.: Urządzenia elektrycznego ogrzewania rozjazdów oraz oświetlenia zewnętrznego na terenie PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. ZESZYTY NAUKOWE Politechniki Rzeszowskiej. Tom XXV zeszyt 36 (nr 2/2017).

## **QUALITY OF ELECTRICITY IN POWER LINES FOR RECEIVERS PKP POLISH RAILWAY LINES S.A.**

### **S u m m a r y**

The article presents definitions resulting from current legal and technical conditions. Problems related to the quality of electric power in traction substations during emergency operation are also presented. The emergency condition causes irregularities which result in disturbances being introduced into the supply network and loads supplied from traction substations. In addition, the influence of the occurrence of current harmonics on the operation of selected electricity reflections as well as the methods of its reduction are presented. The basic requirements regarding the quality of electricity in PKP Polish Railway Lines S.A. were mentioned.

**Keywords:** Traction substation, higher current harmonics, rectifier unit.

DOI: 10.7862/re.2018.3

*Tekst złożono w redakcji: grudzień 2017*

*Przyjęto do druku: grudzień 2017*



**Kamil KOŁODZIEJ**<sup>1</sup>

## **ANALIZA OGRANICZANIA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH NIELINIOWYCH ODBIORNIKÓW PRZY WYKORZYSTANIU FILTRU AKTYWNEGO**

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów związane z ograniczaniem wyższych harmonicznych nieliniowych odbiorników energii elektrycznej przy wykorzystaniu filtru aktywnego. Na wstępie artykuł omawia zagadnienia związane z problematyką filtracji wyższych harmonicznych przy wykorzystaniu filtrów pasywnych i aktywnych w sieciach 0,4 kV. W punkcie tym dokonano krótkie porównanie możliwych typów filtrów oraz ich charakterystycznych cech. Kolejno przedstawione zostały analityczne rozważania dotyczące filtracji wyższych harmonicznych w sieci trójfazowej, czteroprzewodowej przy wykorzystaniu filtru aktywnego, które mają na celu przedstawienie zasady generowania napięć przez filtr aktywny oraz ukazanie złożoności procesu filtracji wyższych harmonicznych. Przy tym przedstawiony i omówiony został schemat wydzielonej części instalacji przemysłowej, która poddana została analizie przy wykorzystaniu analizatorów sieci PM870 a także oscyloskopu cyfrowego z możliwością analizy FFT. W celu zbierania danych z analizatorów wykorzystany został zainstalowany na obiekcie system BMS, który pozwolił na zebranie dużej liczby wartości pomiarowych. Dzięki zebranym danym możliwe było określenie poziomów wartości asymetrii napięć oraz prądów, a także zawartości THD w przebiegach prądów przed oraz za filtrem wyższych harmonicznych. Pozwoliło to na ukazanie realnego oddziaływanie filtru. Poza tym dokonano analizy FFT, na podstawie której można zaobserwować oraz określić udział poszczególnych harmonicznych w tych przebiegach. Analiza ta pozwoliła również na określenie wpływu odzysku energii przy wykorzystaniu prądnic asynchronicznych z układami przekształtnikowymi na jakość energii elektrycznej. Dzięki uzyskanym wynikom pomiarów możliwe było określenie wpływu filtracji aktywnej na daną część sieci, a także udzielenie odpowiedzi na pytanie czy stosowanie tego typu filtracji jest potrzebne, a może wręcz niezbędne. Artykuł kończy się zebraniem wniosków z przeprowadzonej analizy oraz podsumowaniem.

**Słowa kluczowe:** wyższe harmoniczne, filtracja aktywna, jakość energii elektrycznej, FFT, BMS

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Kamil Kołodziej, Nienadówka 30, 36-050 Sokołów Małopolski, adres e-mail: kamil2222pl@wp.pl

## 1. Wprowadzenie

Od wieków obserwuje się ciągły rozwój nauki i techniki, co przekłada się na znaczący postęp w dziedzinach takich jak elektrotechnika czy elektronika. Rozwój ten niesie za sobą opracowywanie coraz to nowych urządzeń, które są implementowane w wielu obszarach przemysłu czy życia codziennego. Urządzenia te ze względu na swoją budowę wewnętrzną często są nieliniowymi odbiornikami energii elektrycznej. Oznacza to, że pobierają z linii elektroenergetycznej głównie niskich napięć prądy odkształcone o dużej zawartości harmonicznych. Odkształcenia prądów oraz ich asymetria powodują z kolei odkształcenia napięć zasilających oraz wzrost strat mocy w urządzeniach elektroenergetycznych. Wszystko to powoduje pogorszenie parametrów sieci elektroenergetycznej, czym stwarza realne zagrożenie nieprawidłową pracą a nawet uszkodzeniem urządzeń wrażliwych na zakłócenia.

Jednym ze sposobów ograniczenia tego efektu jest stosowanie przeznaczonych do tego celu filtrów wyższych harmonicznych. Filtry te mogą być budowane jako filtry pasywne, aktywne bądź hybrydowe. Filtry pasywne zbudowane są w oparciu o dławiki LC dobierane na tłumienie wybranych harmonicznych. Dzięki zjawisku rezonansu dla wybranej częstotliwości tłumionej harmonicznej impedancja obwodu jest bliska 0, co powoduje „wycinanie” danej harmonicznej z przebiegu prądu. Wadą tych filtrów jest natomiast brak możliwości samoczynnej regulacji zmieniającego się poziomu zniekształceń, co jest możliwe w przypadku filtrów aktywnych, oraz dodatkowe obciążenie podstawowej harmonicznej źródła zasilania. Poza tym występuje również ryzyko wystąpienia niepożądanego rezonansu pojemnościowych kompensatorów mocy biernej.

