

WIESŁAW JAKUBAS*

BADANIA SYMULACYJNE ODDZIAŁYWANIA OSI TABORU KOLEJOWEGO NA ELEKTRONICZNE OBWODY NAKŁADANE

SIMULATION RESEARCHES ON THE INFLUENCE OF ROLLING STOCK AXLE ON OVERLAPPED ELECTRONIC CIRCUITS

Streszczenie

W artykule omówiono własności i zastosowanie elektronicznych obwodów nakładanych (EON). Przyjęto także najważniejsze założenia w celu utworzenia modeli matematycznych układów EON-tor, uwzględniających: rozprzestrzenianie się sygnału w torze niezajętym przez tabor, zmiany wartości napięcia na zaciskach nadajnika w czasie przejazdu jednej osi taboru i zmiany napięcia nadajnika w czasie przejazdu dwóch osi taboru.

Dla wymienionych przypadków zrealizowano programy obliczeniowe w języku Matlab, uzyskując w ten sposób wiele wykresów do dyskusji wyników.

Słowa kluczowe: schemat zastępczy, obwód torowy, czwórnik, model matematyczny

Abstract

The paper presented the properties and application of the overlapped circuits (OEC). Following this most important assumptions were made in order to formulate mathematical models of OEC-track system which take into account: signal transmission in a track free of the rolling stock, changes of transmitter voltage during the transfer of one rolling stock, changes of transmitter voltage during the transfer of two rolling stocks.

Calculation programs in Matlab were written for each of the above cases which produced a variety of diagrams for further discussion.

The paper ends with concluding remarks based on the results obtained from the simulations.

Keywords: equivalent circuit diagram, track circuit, four-terminal network, mathematical model

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

1. Wstęp

Rozwój elektroniki sprzyja powstawaniu nowoczesnych opracowań dla transportu szynowego, mimo iż stawiane są tu szczególne wymagania bezpieczeństwa dla każdego nowego układu czy rozwiązania. Wspomagające w tym zakresie są także pręźnie rozwijające się w XX i XXI wieku technika mikroprocesorowa i informatyka. Daje to w sferze wykorzystania nowoczesnych technologii praktycznie nieograniczone możliwości, zależne tylko od pomysłowości projektantów.

Szybkość działania układów mikroelektronicznych sprzyja takim aplikacjom, które do tej pory były niemożliwe ze względu na dostępność jedynie powolnej techniki przekątnikowej lub nieco szybszej, z domieszką klasycznej elektroniki dyskretnej.

Obecnie ruch pociągu można skwantować w czasie do przedziałów rzędu mikrosekund. W tym czasie nawet niezbyt szybki mikrokontroler może wykonywać nie tylko operacje na sygnałach binarnych, ale także dokonywać wielobitowych przetworzeń sygnałów analogowych, które później można wykorzystać na coraz więcej sposobów. Takim przykładem mogą być nowoczesne elektroniczne obwody torowe różnych typów.

Podstawowym ich przeznaczeniem przed wieloma laty miała być kontrola zajętości odcinka toru kolejowego. Stopniowo podwyższano częstotliwość sygnału generowanego przez nadajnik, skrócono odległość, na którą propagowany był sygnał i zaczęto stosować te obwody jako czujniki (np. typu EOC – elektroniczny obwód czujnikowy) w systemach samoczynnej sygnalizacji przejazdowej.

Kolejnym kuszącym wyzwaniem jest próba użycia takich obwodów jako układów o prawie punktowym charakterze działania (dla każdego zestawu kołowego). Mogłoby to prowadzić do połączenia prawie doskonałych własności obwodu nakładanego z licznikową kontrolą zajętości toru. Wstępem do takich niekonwencjonalnych zastosowań elektronicznych obwodów nakładanych będzie właśnie niniejszy artykuł.

2. Rodzaje i zastosowanie współczesnych elektronicznych obwodów nakładanych

Elektroniczne obwody nakładane (EON), wprowadzone do eksploatacji pod koniec lat siedemdziesiątych, zakładały możliwość pracy autonomicznej lub współpracy z innymi obwodami (np. klasycznymi). Wykorzystywana jest tu naturalna tłumienność toru, która prowadzi do zmniejszenia poziomu sygnału w pewnej odległości od nadajnika do takiego poziomu, którego nie jest w stanie odebrać i przetworzyć odbiornik (własny ani też sąsiadujące). Eliminowana jest tym samym konieczność cięcia szyn.

Pierwotna wersja EON-1 charakteryzowała się częstotliwością 10 kHz sygnału wprowadzanego do toru i zapewnieniem wyłącznie kontroli niezajętości odcinków toru o długościach od 30 do 300 metrów. Takie możliwości dawał sygnał o tej częstotliwości oraz regulacje napięcia wyjściowego nadajnika i czułości odbiorników.

Kompletny układ EON składa się z nadajnika podłączonego centralnie w środku odcinka kontrolowanego i dwóch odbiorników, po prawej i lewej stronie odbiornika. Odbiorniki są uzależnione w jednym obwodzie, gdyż zwarcie zestawem kołowym miejsca podłączenia jednego odbiornika niekoniecznie prowadzi do odwzbudzenia drugiego z nich (krótki tabor). Powodowałyby to niejednoznaczny sytuację na kontrolowanym odcinku.

