ELEKTROTECHNIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
ELECTRICAL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-E/2011
ZESZYT 13
ROK 108
ISSUE 13
YEAR 108

WOJCIECH CZUCHRA*, WIESŁAW JAKUBAS**, WALDEMAR ZAJĄC***

# ZAKŁÓCENIA W OBWODACH TOROWYCH OD PÓL MAGNETYCZNYCH POJAZDÓW TRAKCYJNYCH

# DISTURBANCES IN TRACK CIRCUITS FROM MEGNETIC FIELDS OF TRACTION VEHICLES

Streszczenie

W artykule podjęto próbę oceny wpływu zmiennych pól magnetycznych wytwarzanych przez przejeżdżające pojazdy szynowe nad obwodami torowymi wykorzystującymi toki szynowe i pracującymi z prądami sygnałowymi własnymi w zakresie od 20 do 40 kHz. Przykłady takich obwodów spotykane są w praktyce. Wyprowadzone zostały odpowiednie zależności i wykonano obliczenia dla zakresów częstotliwości podanych wyżej i indukcji magnetycznej od zera do 1 μT. Dodatkowo przeprowadzono pomiary indukcji magnetycznej pod lokomotywą dwusystemową i elektrycznym zespołem trakcyjnym. Wyniki uzyskane za pomocą analizatora widma potwierdzają możliwość niebezpiecznego wpływu takich pól na elektroniczne obwody torowe.

*Keywords: obwód torowy, prądy sygnałowe, indukcja magnetyczna*

Streszczenie

An attempt has been made in this paper to estimate the influence of alternating magnetic field generated by traction vehicles passing over track circuits, which use rails and work with own signal currents in frequency range from 20 kHz to 40 kHz. Examples of that kind of circuits are met practice. Proper dependences have been introduced and calculations have been made for frequencies given above and for magnetic induction from zero to 1 μT. In addition measurements of magnetic induction under double-system locomotive and multiple traction unit have been conducted. Results obtained by means of spectrum analyzer confirm a possibility of dangerous influence of those fields on electronic track circuits.

*Keywords: track circuit, signal currents, magnetic induction*

* Dr inż. Wojciech Czuchra, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

** Dr inż. Wiesław Jakubas, Katedra Elektrotechniki i Elektroniki, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

*** Dr inż. Waldemar Zając, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

## 1. Wstęp

Współczesne elementy oddziaływania w relacji pojazd–tor charakteryzują się coraz większą czułością, coraz wyższymi częstotliwościami pracy dochodzącymi obecnie do blisko 100 kHz i coraz mniejszymi bezwładnościami umożliwiającymi wykrywanie pojazdów jadących coraz szybciej. Te czynniki powodują, że muszą być one wyjątkowo uodpornione na działanie zewnętrznych czynników zakłócających. Tymczasem rozwój pojazdów szynowych narzuca stosowanie urządzeń energoelektronicznych zwiększających prawdopodobieństwo pojawienia się czynnika zakłócającego. Jeżeli stanie się to pod jadącym zakłócającym pojazdem szynowym i wykazana zostanie niezajętość odcinka toru, to może prowadzić to do sytuacji bardzo niebezpiecznej.

Praktyka pokazuje, że współczesne falowniki lokomotyw i przetwornice statyczne wagonów różnego typu wytwarzają zakłócenia elektromagnetyczne o bardzo szerokim widmie bądź w widmie występują prążki dokładnie wpisujące się w ekstremum charakterystyki selektywnej filtrów odbiorników zelektronizowanych obecnie w znacznej części obwodów torowych [3, 4]. Istotne znaczenie przy oddziaływaniu pól magnetycznych na obwody torowe mają elementy indukcyjne zainstalowane najczęściej pod pudłem pojazdu trakcyjnego. Są to szczególnie indukcyjności w obwodzie filtru wejściowego, indukcyjności w obwodzie silników trakcyjnych oraz indukcyjności obwodów komutacyjnych. Dodatkowo mogą w układach elektrycznych pojazdów wystąpić sytuacje usterkowe tego typu, że funkcjonowanie urządzeń pokładowych pozostaje niezakłócone, a zwiększa się poziom zakłóceń zewnętrznych działających m.in. na urządzenia sterowania ruchem kolejowym znajdujące się na poziomie toków szynowych (np. obluzowanie przewodów masy falowników lub przetwornic statycznych, warunki zasilania awaryjnego itp.).