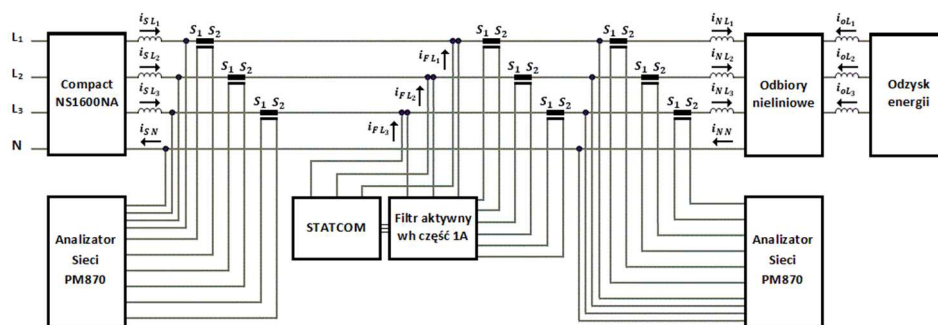
Tak więc oczywistym staje się, że stosowanie filtrów aktywnych bądź hybrydowych jest bardziej efektywnym rozwiązaniem w stosunku do filtrów pasywnych. Filtry te mogą być instalowane szeregowo (SAPF, ang. Serial Active Power Filter) lub równoległe (PAPF, ang. Parallel Active Power Filter) względem sieci zasilającej dany odbiornik nieliniowy lub ich zespół.

Filtry aktywne szeregowo stosowane są stosunkowo rzadko ze względu na fakt, że kompensacja prądów zasilających odbywa się przez odkształcenie napięć po stronie nieliniowego odbiornika. Dodatkowo połączenie to wymusza stosowanie dodatkowych zabezpieczeń przed prądami zwarciovymi sieci zasilającej, które zamykają się przez transformator filtru. Inaczej wygląda to w przypadku równoległych aktywnych filtrów wyższych harmonicznych. Dzięki zastosowaniu równoległego połączenia filtr zostaje uniezależniony od zmian obciążenia nieliniowych odbiorników oraz zmian struktury systemu energetycznego na danym obiekcie, dzięki czemu nie wpływa na strukturę sieci [1][2].

Przechodząc do zastosowań filtry aktywne równoległe znajdują szerokie zastosowanie wszędzie tam, gdzie pożądanym staje się ograniczenie wpływu wyższych harmonicznym odbiorników nieliniowych na sieć zasilającą. Szczególne zastosowanie znajdują w obszarach przemysłowych czy centrach R&D, gdzie występują obszary oraz urządzenia, których współczynnik zawartości harmonicznym THD (ang. Total Harmonic Distortion) przekracza niejednokrotnie 100%.

## 2. Analityczne rozważania dotyczące filtracji wyższych harmonicznym przy wykorzystaniu filtru aktywnego

Aby można stwierdzić na jakim poziomie kształtuje się zawartość współczynnika THD w danej sieci elektrycznej oraz czy koniecznym staje się zastosowanie filtracji wyższych harmonicznym należy dokonać analizy sieci. Analiza ta pozwala na określenie występujących harmonicznym oraz ich wartości występujących w prądach nieliniowych odbiorników energii elektrycznej. Należy jednak zaznaczyć, że dla zakłóceń aperiodycznych tego typu analiza daje jedynie przybliżoną wiedzę na temat widma częstotliwościowego. Fakt ten sprawia, że po instalacji filtru wyższych harmonicznym koniecznym staje się wykonanie ponownej analizy. W celu określenia efektywności oraz zasadności instalacji filtru aktywnego wyższych harmonicznym przeprowadzono badania na terenie Centrum Technicznego BorgWarner Poland Sp.z.o.o. z siedzibą w Jasionce 950. Badania zostały wykonane na części instalacji elektrycznej jak na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat instalacji elektrycznej z aktywną filtracją wyższych harmonicznym oraz statyczną kompensacją w zakładzie przemysłowym BorgWarner Poland Sp.z.o.o.