Wprowadzenie do produkcji i eksploatacji drugiego kompletu nadajnika i odbiorników pracujących z użyciem częstotliwości 14,6 kHz umożliwiło naprzemienne stosowanie dwóch kompletów układów bez wzajemnego ich wpływu.

Szerokie możliwości stosowania tego typu urządzeń oraz doświadczenia eksploatacyjne spowodowały, że rozpoczęto na szeroką skalę prace modernizacyjne nad obwodami nakładanymi. Podstawowymi kierunkami modernizacji objęto podniesienie niezawodności pracy oraz uproszczenie sposobów regulacji i sprawdzania urządzeń. W efekcie tych prac powstała nowa odmiana obwodu nakładanego, oznaczona symbolem EON-3 [5]. Zasadnicze parametry obwodów oraz ich przeznaczenie nie uległy zmianie.

Wkrótce po opracowaniu układu EON-3 zaczęto wprowadzać do eksploatacji kolejne modele elektronicznych obwodów nakładanych typu BOT (bezzłączowy obwód torowy), SOT (stacyjny obwód torowy) przeznaczone dla długich odcinków torów szlakowych oraz obwodów stacyjnych zawierających zwrotnice. Zaowocowało to kolejnymi bogatymi doświadczeniami eksploatacyjnymi.

Systemy samoczynnej sygnalizacji przejazdowej (SSP), zwłaszcza generacji mikroprocesorowej, przeznaczone dla uniwersalnych zastosowań i dużych prędkości nie mogły korzystać już z przestarzałych czujników punktowych typu ELS-3 i ELS-6. Ponieważ w tych systemach chodziło równocześnie o punktowy charakter działania i fizyczną kontrolę zajętości toru, toteż prace konstruktorów skierowane zostały nie na obwody o dużym zasięgu, lecz wręcz przeciwnie. Skrócenie strefy działania obwodu i zapewnienie dwukanałowości jego pracy było warunkiem zastosowania go w systemach SSP. Uzyskano to metodą podwyższenia częstotliwości pracy układu do wartości z przedziału 18–40 kHz. Uzyskano w ten sposób obwód torowy oznaczony symbolem EON-6 [5, 6]. Użyteczny zasięg sygnału, emitowanego przez nadajnik tego urządzenia, jest rzędu kilku metrów w prawo i lewo od punktu zasilania. Daje to możliwość sekwencyjnej współpracy obok siebie dwóch układów jako czujników systemu dwukanałowego.

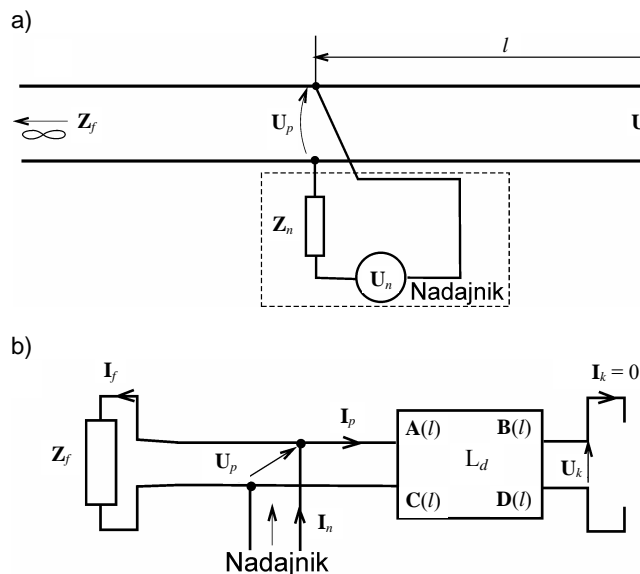
3. Założenia i modele matematyczne obwodów do badań symulacyjnych

Chcąc prześledzić działanie układu EON-6 jako obwodu o bardzo krótkiej strefie działania, umożliwiającej pracę w charakterze czujnika punktowego, należy utworzyć dla niego model matematyczny, a wcześniej przyjąć kilka założeń upraszczających późniejsze wykonanie badań symulacyjnych. Dla przeprowadzenia tych badań przyjęto, że nadajnik układu EON-6 będzie podłączony pośrodku toru prostego nieskończenie długiego.

Pełna symetria zarówno wzdłużna, jak i poprzeczna toru zapewniona będzie przez jednolite parametry jednostkowe, umożliwiające potraktowanie go jako fragmentów obwodu o parametrach rozłożonych. Przyjęto do badań symulacyjnych jedną z wartości częstotliwości dla nadajnika EON-6 równą 20 kHz. Jest też możliwość obliczenia parametrów jednostkowych [2] i przeprowadzenia badań symulacyjnych dla wyższych częstotliwości, np. z przedziału 40–80 kHz.