W artykule podjęto próbę oceny wpływu zmiennych pól magnetycznych wytwarzanych przez przejeżdżające pojazdy szynowe nad obwodami torowymi [8, 9] wykorzystującymi toki szynowe i pracującymi z prądami sygnałowymi własnymi w zakresie od 20 do 40 kHz. Przykłady takich obwodów to Elektroniczne Obwody Czujnikowe typu EOC – 1i Elektroniczne Obwody Nakładane, np. EON – 6 [6, 7]. Oczywiście nie wyczerpują one szerokiej gamy układów oddziaływania w relacji pojazd–tor. Do badań pozostają czujniki punktowe, których częstotliwości pracy dochodzą obecnie do kilkuset kiloherców. One również mogą być zakłócane zarówno przez składowe prądów trakcyjnych powrotnych w szynach, jak i pola magnetyczne emitowane pod pudłami pojazdów szynowych.

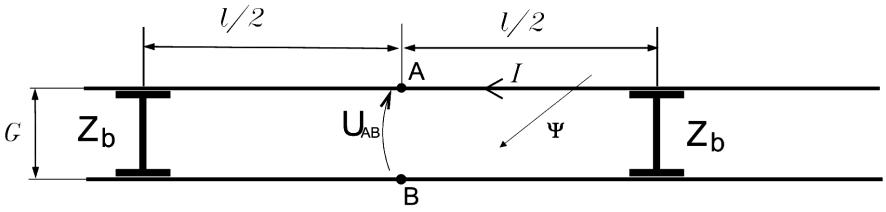
## 2. Zakłócenia indukowane w szynowych obwodach torowych od urządzeń umieszczonych pod pudłem pojazdu

W celu zbadania wpływu zakłócającego taboru na obwody torowe rozpatrzony zostanie przypadek elektronicznego obwodu nakładanego o częstotliwości prądów sygnałowych mieszczących się w zakresie 20–40 kHz [5]. Obwody te wykorzystują naturalne szyny bez złączy izolowanych. Propagacja sygnałów jest ograniczona naturalną tłumiennością toru określoną jego parametrami jednostkowymi.

Zakładamy do obliczeń i badań symulacyjnych, że zaciski odbiornika obwodu torowego podłączone będą do punktów A, B, jak to zobrazowano na rys. 1. Zestawy kołowe taboru zakłócającego zwierają toki szynowe impedancjami $Z_b$ w odległościach $l/2$ od punktów A, B.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jest to najbardziej niekorzystny przypadek, gdy zaciski odbiornika znajdą się w osi symetrii poprzecznej pudła pojazdu zakłócającego. Urządzenia elektryczne tego pojazdu wytwarzają nad tokami szynowymi strumień przemienny zakłócający Ψ wywołujący indukowanie się w tokach szynowych prądów zakłócających. Ich wartość będzie zależeć od wartości tego strumienia, powierzchni wyznaczonej przez zwierające zestawy kołowe, toki szyn (długość pojazdu) i wypadkową impedancję w tym układzie (toki szynowe, impedancje bocznikujące osi) oraz częstotliwość pulsacji strumienia zakłócającego. Ponieważ współczesne elektroniczne obwody torowe posiadają odbiorniki o dosyć dużej impedancji wejściowej, zatem rozpatrywana będzie wartość napięcia $U_{AB}$ na zaciskach układu odbiornika. W poniższych rozważaniach pominięto, dla uproszczenia, wpływ parametrów poprzecznych toru. Na tak krótkim odcinku można to zrobić bez popełniania znaczącego błędu.




Rys. 1. Schemat zastępczy dla oddziaływania pól magnetycznych taboru na elektroniczne obwody torowe

Fig. 1. Equivalent circuit for the magnetic fields effect on the electronic track circuit