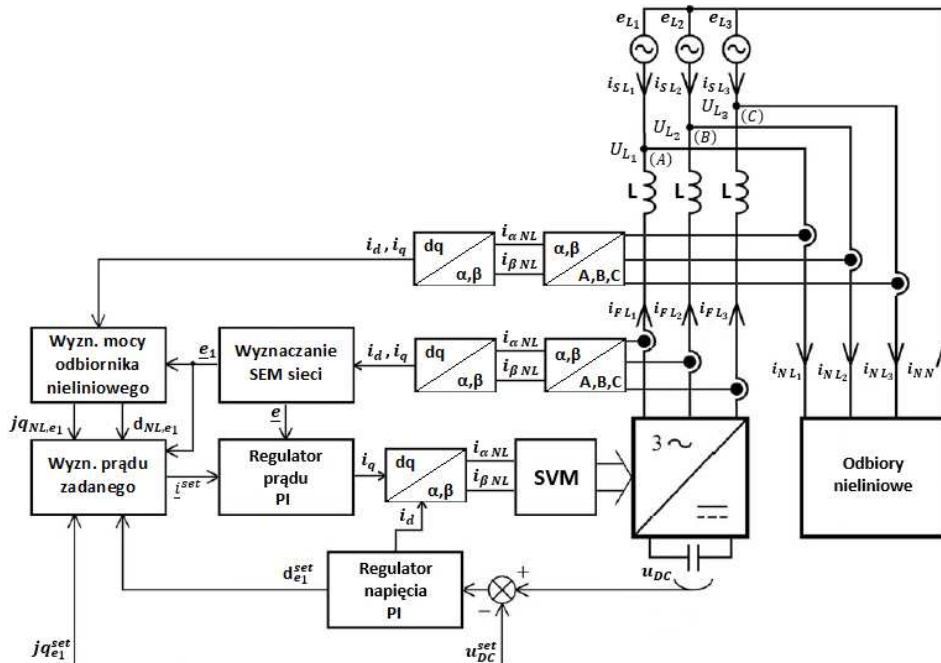
Fig. 1. Diagram of electrical installation with active filtration of higher harmonics and static compensation in the BorgWarner Poland industrial plant

Badaniu poddano sieć elektryczną przed filtrem (od strony sieci) oraz po filtrze (od strony odbiorników nieliniowych) typu AccuSine PCS120Y4IP20U

produkcji Schneider Electric. Filtr ten składa się z części A, w której występuje energetyczny filtr aktywny oraz części B STATCOM-a (Static Compensator). Układy połączone są ze sobą magistralą komunikacyjną oraz wpięte równolegle w jednym punkcie do sieci elektrycznej jak to pokazano na rysunku 1.

Z uwagi na znaczną ilość zagadnień związane z omówieniem EFA oraz STATCOM-u w artykule zostanie omówiona jedynie część związana z EFA. W kolejnym artykule przewiduje się omówienie części B związanej ze stabilizacją napięcia poprzez wykrywanie i kompensację wahań napięcia, a także kontrolowanie współczynnika mocy.

Aby zatem lepiej zrozumieć budowę oraz zasadę działania EFA na rysunku 2 przedstawiono przykładowy schemat blokowy tego typu filtru.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania równoległego filtru aktywnego, na podstawie [3]

Fig. 2. Block diagram of the active filter parallel control system, based on [3]

Jak można zaobserwować układ składa się z kilku kluczowych bloków. Na wstępie dokonywane jest wyznaczenie wektorów napięć  $e_{L1}$ ,  $e_{L2}$ ,  $e_{L3}$  w nieruchomym układzie współrzędnych naturalnych A,B,C. Następnie wielkości te z trójfazowego układu współrzędnych przekształcane są na dwufazowy układ współrzędnych ortogonalnych  $\alpha$  oraz  $\beta$ . Współrzędne te można przekształcić na współrzędne  $\alpha$ ,  $j\beta$  oraz  $0$  za pomocą transformacji Clarka

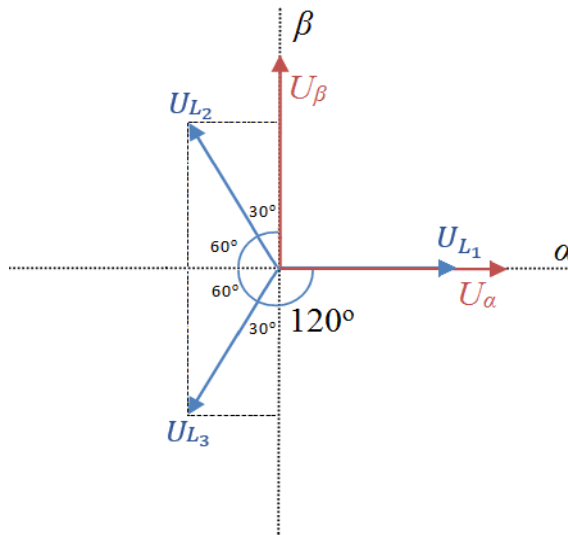
oznaczonej przez  $T_{\alpha,\beta,0}$  przyjmując kierunek wirowania przeciwny do ruchu wskazówek zegara z zależności:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}_\alpha \\ \mathbf{e}_\beta \\ \mathbf{e}_0 \end{bmatrix} = T_{\alpha,\beta,0} * \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{L_1} \\ \mathbf{e}_{L_2} \\ \mathbf{e}_{L_3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie

$$T_{\alpha,\beta,0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Co wynika z zależności geometrycznych przedstawionych na rysunku 2.

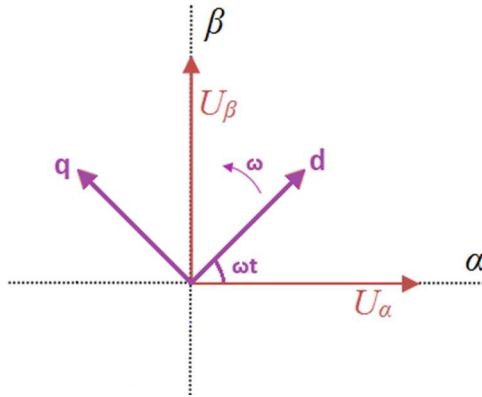


Rys. 3 Wektory napięć fazowych w układzie współrzędnych nieruchomych  $\alpha, \beta$

Fig. 3 Vectors of phase voltages in the immovable coordinate system  $\alpha, \beta$

Następnie stosowane jest przekształcenie Parka polegające na sprowadzeniu współrzędnych fazowych  $U_{L_1}, U_{L_2}, U_{L_3}$  z rysunku 3 do układu współrzędnych  $(d, q, 0)$ , wirujących z prędkością  $\omega$  (kąt między osią  $d$  oraz  $\alpha$  wynosi  $\omega t$ ), tak aby współrzędne były nieruchome względem siebie, co pokazano

na rysunku 4 [3]. Tak więc przy przeniesieniu z jednego układu do drugiego zmianie ulega kąt wektorów.