Jeśli chodzi o dodatkowe założenia, to uwzględnione zostały: brak powrotnych prądów trakcyjnych, typ szyny S60, temperatura pracy 20°C, rezystancja bocznikowania jednego zestawu kołowego na poziomie 0,2 Ω (bez składowej reaktancyjnej), zakres zmian rezystancji podtorza 1–10 Ω ·km oraz dane nadajnika EON uzyskane od producenta [6].

Zależności matematyczne podawane w dalszych częściach artykułu uwzględniają wiele operacji na liczbach zespolonych. Te wartości zapisane będą tłustym drukiem. Rzeczywiste wartości długości odcinków toru l i współrzędnej pierwszej osi x względem punktu podłączenia nadajnika zapisane będą czcionką zwykłą.



Ryc. 1. Schemat zastępczy obwodu torowego z nadajnikiem EON dla toru wolnego

Fig. 1. The track circuit's equivalent diagram with OEC transmitter for a free railway track

Pierwsza faza badań symulacyjnych dotyczyć będzie stanu, w którym na torze nie znajdują się osie taboru. Istotną dla tego przypadku wartością jest napięcie na końcu odcinka U_k , stosowne do parametrów jednostkowych i jego długości l (ryc. 1a). W schemacie zastępczym (ryc. 1b) zmienną, w funkcji której badana jest propagacja sygnału w torze, jest właśnie długość l wzrastających odcinków toru. Na rycinie 1b (i w modelu matematycznym) uwzględniono to w ten sposób, że lewa strona obwodu obciążona jest impedancją falową Z_f toru nieskończenie długiego, natomiast prawa część odcinkiem obwodu o parametrach rozłożonych L_d otwartym na końcu o zmieniającej się długości l . Dla tego fragmentu obwodu obliczane będzie napięcie końcowe. Pozwala to prześledzić wartość napięcia w torze w różnych odległościach od nadajnika.

$$\mathbf{A}(l) = \mathbf{D}(l) = \cosh(\gamma \cdot l) \quad [3] \quad (1)$$

$$\mathbf{B}(l) = Z_f \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \quad (2)$$

$$\mathbf{C}(l) = \frac{1}{Z_f} \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} U_p(l) \\ I_p(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(l) & \mathbf{B}(l) \\ \mathbf{C}(l) & \mathbf{D}(l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_k(l) \\ I_k(l) \end{bmatrix} \quad [3] \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_k(l) = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{Z}_{we}(l) = \frac{\mathbf{Z}_f \cdot \mathbf{A}(l)}{\mathbf{Z}_f \cdot \mathbf{C}(l) + \mathbf{A}(l)} \quad (6)$$

$$\mathbf{U}_k(l) = \frac{\mathbf{U}_n \cdot \mathbf{Z}_{we}}{\mathbf{A}(l) \cdot (\mathbf{Z}_n + \mathbf{Z}_{we})} \quad (7)$$

gdzie:

- $\mathbf{U}_n, \mathbf{I}_n, \mathbf{Z}_n$ – napięcie, prąd i impedancja wewnętrzna nadajnika EON,
- $\mathbf{U}_p, \mathbf{I}_p$ – napięcie i prąd na początku odcinka l ,
- \mathbf{I}_f – prąd lewej części toru,
- $\mathbf{U}_k, \mathbf{I}_k$ – napięcie i prąd na końcu odcinka o długości l ,
- \mathbf{Z}_f – impedancja falowa [1, 3],
- γ – tłumowność falowa odcinka toru [1, 3],
- l – długość odcinka toru o napięciu końcowym $\mathbf{U}_k(l)$.

Parametry łańcuchowe odcinka obwodu o parametrach rozłożonych, zawarte we wzorach (1)–(3) podane zostały według literatury [1, 3]. Podobnie zależność macierzowa (4). Przy braku obciążenia na końcu odcinka obwodu, prąd $\mathbf{I}_k(l)$ jest równy zero (5). Korzystając z wyżej wymienionych zależności oraz impedancji wejściowej obwodu ze wzoru (6), możemy uzyskać zależność na napięcie na końcu odcinka o długości l (7). Ta zależność jest podstawą do opracowania programu obliczeniowego i wykonania cyklu badań symulacyjnych dla tego przypadku.