Strumień Ψ skojarzony z powierzchnią odcinka toru ograniczoną wewnętrznymi zestawami kołowymi (osiami) (rys. 1) wyrażony jest wzorem (1)

$$\Psi = B_n \cdot l \cdot G \tag{1}$$

Ponieważ indukcja magnetyczna $B_n$ ma charakter przemienny zgodny z częstotliwością sygnału generowanego przez pojazd, wówczas należy ją wyrazić wg zależności (2)

$$B_n = B_m \cdot \sin \omega t \tag{2}$$

Siła elektromotoryczna $e$ indukowana w jednym zwoju, przedstawionym na rys. 1 zgodnie z regułą indukcji, wyrażona została wzorami (3)–(6) [1, 2]

$$e = -z \frac{d\Psi}{dt} \tag{3}$$

$$e = -z \cdot l \cdot G \cdot \frac{d\left(B_m \cdot \sin \omega t\right)}{dt} \tag{4}$$

$$e = -B_m \cdot \omega \cdot z \cdot l \cdot G \cdot \cos \omega t \tag{5}$$

$$E = -2\pi f \cdot \frac{B_m \cdot z \cdot l \cdot G \cdot \cos \omega t}{\sqrt{2}} \tag{6}$$

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Przyjmując, jak wcześniej powiedziano $Z = 1$, bo toki szynowe z dwoma zestawami kołowymi tworzą jeden zwój i stały prześwit toru $G = 1{,}435$ m, uzyskujemy wyrażenie na $E$ w postaci (7) i (8)

$$E = -4{,}45 \cdot B_n \cdot f \cdot l \cdot G \tag{7}$$

$$E = -6{,}39 \cdot B_n \cdot f \cdot l \tag{8}$$

Prąd w tym obwodzie będzie równy (9)

$$I = \frac{E}{Z_c} = \frac{-6{,}39 \cdot B_n \cdot f \cdot l}{2Z_s + 2Z_b} \tag{9}$$

gdzie:

$Z_b$ – impedancja bocznikowania zestawu kołowego [5],

$Z_s$ – impedancja wzdłużna szyny o długości $l$.

Napięcie o maksymalnej wartości $U_{AB}$ między tokami szynowymi wyrażone zostało zależnościami (10) i (11)

$$U_{AB} = U_{\frac{l}{2}} + U_{\frac{l}{2}} + U_{Z_b} = U_l + U_{Z_b} \tag{10}$$

$$U_{AB} = \frac{-6{,}39 \cdot B_n \cdot f \cdot l}{2Z_s + 2Z_b} \cdot \left(Z_s + Z_b\right) = -3{,}2 \cdot B_n \cdot f \cdot l \tag{11}$$

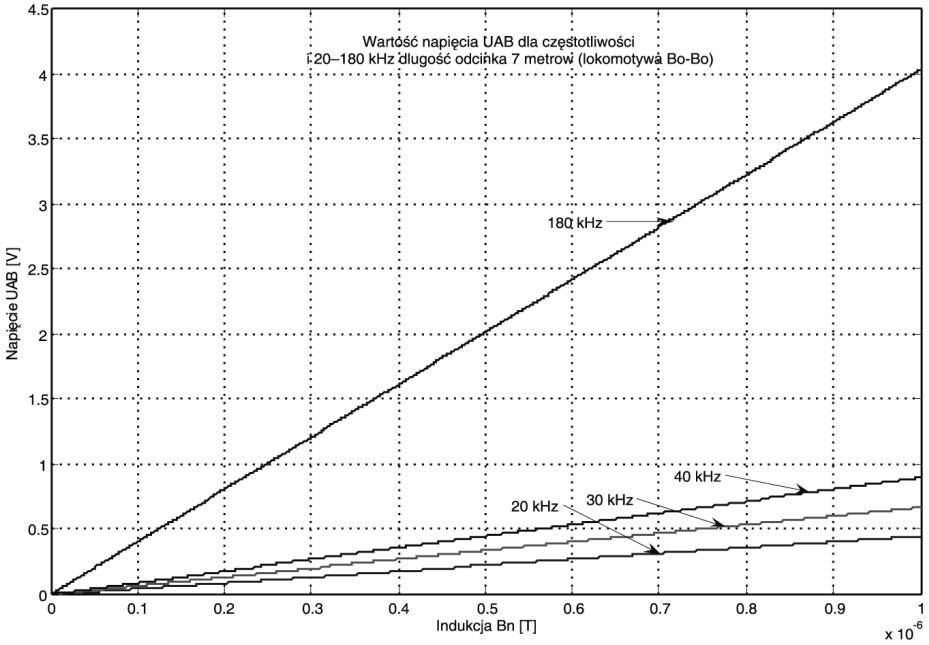
W ostatecznej postaci (11) wyrażającej zależność napięcia $U_{AB}$ od indukcji magnetycznej pola zakłócającego, częstotliwości tego pola i długości obwodu zawartej między wewnętrznymi zestawami kołowymi pojazdu nad badanym odcinkiem obwodu, nie występują parametry jednostkowe obwodu torowego i impedancje bocznikujące zestawów kołowych. Zatem dla różnicy potencjałów w punktach A, B znajdujących się w połowie długości odcinka bocznikowanego zestawami kołowymi zostały wyeliminowane te wielkości z ostatecznego wyrażenia (11).