Rys. 4. Układ współrzędnych d, q w układzie współrzędnych nieruchomych  $\alpha, \beta$

Fig. 4. Coordinate system d, q in the immovable coordinate system  $\alpha, \beta$

Tak więc współrzędne  $\alpha, \beta$  mogą zostać sprowadzone do współrzędnych  $d, q$  za pomocą równania:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * T_{\alpha,\beta,0} * \begin{bmatrix} e_{L1} \\ e_{L2} \\ e_{L3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

lub

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{L1} \\ e_{L2} \\ e_{L3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Co wynika z zależności geometrycznych przedstawionych na rysunku 4.

Przy wyznaczaniu napięć  $U_f = [U_{L1}; U_{L2}; U_{L3}]$  generowanych przez falownik w celu ograniczenia harmonicznych prądów odbiorników nieliniowych można skorzystać z zależności:

$$U_f = K * I_{Sh} + D * I_{Nh} \quad (5)$$

gdzie:  $I_{Sh}, I_{Nh}$ - odpowiednio wyższe harmoniczne prądów sieci oraz nieliniowych odbiorników;  
 $K, D$ - współczynniki impedancyjne.

Aby wyznaczyć współczynniki  $K, D$  należy w pierwszej kolejności wyznaczyć wyższe harmoniczne prądów  $I_{Sh}$  oraz  $I_{Nh}$ . Przy obliczeniach dodatkowo zakłada się, że wyższe harmoniczne napięć sieciowych są równe 0 co oznacza idealne źródło napięciowe. Z twierdzenia o napięciu międzywęzłowym (Millmana) dla węzłów (A), (B), (C) łączących w sobie gałęzi sieci zasilającej, nieliniowych odbiorników oraz falownika filtra aktywnego można napisać wzór na wyższe harmoniczne napięcia tych węzłów

$$U_{A,B,C} = [U_{L_1}; U_{L_2}; U_{L_3}]:$$

$$U_{A,B,C} = \frac{U_f * \frac{1}{Z_F} - I_{Nh}}{\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_F}} = -Z_s * I_{Sh} \quad (6)$$

gdzie:  $U_f$ - napięcia generowane przez falownik;

$I_{Sh}, I_{Nh}$ - odpowiednio wyższe harmoniczne prądów sieci oraz nieliniowych odbiorników;

$Z_s, Z_F$ - odpowiednio impedancje sieci zasilającej oraz filtra aktywnego [4].

Wzór 6 pozwala na wyznaczenie napięć generowanych przez falownik filtra aktywnego. Aby go jednak zastosować konieczne są dalsze obliczenia analityczne, które z uwagi na ich objętość oraz objaśnienia im towarzyszące pominięto w dalszej części artykułu. Bazą do ich opracowania jest rozdział 5.23 pt. Energetyczne filtry hybrydowe z pozycji literaturowej nr.3.

### 3. Analiza oraz ograniczenie THD w sieci przemysłowej

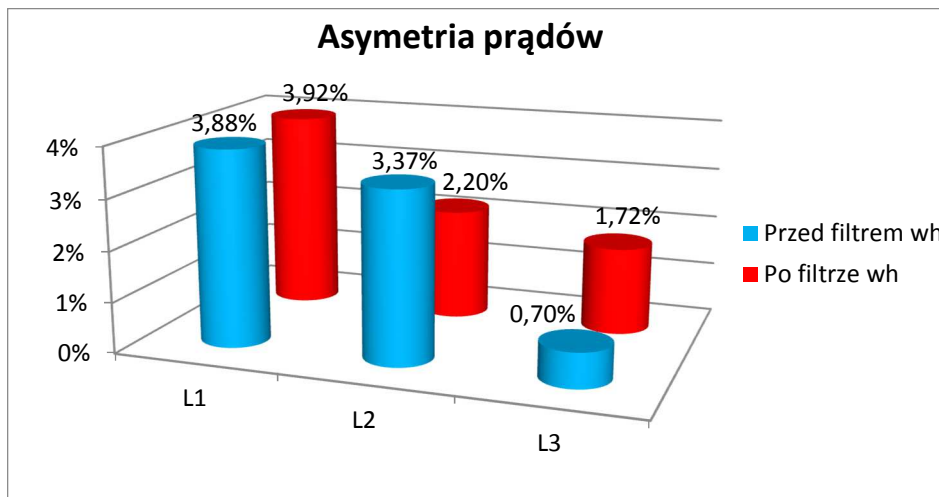
W celu sprawdzenia funkcjonalności filtra wyższych harmonicznych dokonano więc analizy przy wykorzystaniu analizatorów sieci PM870 zainstalowanych jak na rysunku 1 oraz systemu BMS (Building Management System) firmy Schneider Electric. Analizatory PM870 pozwalają na rejestrowanie amplitud i kątów poszczególnych harmonicznych do 63-ciej harmonicznej z rozdzielczością 128 próbek na okres. Badania dokonano w terminie 15-21.01.2018. Pomiary wykonano dla analizatora przed oraz za filtrem z okresem jednej minuty (co daje w sumie 251 950 wartości pomiarowych) takich wartości jak:

- asymetrię prądów w poszczególnych fazach;
- asymetrię napięć fazowych;

- THD prądów w poszczególnych fazach oraz przewodzie neutralnym;
- THD napięć fazowych;

Dodatkowo podczas pomiarów w pewnych okresach czasowych występował odzysk energii z komór testowych realizowany poprzez silniki asynchroniczne napędzane przez silniki spalinowe testowane w Centrum Technicznym oraz odpowiednie układy przekształtnikowe z tranzystorami IGBT. W chwilach tych kierunek przepływu prądu był od odzysku w kierunku sieci. Z uwagi na pracę prądnic asynchronicznych w dużym zakresie zmian prędkości obrotowej na wyjściu prądnic zastosowano dedykowane do tego celu układy przekształtnikowe.

Na podstawie wartości średnich arytmetycznych pomiarów z okresu tygodnia dokonano analizy wykresów słupkowych mierzonych wartości jak poniżej.



Rys. 5. Wykres słupkowy asymetrii prądów w badanej sieci

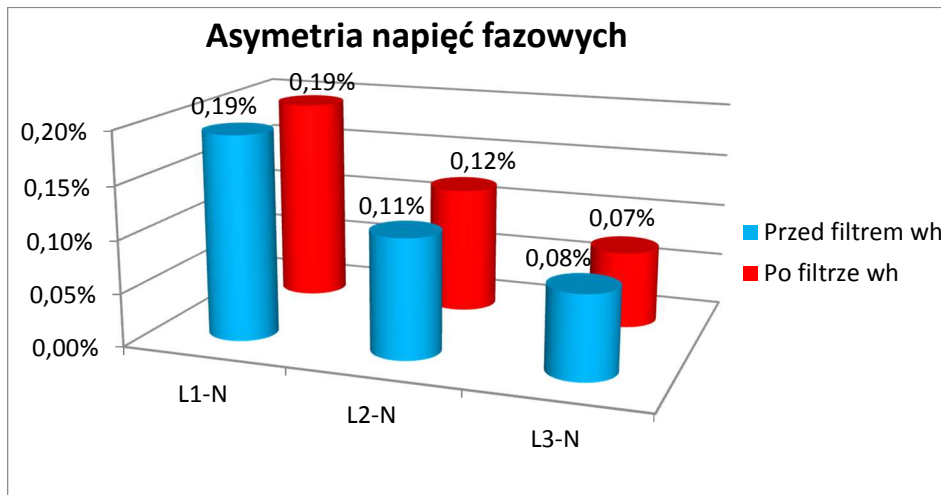
Fig. 5. The current asymmetry bar graph in the tested installation

Rysunek 5 przedstawia wartości asymetrii prądów przed oraz po filtrze aktywnym. Przy analizie asymetrii prądów należy nadmienić, że wartości te wyznaczone są jako wartości równe stosunkowi różnicy prądu fazowego do średniej prądu wszystkich faz. Z rysunku 5 wynika, że obciążenie poszczególnych faz nie jest równomierne. Różnice te są natomiast nieznaczne.

Rysunek 6 pokazuje natomiast, że asymetria napięć przed i po filtrze utrzymuje się na niemal takim samym poziomie, co świadczy o tym, że nie ma on wpływu na asymetrię napięć w sieci. Asymetria napięć to stan w systemie wielofazowym, w którym wartości skuteczne napięć międzyfazowych (składowa

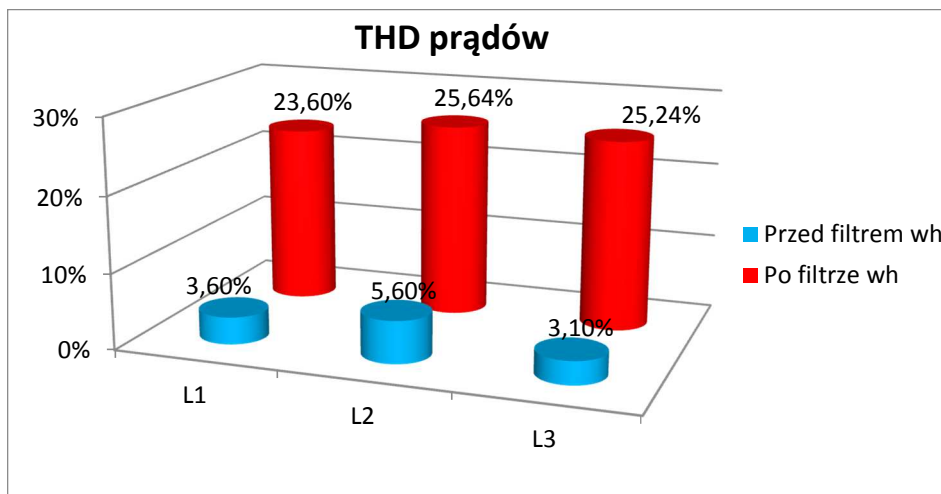


podstawowa) lub kąty fazowe między kolejnymi napięciami międzyfazowymi nie są równe.