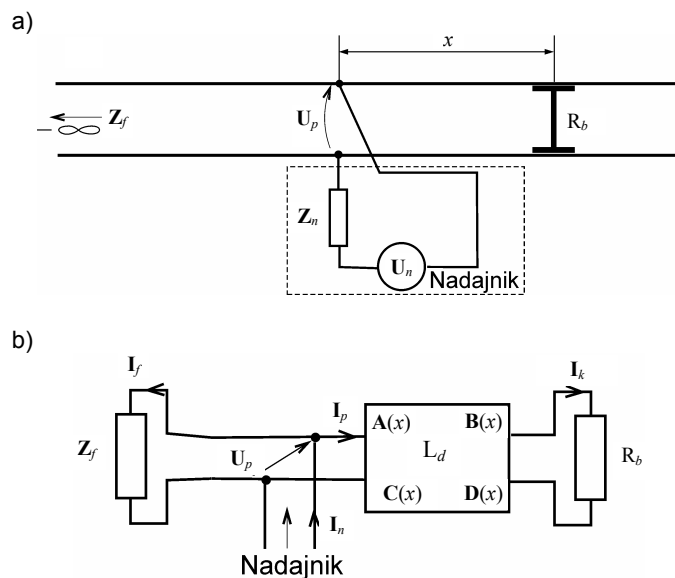
Kolejny schemat poglądowy (ryc. 2a) dotyczy przypadku „przemieszczania” się jednej osi taboru po odcinku toru. Wartością zmienną, która oddawać będzie reakcję nadajnika na przemieszczający się zestaw kołowy będzie napięcie początkowe $\mathbf{U}_p(x)$ między tokami szynowymi w miejscu podłączenia nadajnika. Podczas „przemieszczania się” osi taboru po prawej części toru, lewa obciążona jest jego impedancją falową i odwrotnie. Taki sposób badań symulacyjnych wynika ze schematu zastępczego zaprezentowanego na ryc. 2b. Model matematyczny obwodu torowego z jedną osią zawarty jest we wzorze (9). W tym przypadku napięcie $\mathbf{U}_p(x)$ powinno się zmieniać od pewnej wartości maksymalnej do minimalnej (oś w miejscu podłączenia nadajnika), a potem wzrastać przy oddalaniu zestawu kołowego. Taki stan pracy pokazuje dokładnie, jakie jest rzeczywiste napięcie na początku obwodu w zależności od częstotliwości, parametrów jednostkowych toru i impedancji wewnętrznej nadajnika.

Zmiany te zobrazowane będą na uzyskanych w wyniku przeprowadzonych badań wykresach symulacyjnych.

Uwzględniając zależności (1)–(4) oraz zmienną współrzędną x osi względem punktu zasilania, a także wartość prądu na końcu odcinka zwartej zestawem kołowym, wyrażoną wzorem (8)

$$\mathbf{I}_k(x) = \frac{\mathbf{U}_k(x)}{\mathbf{R}_b} \quad (8)$$

uzyskujemy wyrażenie opisane wzorem (9), będące modelem matematycznym dla przypadku symulowanego przemieszczania się jednej osi zestawu kołowego.



Ryc. 2. Schematy zastępcze obwodu torowego z nadajnikiem EON i jedną osią taboru

Fig. 2. The track circuit's equivalent diagrams with OEC transmitter and one rolling stock axle

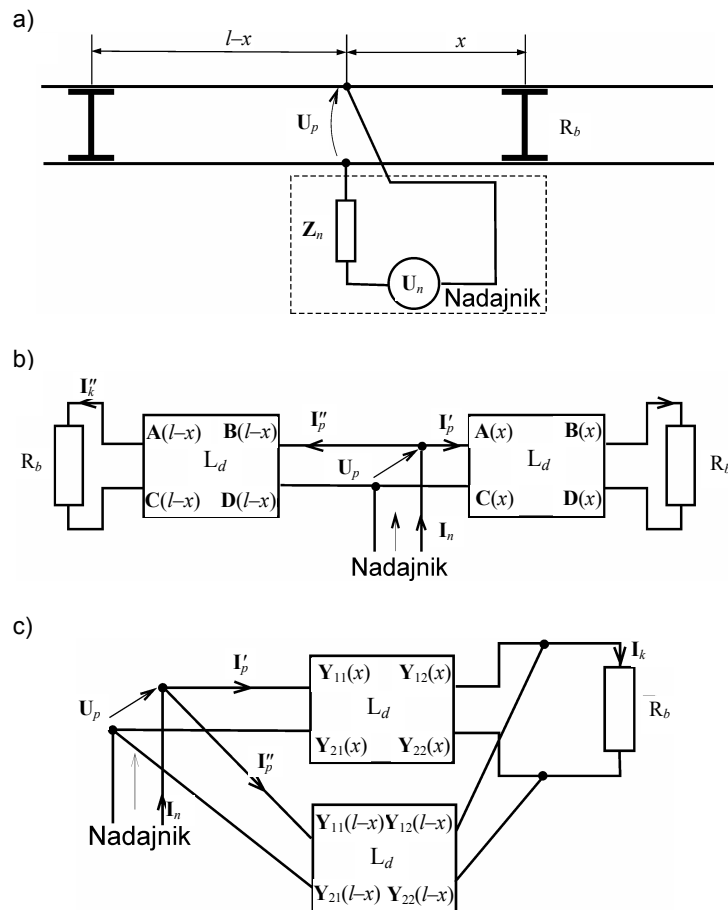
Najbardziej złożony okazał się przypadek, gdy na odcinku toru wokół punktu zasilania pojawiają się dwie osie taboru reprezentujące przykładowo wagon dwuosiowy. Znajdują się one

$$U_p(x) = \frac{U_n [A(x) \cdot R_b + B(x)]}{Z_n \cdot [C(x) \cdot R_b + D(x)] + A(x) \cdot R_b + B(x)} \quad (9)$$

względem siebie w odległości l . Tworzony model nie uwzględnia zespołów osi w wózkach dwu- lub trzyosiowych, lecz tylko osie skrajne (np. między wagonami). Po pewnych modyfikacjach możliwe jest wprowadzenie do obliczeń odległości między sąsiadującymi osiami rzędu jednego metra lub mniejszej, ale należy zdecydowanie zwiększyć częstotliwość nadajnika i obliczyć parametry jednostkowe toru.