W założeniach do analizy tego problemu pominięto także parametry jednostkowe poprzeczne toru. Dla krótkich odcinków rozważanego zagadnienia konduktancja podtorza i pojemność między tokami szyn są tak małe, że można je zaniedbać, opisując zjawiska zachodzące podczas zakłócania pracy obwodu torowego. Wywołają one tylko nieznaczne zmniejszenie wartości napięcia $U_{AB}$. Dzięki temu uzyskano prostą zależność (11) na napięcie $U_{AB}$.

## 3. Uzyskane wyniki obliczeń

Wyprowadzona zależność (11) na napięcie $U_{AB}$ w funkcji indukcji $B_n$ umożliwiła wykonanie obliczeń dla kilku rozstawów osi taboru i zakresu częstotliwości 20–180 kHz. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rys. 2–4. Tabor szynowy reprezentują: lokomotywa Bo-Bo o rozstawie wewnętrznych osi 7 m (rys. 2), jednostka EZT o rozstawie osi 13,1 m (rys. 3) i wagon pasażerski o rozstawie osi 16,5 m (rys. 4).

BPK BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



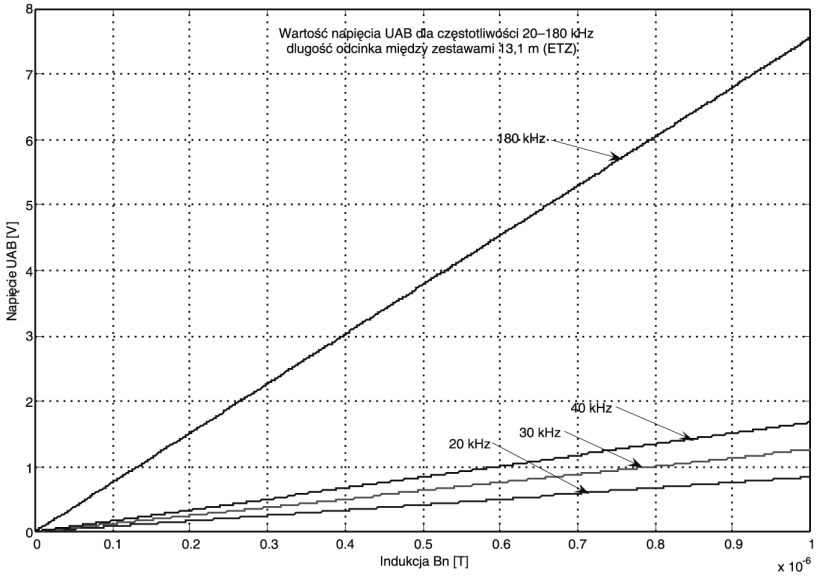

Rys. 2. Wartości napięcia $U_{AB}$ w funkcji indukcji $B_n$ dla lokomotywy Bo-Bo i zakresu częstotliwości 20–180 kHz

Fig. 2. $U_{AB}$ voltage values as a function of induction $B_n$ for the electric locomotive Bo-Bo and 20–180 kHz frequency range

Uzyskanie napięcia $U_{AB}$ rzędu 0,2 V mogącego potwierdzić stan niezajętości tego fragmentu obwodu torowego wymaga wystąpienia indukcji magnetycznej $B_n$ od pojazdu szynowego rzędu 220 nT dla rozstawu osi 7 m (rys. 2) lub 120 nT (rys. 4) dla wagonu o rozstawie wewnętrznym osi 16,5 m. Te wartości są obliczone dla częstotliwości 40 kHz. Musi przy tym wystąpić zgodność częstotliwości pola zakłócającego z częstotliwością, na którą są dostrojone obwody odbiornika, np. EOC-1, EON-6. Czułości odbiorników elektronicznych obwodów nakładanych rzędu 0,2 V są spotykane w praktyce i nie są wcale najniższe. Tutaj zostały przyjęte przykładowo. Niższe częstotliwości pola zakłócającego (dla 20 kHz) dają niższe wartości napięć $U_{AB}$ odpowiednio 0,1 V i 0,1 V, przy tych co poprzednio indukcjach $B_n$. Zdecydowanie wyższe częstotliwości, np. 180 kHz, która wystąpiła w badaniach terenowych, wymaga wartości indukcji około 50 nT dla rozstawu osi 7 m i około 30 nT dla wagonu pasażerskiego.