Rys. 6. Wykres słupkowy asymetrii napięć fazowych w badanej sieci

Fig. 6. Bar graph of the phase voltage unbalance in the tested installation



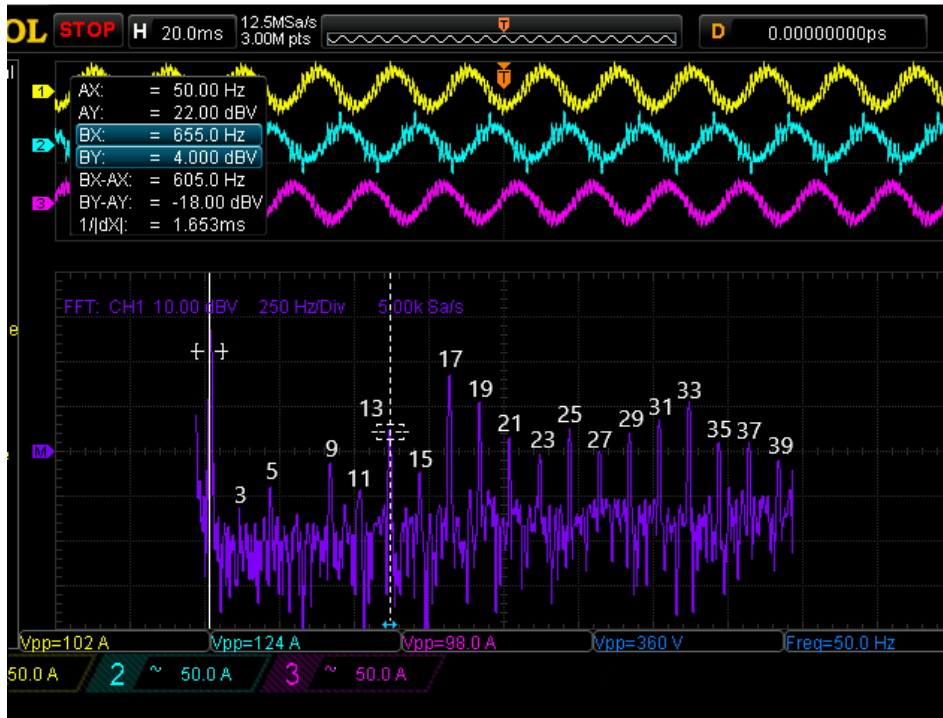
Rys. 7. Wykres słupkowy współczynnika zniekształceń harmoniczných prądów w poszczególnych fazach badanej sieci

Fig. 7. Bar graph of the harmonic distortion coefficient of currents in individual phases of the tested installation

Jak widać na rysunku 7 współczynnik zawartości THD w przebiegach prądów po filtrze aktywnym kształtuje się na znacznie wyższym poziomie niż przed filtrem co potwierdza prawidłowe działanie filtru. Przy analizie wartości związanych z zawartością THD w przebiegach prądów określono również wpływ odzysków energii na parametry sieci. W tym celu wyselekcjonowano wartości pomiarowe współczynnika THD dla poszczególnych prądów dla chwil czasowych kiedy  $\cos \varphi$  był dodatni (brak odzysku energii) oraz kiedy był ujemny (odzysk energii).

Z analizy tych wyników wynika, że podczas odzysku energii zawartość THD utrzymywała się na poziomie 24-30%. Wartości te pokazują, że odzysk ten powoduje nieznaczne zwiększenie zawartości wyższych harmonicznnych w stosunku do chwil, kiedy odzysk nie występuje.

Aby potwierdzić zawartość wyższych harmonicznnych w przebiegach prądów nieliniowych odbiorników dokonano analizy FFT fazy L1, którą przedstawiono na rysunku 8. W celu uwidocznienia wyższych harmonicznnych analiza została wykonana w skali decybelowej oraz przy wykorzystaniu okna Hanninga.



Rys. 8. Przebiegi prądów oraz analiza FFT prądu w fazie L1 nieliniowych odbiorników

Fig. 8. Current waveforms and FFT analysis of L1 current in non-linear loads

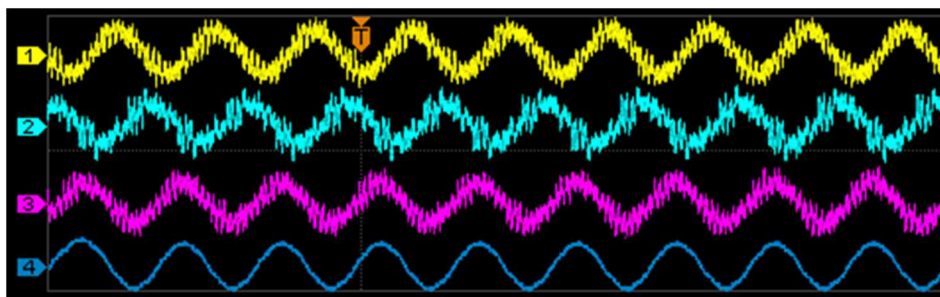
Jak można zauważyć na rysunku 8 udział wyższych harmonicznych w przebiegu prądowym odgrywa kluczowe znaczenie oraz powoduje jego odkształcenie. W przebiegu tym dominują harmoniczne od 13 do 37 co pokazuje rysunek 8. Aby określić kolejność danej harmonicznej można skorzystać z tabeli 1.