Jak pokazuje schemat poglądowy z ryc. 3a, dwie osie taboru znajdują się po obydwu stronach punktu zasilania (nadajnika EON) w odległościach x i $l - x$. W programie obliczeniowym przyjmuje się x jako zmienną współrzędną pierwszej osi, a l jako stałą odległość między np. wózkami wagonu. W ten sposób można dokonać symulowanego przemieszczenia się obydwu osi od punktu $x = l$ do punktu $x = 0$. Zatem jedna z osi znajdzie się najpierw nad punktem zasilania, zwierając nadajnik, a potem druga. Gdy x będzie połową l , wówczas uzyska się maksimum napięcia $U_p(x)$ na zaciskach nadajnika.

Patrząc na rycinę 3a, można zauważyć, że między punktem zasilania toru a osiami po lewej i prawej stronie tworzą się dwa odcinki obwodu z parametrami rozłożonymi o długościach odpowiednio x i $l - x$ połączone do tych samych zacisków i obciążone rezystancjami bocznikującymi R_b zestawów kołowych.



Ryc. 3. Schematy zastępcze obwodu torowego z nadajnikiem EON i dwoma osiami taboru

Fig. 3. The track circuit's equivalent diagrams with OEC transmitter and two rolling stock axles

Równania macierzowe do opisu takiego schematu z użyciem macierzy łańcuchowych o parametrach $A(l)$ – $D(l)$ nie są zbyt wygodne, gdyż mamy tu do czynienia z równoległym łączeniem czwórników. W takim przypadku dobrze jest skorzystać z parametrów admitancyjnych Y_{11} – Y_{22} , gdyż elementy macierzy wypadkowej są wówczas sumą parametrów admitancyjnych dla odpowiednich czwórników. Pokazane jest to na ryc. 3c i we wzorach (10) i (12).

Sposób opisu matematycznego połączonych równolegle czwórników podaje literatura [1]. Również w tych samych źródłach zawarte są zależności między parametrami łańcuchowymi A – D a admitancyjnymi Y_{11} – Y_{22} .

Podstawowe równanie macierzowe, będące punktem wyjścia do uzyskania modelu matematycznego obwodu z dwoma osiami, zawarte jest we wzorze (10)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1(x) \\ \mathbf{I}_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11}(x) + \mathbf{Y}_{11}(l-x) & \mathbf{Y}_{12}(x) + \mathbf{Y}_{12}(l-x) \\ \mathbf{Y}_{21}(x) + \mathbf{Y}_{21}(l-x) & \mathbf{Y}_{22}(x) + \mathbf{Y}_{22}(l-x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_p(x) \\ \mathbf{U}_k(x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Napięcie i prąd na wyjściu fragmentów obwodu o parametrach rozłożonych związane są zależnością (11)

$$\mathbf{I}_2(x) = \frac{\mathbf{U}_2(x)}{\mathbf{R}_b} \quad (11)$$

Jeżeli w równaniu (10) macierz admitancyjną zastąpimy macierzą, w której zsumowane są już składowe elementów macierzy dla odcinków x i $l-x$, to przybierze ona postać (12). S jest zmienną pomocniczą dla sumy elementów macierzy admitancyjnej.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11}(s) & \mathbf{Y}_{12}(s) \\ \mathbf{Y}_{21}(s) & \mathbf{Y}_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Korzystając z zależności (10), (11) i postaci macierzy zastępczej (12), można obliczyć impedancję wejściową $\mathbf{Z}_{we}(x)$ takiego obwodu widzianą z zacisków, do których podłączony jest nadajnik. Jest ona wyrażona zależnością (13).

Ostateczna postać zależności napięcia początkowego $\mathbf{U}_p(x)$ od położenia osi względem punktu zasilania obwodu wyraża się wzorem (14). Jest to zarazem model matematyczny układu nadajnik EON–dwie osie taboru.

$$\mathbf{Z}_{we}(x) = \frac{1}{\mathbf{Y}_{11}(s) + \frac{\mathbf{Y}_{21}(s) \cdot \mathbf{Y}_{12}(s)}{\frac{1}{\mathbf{R}_b} - \mathbf{Y}_{22}(s)}} \quad (13)$$

$$\mathbf{U}_p(x) = \frac{\mathbf{U}_n \cdot \mathbf{Z}_{we}(x)}{\mathbf{Z}_n + \mathbf{Z}_{we}(x)} \quad (14)$$

Dalsze „wzbogacanie” modelu wskazane jest raczej w programie obliczeniowym. Na drodze analitycznej nie ma to sensu, ponieważ złożoność modelu nie idzie w parze z uzyskanymi efektami. Dobitnie potwierdzają to zależności (10), (12), (13) oraz te, które tylko zostały zacytowane, jak choćby zależności między elementami macierzy łańcuchowej a elementami macierzy admitancyjnej [1].