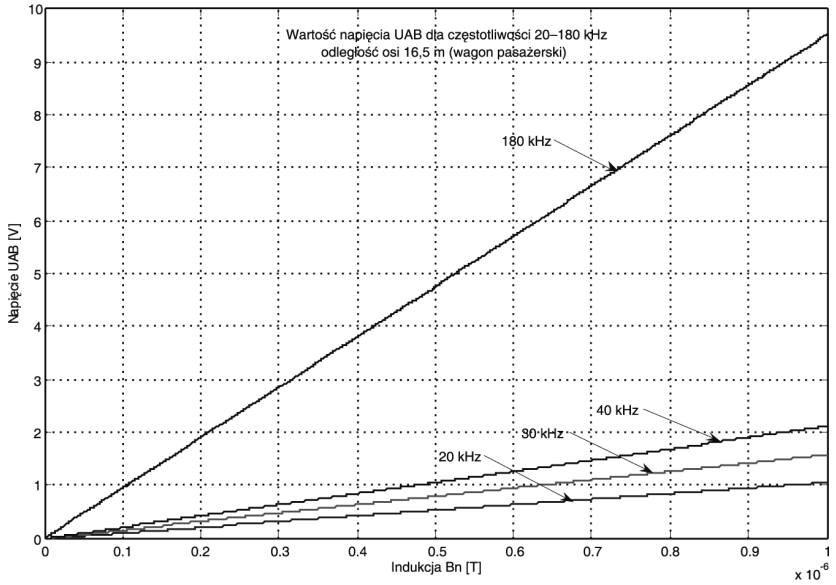
Przedstawione na rysunkach 2–4 wykresy obejmują zakresy częstotliwości stosowanych w układach elektronicznych urządzeń przytorowych. Oprócz takich układów występują sporadycznie obwody starszej generacji o częstotliwościach pracy 10 i 14 kHz. W tych przypadkach wartości $B_n$ musiałyby mieć już znaczne wartości, co jest wykluczone w praktyce. W niniejszym artykule pominięto także fakt przemieszczania się źródła pola zakłócającego nad badanym odcinkiem toru kolejowego. Indukowana wówczas SEM [2] może mieć tylko charakter impulsowy na zaciskach A, B odbiornika i nawet po przejściu przez układy filtrujące nie wzbudzi odbiornika ze względu na wprowadzone celowo opóźnienia czasowe reakcji układów odbiornika.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ




Rys. 3. Wartości napięcia $U_{AB}$ w funkcji indukcji $B_n$ dla EZT i zakresu częstotliwości 20–180 kHz

Fig. 3. $U_{AB}$ voltage values as a function of induction $B_n$ for the ETZ and 20–180 kHz frequency range




Rys. 4. Wartości napięcia $U_{AB}$ w funkcji indukcji $B_n$ dla wagonu pasażerskiego i zakresu częstotliwości 20–180 kHz

Fig. 4. $U_{AB}$ Voltage values as a function of induction $B_n$ for the passenger car and 20–180 kHz frequency range