Tabela 1. Relacja pomiędzy kolejnością faz i rzędem harmonicznej, na podstawie [5]

Table. 1. Relation between phase sequence and harmonic order, based on [5]

Kolejność faz	Zgodna	Przeciwna	Zerowa
Rząd harmonicznej	1	2	3
	4	5	6
	7	8	9
	...	...	...
	$3k+1$	$3k+2$	$3k+3$ dla $k=0,1,2,3...$

Dodatkowo dla potwierdzenia wykresu z rysunku 7 dokonano analizy przebiegów prądów przed i po filtrze aktywnym przy wykorzystaniu oscyloskopu cyfrowego.

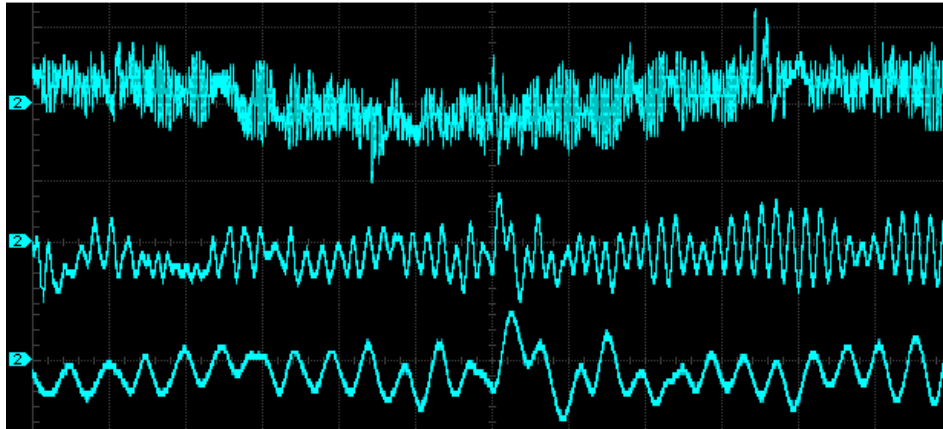


Rys. 8. Wykres przebiegów prądów w fazie L1, L2, L3 po filtrze aktywnym oraz przebieg prądu w fazie L3 przed filtrem aktywnym

Fig. 8. Diagram of current waveforms in the L1, L2, L3 phases after the active filter and the current waveform in the L3 phase before the active filter

Na rysunku 8 przedstawiono odpowiednio przebiegi prądów w fazie L1 (1), L2 (2), L3 (3). Przebiegi te potwierdzają nieliniowy charakter odbiorników energii elektrycznej. Przebieg 4 z rysunku 8 ilustruje natomiast przebieg prądu przed filtrem aktywnym. Jak widać dzięki wykorzystaniu filtra aktywnego wyższe harmoniczne prądów nieliniowych odbiorników „nie wydostają się” poza wydzieloną część sieci.

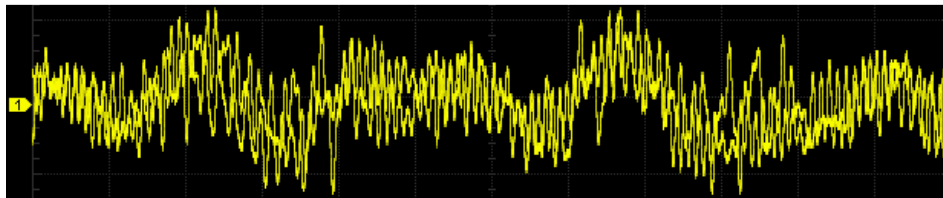
W celu łatwiejszego zrozumienia zasady generowania przebiegów dokonano również obserwacji przebiegów prądowych bezpośrednio na wyjściu filtra aktywnego.



Rys. 9. Wykres przebiegów prądu w fazie L2 na wyjściu części A filtra aktywnego

Fig. 9. Diagram of current waveforms in L2 phase at the output of active filter part A

Rysunek 9 pokazuje kształt przebiegu prądowego w fazie L2 na wyjściu części A filtra aktywnego. Przebiegi te pokazano dla różnej podstawy czasu w celu lepszego zobrazowania przebiegu. Przebieg ten dodatkowo potwierdza prawidłowe działanie filtra. Filtry tego typu generują wyższe harmoniczne, które są w przeciwfazie do wyższych harmonicznych nieliniowych odbiorników. Cechą charakterystyczną tych przebiegów jest to, że nie zawierają składowej podstawowej. Dzięki temu następuje wygaszanie tych harmonicznych z przebiegu. Zjawisko to nazywane jest interferencją destruktywną.



Rys. 10. Przebieg prądu w przewodzie neutralnym w badanej sieci

Fig. 10. Current waveform in the neutral conductor in the tested installation

Oprócz analizy prądów fazowych dokonano również analizy prądu w przewodzie neutralnym w wydzielonej części sieci co pokazuje rysunek 10.

W przebiegu tym można dostrzec obwiednię składowej podstawowej o częstotliwości 50 Hz. Składowa ta jest zniekształcona dużą zawartością wyższych harmonicznymi co niekorzystnie wpływa na punkt neutralny sieci.