4. Przebieg i wyniki badań symulacyjnych

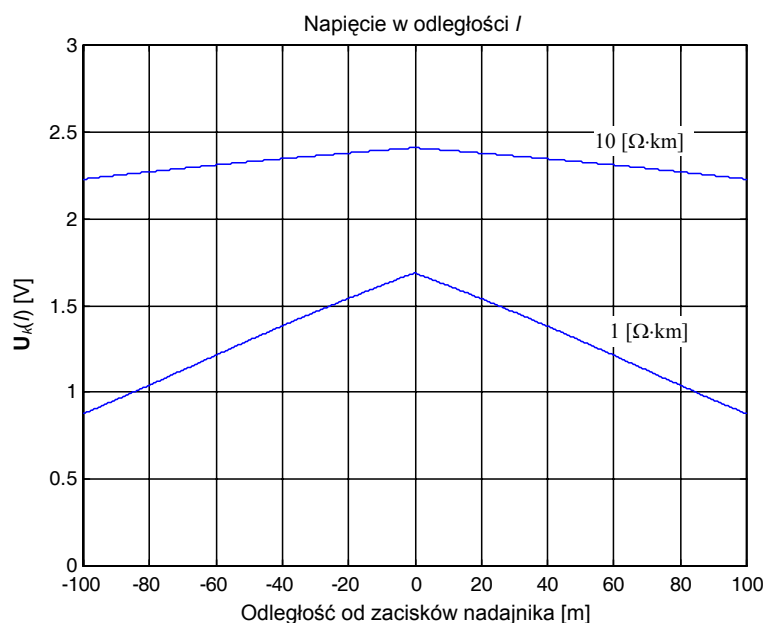
Dla modeli matematycznych zaprezentowanych w rozdziale 3 zostały opracowane programy obliczeniowe w języku Matlab [4], umożliwiające śledzenie zmian określonych w modelach matematycznych wielkości.

Programy obliczeniowe umożliwiają deklarację parametrów określających warunki pracy układu nadajnik EON–tor. Są wśród nich mniej istotne (np. temperatura), ale także mające szczególny wpływ na pracę takiego układu i czasem dodatkowo skojarzone z in-

nymi (np. częstotliwość, rezystancja podtorza). W związku z tym można przewidzieć bardzo szeroki zakres badań symulacyjnych, uwzględniający najdrobniejsze szczegóły. W niniejszym artykule nie ma możliwości zaprezentowania wszystkiego. Przedstawione zostaną najistotniejsze efekty badań, a szczególnie te, które potwierdzają prawidłowość utworzonych modeli matematycznych.

Pierwszym zagadnieniem w poprzednim rozdziale było rozchodzenie się sygnału nadajnika EON w torze prostym nieskończenie długim. Nadajnik o impedancji wewnętrznej $Z_n = 10e^{j40} \Omega$ generował falę sinusoidalną o częstotliwości 20 kHz i sile elektromotorycznej 3 V. Są to dane producenta jednego z typów układu EON. Zakres badań został ograniczony do odcinków toru o długości ± 50 m i rezystancji jednostkowej podtorza zawartej w zakresie 1–10 $\Omega \cdot \text{km}$.

Na pierwszym z wykresów (ryc. 4) pokazano krzywe obrazujące propagację sygnału nadajnika w torze dla dwóch skrajnych wymienionych wcześniej rezystancji jednostkowych podtorza (1 i 10 $\Omega \cdot \text{km}$). Maksimum wartości sygnału (2,4 i 1,7 V) przypada w miejscu podłączenia nadajnika, natomiast jego wartość jest nieco mniejsza niż napięcie U_n (3 V). Jest to związane ze spadkiem napięcia na impedancji wewnętrznej nadajnika – i to tym większym, im mniejsza jest rezystancja jednostkowa podtorza. Oczywiście sprawą jest, że nie tylko ten parametr jednostkowy ma wpływ na rozkład napięcia wzdłuż toru, ale on jest najistotniejszy.



Ryc. 4. Napięcie $U_k(l)$ na końcu odcinka toru o długości l

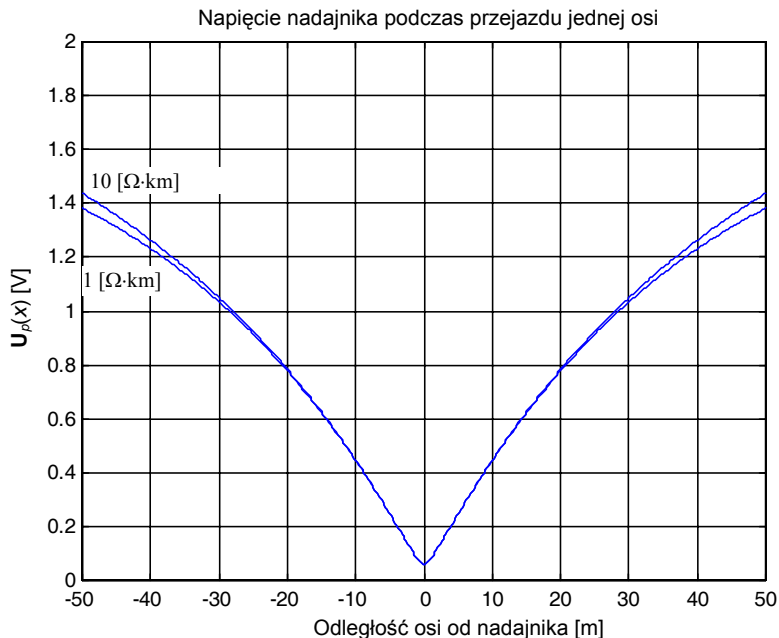
Fig. 4. $U_k(l)$ voltage at the end of a segment, which is l long