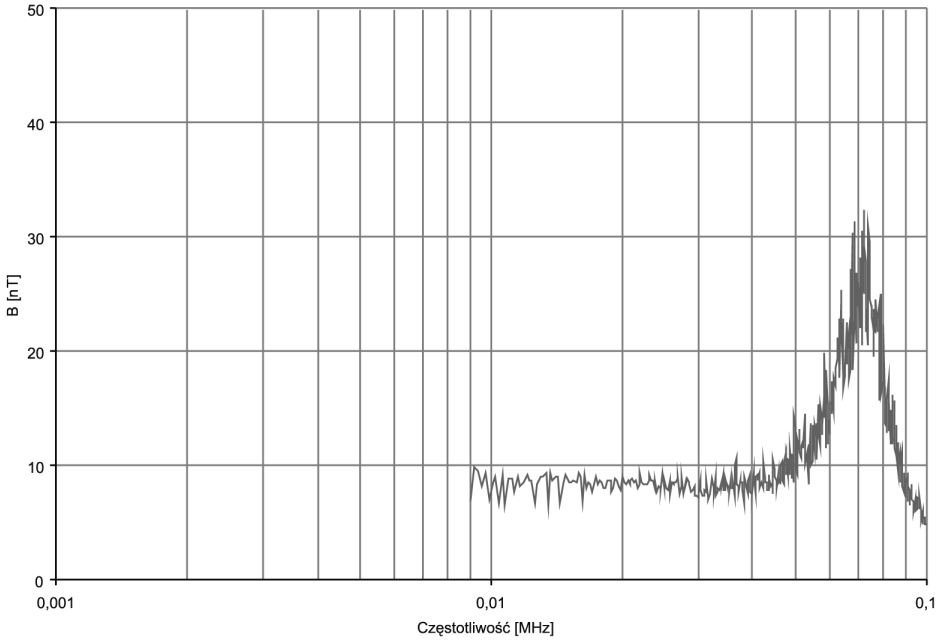
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

## 4. Pomiary pól pochodzących od pojazdów trakcyjnych

Pomiary indukcji magnetycznej wykonano z użyciem cewki magnetycznej EMCO 7604 o zakresie pomiarowym od 20 Hz do 1 MHz, zainstalowanej pod pudłem pojazdu nad główką szyny. Sygnał odbierany przez cewkę doprowadzony był do analizatora widma ADVANTEST R3131A. Wyniki w postaci indukcji magnetycznej w funkcji częstotliwości, przedstawione na rysunkach, otrzymano po uwzględnieniu charakterystyki współczynników korekcyjnych dla użytej cewki.

Badanymi pojazdami były: lokomotywa dwusystemowa 15 kV/3000 V i zmodernizowany zespół trakcyjny z napędem falownikowym. Sygnał odbierany od pojazdu przez cewkę doprowadzany był do analizatora widma ADVANTEST R3131A.

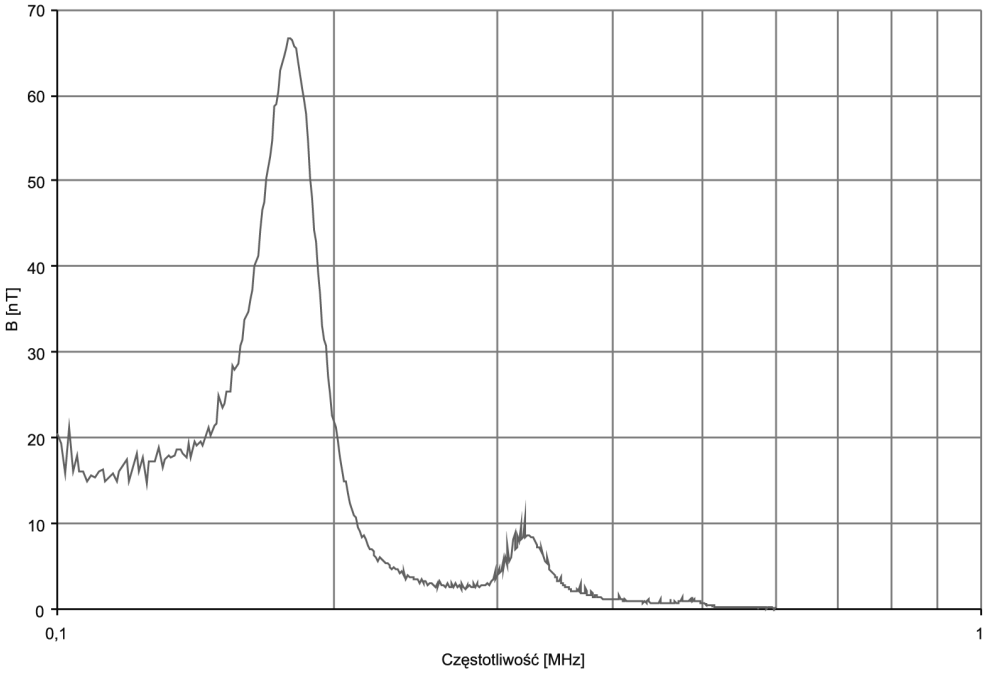
Największy poziom indukcji $B_n$ od lokomotywy dwusystemowej (cewka na wysokości 20 cm nad główką szyny) uzyskano w paśmie 9–100 kHz (rys. 5). Wynosił on 32 nT przy maksimum dla 70 kHz. Taka wartość indukcji może wyidukować napięcie $U_{AB}$ ok. 0,15 V. Może to już być wartość powodująca potwierdzenie niezajętości odcinka toru. Podobne pomiary z cewką na wysokości 30 cm nad główką szyny wykonano dla EZT. Tym razem w paśmie częstotliwości 100–600 kHz uzyskano maksimum przy częstotliwości 180 kHz (rys. 6). Zmierzona wartość indukcji dla tej częstotliwości wyniosła 67 nT. Taka wartość indukcji (wg rys. 3 charakterystyki dla 180 kHz) może dać na zaciskach A, B odbiornika około 600 mV, powodując pewne niebezpieczne wzbudzenie odbiornika.