#### 4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że dla danych odbiorników nieliniowych aktywny filtr wyższych harmonicznymi spełnia założony cel. Tym samym ogranicza wpływ tych odbiorników na pozostałą część sieci. Dzieje się tak na skutek wygaszanie wyższych harmonicznymi generowanych przez nieliniowe odbiorniki z przebiegu przy udziale filtru aktywnego. Zjawisko to nazywane jest interferencją destruktywną. Dodatkowo zaletą tego typu rozwiązania jest możliwość wprowadzania zmian w konfiguracji sieci oraz nieliniowych odbiorników. Jedynym ograniczeniem wpływającym na poziom ograniczania wyższych harmonicznymi w przebiegach prądu jest moc filtru aktywnego. Powinna być ona dopasowana do obciążenia, aby filtr mógł spełniać swój założony cel. W przeciwnym wypadku nie będzie on w stanie dostatecznie dobrze usunąć wyższe harmoniczne z przebiegów prądowych.

Z przeprowadzonych badań ponadto można wywnioskować, że zawartość wyższych harmonicznymi prądu w fazie L2 jest największa w porównaniu do fazy L1 oraz L3. Może to być spowodowane obciążeniem tej fazy większą ilością jednofazowych odbiorników nieliniowych w stosunku do pozostałych faz. Dodatkowo podczas badań dokonano analizy przewodu neutralnego, co pokazało, że prądy w nim płynące również posiadają wyższe harmoniczne. Harmoniczne te negatywnie wpływają na punkt neutralny sieci.

Powyższe badania pokazują więc znaczenie ograniczania poziomu wyższych harmonicznymi w takich obiektach jak centra badawczo rozwojowe czy specjalistyczne laboratoria, gdzie jakość energii elektrycznej może mieć znaczenie dla wyników badań.

#### Literatura

- [1] J. Czornik, M. Łukiewski: Filtry harmonicznymi gwarancją kompatybilności elektromagnetycznej i wysokiej sprawności przekształtnikowych układów napędowych, ZP-ME NR106, 2/2015 r.
- [2] S. Rustemli, M. Cengiz: Active filter solutions in energy systems, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bitlis Eren University, Bitlis, Turkey 2015 r.
- [3] D. Wojciechowski, R. Strzelecki, B. Bałkowski: Równoległy filtr aktywny sterowany predykcyjnie, Akademia Morska, Katedra Automatyki Okrętowej, Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 231, 2007 r.

- [4] L. Gołębiowski, J. Lewicki: Układy elektromagnetyczne w energoelektronice, Politechnika Rzeszowska 2012 r.
- [5] Z. Hanzelka: Jakość energii elektrycznej część 4, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

## **ANALYSIS AND LIMITATION OF HIGHER HARMONIC NON-LINEAR LOADS USING THE ACTIVE FILTER**

### **S u m m a r y**

The article presents results of measurements related to the limitation of higher harmonics of a non-linear loads using an active filter. At the beginning the article discusses issues related to the problem of higher harmonics filtration using passive and active filters in 0.4 kV networks. Next, analytical considerations regarding filtration of higher harmonics in a three-phase, four-wire network using an active filter are presented to demonstrate the principle of generating voltage by an active filter and showing the complexity of higher harmonics filtration process. A diagram of a separate part of the industrial installation, which was analyzed using PM870 network analyzers as well as a digital oscilloscope with the function of FFT analysis, was presented and discussed. In order to collect data from the analyzers, the BMS system installed on the site was used, which allowed to collect a large number of measured values. Thanks to the collected data it was possible to determine the levels of voltages and current asymmetry, as well as the THD content in the current waveforms before and after the higher harmonic filter. This allowed to show the real impact of the filter. In addition, FFT analysis was performed, on the basis of which one can observe and determine the contribution of individual harmonics in these runs. This analysis also allowed to determine the outflow of energy recovery using asynchronous generators on the quality of electricity. Thanks to the results obtained, it was possible to determine the impact of active filtration on a given part of the network, as well as to answer the question whether the use of this type of filtration is needed or perhaps even necessary. The article ends with the collection of conclusions from the analysis and the summary.

**Keywords:** higher harmonic, active filtration, the quality of electricity, FFT, BMS

DOI: 10.7862/re.2018.4

*Tekst złożono w redakcji: grudzień 2017*

*Przyjęto do druku: grudzień 2017*

## Informacje dodatkowe

1. Lista recenzentów współpracujących będzie opublikowana w numerze 297 Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, *Elektrotechnika* z. 37 (4/2018) oraz zamieszczona na stronie internetowej:  
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>
2. Zasady recenzowania są udostępnione na stronie internetowej:  
<http://oficyna.prz.edu.pl/zasady-recenzowania/>
3. Informacje dla autorów artykułów są udostępnione na stronie internetowej:  
<http://oficyna.prz.edu.pl/informacje-dla-autorow/>
4. Formularz recenzji jest udostępniony na stronie internetowej:  
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>
5. Instrukcja dla autorów omawiająca szczegółowo strukturę artykułu, jego układ, sposób przygotowywania materiału ilustracyjnego i piśmiennictwa jest zamieszczona na stronach internetowych:  
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorow/>  
oraz  
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>  
w zakładce „Instrukcja dla autorów”.
6. Dane kontaktowe do redakcji czasopisma, adresy pocztowe i e-mail do przesłania artykułów oraz dane kontaktowe do wydawcy są podane na stronie internetowej (Komitet Redakcyjny):  
<http://oficyna.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/elektrotechnika/>

Zasady recenzowania, informacje dla autorów, formularz recenzji, instrukcja dla autorów i dane kontaktowe do redakcji czasopisma i wydawcy będą również opublikowane w czwartym numerze *Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, Elektrotechnika*, z. 37 (4/2018).