Program obliczeniowy umożliwia śledzenie rozchodzenia się sygnału po prawej stronie toru (ryc. 1a) przy obciążonym po lewej stronie torze nieskończenie długim i impedancji

falowej Z_f . Później obliczenia są wykonywane dla lewej części toru przy analogicznym obciążeniu z prawej. Daje to możliwość uzyskania pełnej symetrii krzywych (dla prawej i lewej strony, patrząc od punktu zasilania).

Krzywe na rycinie 4 są zbliżone do wierzchołka trójkąta, gdyż występuje linearyzujący wpływ impedancji falowej jednej części toru. Gdyby pominąć ten wpływ, to krzywe, począwszy od ekstremum, miałyby charakter wykładniczo-opadający. Wartość napięcia w ekstremalnym punkcie powinna być interpretowana jako brak jakiegokolwiek zestawu kołowego w strefie oddziaływania nadajnika EON. Jest to napięcie odniesienia np. przed rozpoczęciem zliczania osi lub służące do korekcji układu mikroprocesorowego stosownie do zmian warunków środowiska. Dalsze szczegółowe informacje na ten temat zawarte będą w innych opracowaniach z tej tematyki.

Kolejny wykres (ryc. 5) jest efektem badań symulacyjnych wpływu współrzędnej jednej osi taboru na wartość napięcia początkowego $U_p(x)$. Podobnie jak poprzednio, badane były zmiany napięcia na odcinkach ± 50 metrów od miejsca podłączenia nadajnika. Także zakres zmian rezystancji podtorza został sprowadzony do przedziału $1\text{--}10 \Omega\text{-km}$. Jak widać, dla szerokiego zakresu rezystancji jednostkowej podtorza wartość minimalna napięcia $U_p(x)$ wynosi w przybliżeniu $0,1 \text{ V}$. Także krzywe na krańcach odcinka $\pm 50 \text{ m}$ praktycznie się pokrywają. Dla rezystancji $1 \Omega\text{-km}$ i współrzędnej -50 m wartość napięcia $U_p(x)$ wynosi $1,38 \text{ V}$. Wzrost rezystancji R_p do $10 \Omega\text{-km}$ skutkuje niewielkim wzrostem wartości $U_p(x)$ dla tej samej współrzędnej do $1,42 \text{ V}$ (krzywa położona wyżej). Świadczy to o niewielkim wpływie dużych zmian rezystancji podtorza na kształt krzywych.



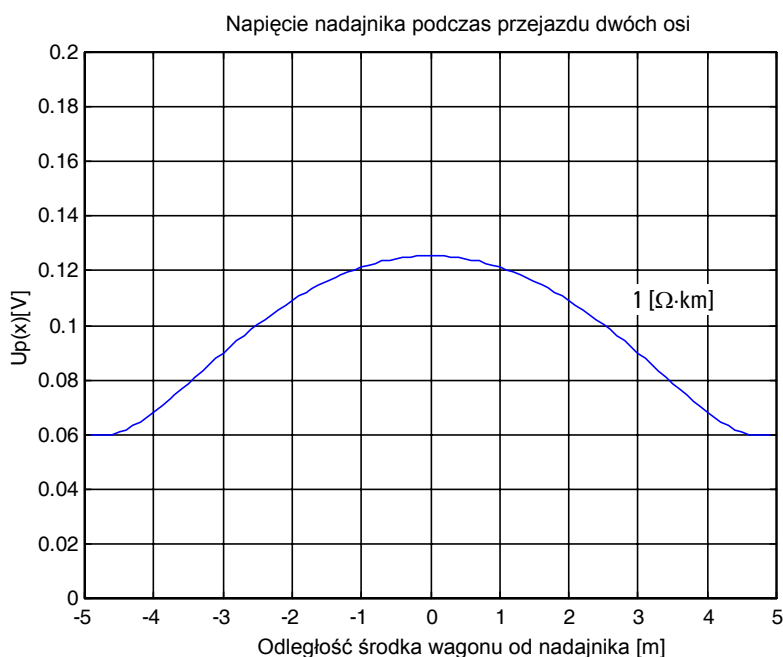
Ryc. 5. Napięcie $U_p(x)$ podczas przemieszczania jednej osi taboru

Fig. 5. $U_p(x)$ voltage during the movement of one rolling stone axle

Przypadek „przejazdu” jednej osi taboru jest dość wirtualny, gdyż żaden wagon czy lokomotywa nie posiadają tylko jednej osi. Przykład ten natomiast bardzo wyraziście uwiadczenia, jakie mogą być fluktuacje wartości napięcia od minimalnego do maksymalnego w miejscu podłączenia nadajnika.