Rys. 5. Wartości indukcji *B* pod lokomotywą dwusystemową

Fig. 5. *B* Induction values under the two-mode locomotive

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ




Rys. 6. Wartości indukcji *B* w funkcji częstotliwości pod pojazdem EZT

Fig. 6. *B* induction values as a frequency function measured under the vehicle EZT

## 5. Wnioski

Przykładowa analiza wpływu zakłócających pól magnetycznych pojazdu szynowego na obwody torowe może posłużyć do rozwinięcia tego problemu. Zasygnalizowano możliwość indukowania się prądów pochodzących od pól o stałym poziomie, ale ruchomych względem kontrolowanego obwodu torowego. Należy w dalszym rozwinięciu zbadać reakcję na zakłócenia jednego i drugiego typu, czyli zmiennych pól magnetycznych i ruchu pojazdu wytwarzającego te pola. Jest to już zagadnienie bardzo złożone. Należy również uzupełnić weryfikację praktyczną poprzez dokładny pomiar wartości indukcji $B_n$ pochodzącej od urządzeń pokładowych wielu różnych pojazdów oraz dokonać sprawdzenia maksymalnych poziomów zakłóceń.

Kolejnymi problemami do analizy są wpływy zakłócające od pojazdów szynowych, a działające na czujniki szynowe typu punktowego [10]. Tych elementów oddziaływania pojazd–tor jest obecnie bardzo dużo o różnorodnej konstrukcji i zasadzie działania. Jest to bardzo złożony problem do przeprowadzenia badań symulacyjnych.

W procedurach pomiarów zakłóceń należałoby wprowadzić zasadę określania napięcia $U_{AB}$ między tokami szynowymi pod pojazdem, gdyż dla złożonej topologii pojazdu niemożliwe staje się teoretyczne wyznaczenie pól zakłócających.

*Praca została wykonana w ramach projektu nr 2940/B/T02/2008/35.*

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

## Literatura


[1] Bolkowski S., *Teoria obwodów elektrycznych*, WNT, Warszawa 1995.

[2] Krakowski M., *Elektrotechnika teoretyczna, obwody liniowe i nieliniowe*, PWN, Warszawa 1996.

[3] Białoń A., Czuchra W., Zając W., *Research of the interference effects caused by locomotives with asynchronous motors on rail traffic control equipment*, International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC EUROPE 2002, September 9–13, Sorrento, Italy.

[4] Białoń A., Kazimierczak A., Zając W., *Opracowanie dopuszczalnych parametrów zakłóceń dla urządzeń srk, łączności i pojazdów trakcyjnych*, Prace CNTK, zadanie nr 6915/23, Warszawa 1999.

[5] Jakubas W., *Badania symulacyjne oddziaływania osi taboru kolejowego na elektroniczne obwody torowe*, Czasopismo Techniczne z 1-E/2007, zeszyt 5, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.

[6] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa, *Czujnik torowy EON-6*, Nr DTR90/EON-6, Adtranz Zwus Sp.z o.o.

[7] Adtranz ZWUS, *Dokumentacja techniczno ruchowa*, *DTR-90/EOC-1*, Katowice 2000.

[8] PN-EN 50238-1 Zastosowania kolejowe. Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów. Wiadomości ogólne.

[9] PN-EN 50238-2 Zastosowania kolejowe. Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów. Kompatybilność z obwodami torowymi.

[10] PN-EN 50238-3 Zastosowania kolejowe. Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów. Kompatybilność z licznikami osi.


BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