Najtrudniejszym do zamodelowania przypadkiem był przejazd dwóch lub więcej osi. Punktem wyjścia do zrealizowania programu obliczeniowego była zależność (14). W programie uzyskano możliwość zmiany współrzędnej pierwszej osi od wartości $x = 0$, czyli punktu, w którym oś pierwsza, patrząc w kierunku jazdy, znajduje się nad miejscem podłączenia nadajnika, poprzez położenie symetryczne $x = 1/2$ aż do zajęcia przez drugą oś punktu, gdzie podłączony jest nadajnik ($x = 1$). W położeniu symetrycznym ($x = 1/2$) napięcie na zaciskach nadajnika powinno osiągnąć maksimum, którego wartość zależy od odległości między osiami, rezystancji bocznikowania i rezystancji jednostkowej podtorza.

Ten przypadek zobrazowano na ryc. 6. Osie wagonu znajdują się w punktach o współrzędnych odpowiednio -5 m, druga w punkcie o współrzędnej $+5$ m (odpowiada to w przybliżeniu odległości osi wagonu od jego środka), a zaciski nadajnika połączone są z torem w punkcie o współrzędnej 0 . Jak wynika z dalszych szczegółowych badań symulacyjnych, kształt krzywej nie zmienia się po zmianie rezystancji podtorza w granicach $1\text{--}10 \Omega\cdot\text{km}$ i rezystancji bocznikowania R_b . Tego nie widzimy na ryc. 6, gdyż krzywe dla różnych wartości rezystancji pokrywają się dokładnie. Wartości napięć, minimalna ($0,03$ V) i maksymalna ($0,12$ V), pozostają na tym samym poziomie. Upraszcza to znacznie późniejsze rozwiązania aplikacyjne wykorzystujące efekty badań symulacyjnych.



Ryc. 6. Napięcie $U_p(x)$ podczas przejazdu dwóch osi

Fig. 6. $U_p(x)$ voltage during the movement of two axles

5. Podsumowanie

Zaprezentowany w artykule sposób badań symulacyjnych oddziaływania osi pojazdów szynowych na elektroniczne obwody torowe współczesnych generacji jest jedynie wstępnym podejściem. Widać tu wiele możliwych rozwinięć modeli matematycznych takich układów i ich uszczegółowienia. Połączenie drugiego z zaprezentowanych modeli z modelem dla dwóch osi umożliwi pełne prześledzenie zmian napięcia przed wjazdem taboru i po przejeździe kolejnych dwóch osi. Dalsze rozwinięcie programu w Matlabie umożliwi zasymulowanie przejazdu kolejnych grup osi (całego pociągu) w odległościach wzajemnych dowolnie zróżnicowanych. Tu także tkwi ogromne pole do dalszych działań.

Na zakończenie należy jeszcze raz podkreślić, że proponowane typy nadajnika EON-6 nie nadają się do praktycznego zastosowania zmian ich napięć wyjściowych podczas przejazdu wózków dwuosiowych. Opracowane modele układu tor–nadajnik EON są jednak na tyle uniwersalne, że mogą posłużyć i do takich badań, pod warunkiem użycia układu generującego sygnały o odpowiednio wysokich częstotliwościach. Wówczas należy koniecznie uwzględnić część reaktancyjną w impedancji bocznikującej zestawów kołowych.

Przedstawienie nawet skromnej części wyników badań w tym krótkim artykule nie jest możliwe. Wskazane zostały tylko najważniejsze osiągnięcia i dalsze kierunki badań. Powinny być one wstępnym etapem prowadzącym do opracowania mikroprocesorowego układu licznika osi, bazującego na takim rozwiązaniu. Ta tematyka będzie przedmiotem dalszych analiz i kolejnych opracowań.

Literatura

- [1] Bolkowski S., *Teoria obwodów elektrycznych*, WNT, Warszawa 1995.
- [2] Dąbrowa-Bajon M., Karbowski H., *Parametry elektryczne izolowanego odcinka torowego zasilanego prądami o częstotliwościach w zakresie 50–2000 Hz*, Prace Instytutu Transportu PW nr 3, Warszawa 1973.
- [3] Mickiewicz T., *Automatyczne urządzenia zabezpieczenia ruchu na liniach kolejowych*, WKŁ, Warszawa 1966.
- [4] Zalewski A., Cegiela R., *Matlab – obliczenia numeryczne i ich zastosowania*, Wydawnictwo Nakom, Poznań 1996.
- [5] Zębik Z., *Czujnik torowy EON-6*, Automatyka Kolejowa nr 2/89, WKŁ, Warszawa 1989.
- [6] Adtranz Zwus Sp. z o.o., *Dokumentacja techniczno-ruchowa*, DTR-90/EON-6, Katowice 2000.