

УДК 621.331.3

А. БЯЛОНЬ, Д. АДАМСКИ, Ю. ФУРМАН (ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА)

Институт железнодорожного транспорта, 04-275 Варшава, Польша, ул. Хлопицкого 50, тел.: +48 22 4731453, эл. почта: [abialon@ikolej.pl](mailto:abialon@ikolej.pl), [dadamski@ikolej.pl](mailto:dadamski@ikolej.pl), [jfurman@ikolej.pl](mailto:jfurman@ikolej.pl)

## ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСОВ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ДОПУСКАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОМЕХ

### Резонансные явления в контактной сети

Участок контактной сети должен рассматриваться в качестве длинной линии. Это обусловлено большим, по сравнению с длиной волны распространения, расстоянием между начальной и конечной точками контактной сети, особенно при наличии высших гармоник [1].

Явления, происходящие в длинной линии, определяются дифференциальными уравнениями с частными производными:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $R_0$  – удельное активное сопротивление Ом/км;

$L_0$  – удельная индуктивность Гн/км;

$C_0$  – удельная емкость Ф/км;

$G_0$  – удельная проводимость См/км.

Удельные параметры  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $G_0$  не известны заранее и будут вычислены на основе измерений [2].

В стационарном состоянии, при переходе от мгновенного значения  $u(t)$ ,  $i(t)$  к комплексным эффективным значениям  $U$ ,  $I$ , частной производной по отношению к времени, например  $\partial i / \partial t$ , отвечает произведение эффективного значения тока  $I$  и множителя  $j\omega$ , а частной производной по отношению к расстоянию, например  $\partial i / \partial x$ , отвечает производная  $dI/dx$ , поскольку величина  $I$  является функцией расстояния, а не времени [3].

В связи с этим системе уравнений (1) в стационарном состоянии отвечает следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dx} &= (R_0 + j\omega L_0) I \\ \frac{dI}{dx} &= (G_0 + j\omega C_0) U \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R_0 + j\omega L_0 = Z_0$  – удельное комплексное продольное сопротивление линии Ом/км;

$G_0 + j\omega L_0 = Y_0$  – удельная полная комплексная поперечная проводимость линии См/км.

В случае приложения воздействия в виде синусоидального переменного (например, от генератора синусоидальных сигналов) напряжения в контактной сети, распределение его вдоль сети (при измерении расстояния  $x$  от конечной точки линии) будет определяться по зависимости:

$$\begin{bmatrix} U(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch \gamma x & Z_c sh \gamma x \\ \frac{1}{Z_c} sh \gamma x & ch \gamma x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

где  $x$  – координата длины, измеряемая от конечной точки, км;  $U_2$ ,  $I_2$  – напряжение и ток в конце;

$U(x)$ ,  $I(x)$  – напряжение и ток в точке  $x$ ;

$\gamma = \alpha + j\beta$  – постоянная распространения;

$\alpha$  – постоянная затухания;

$\beta$  – фазовая постоянная;

$Z_c$  – волновое сопротивление.

В случае измерений расстояния  $x$  с начальной точки линии распределение напряжения вдоль сети будет определяться по зависимости:

$$\begin{bmatrix} U(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch \gamma x & -Z_c sh \gamma x \\ -\frac{1}{Z_c} sh \gamma x & ch \gamma x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где  $x$  – координата длины, измеряемая от начальной точки в км;

$U_1$ ,  $I_1$  – напряжение и ток в начале линии;

$U(x)$ ,  $I(x)$  – напряжение и ток в точке  $x$ .

В режиме короткого замыкания линии  $U_2=0$ , что после подстановки в формулу (3) дает:

$$\begin{aligned} Uk(x) &= Z_c I_2 sh \gamma x \\ Ik(x) &= I_2 ch \gamma x \end{aligned} \quad (5)$$

Индекс « $k$ » обозначает состояние короткого замыкания.

Аналогично, подставляя  $I_2 = 0$ , получим для холостого хода:

$$U_0(x) = U_2 \operatorname{ch} \gamma x$$

$$I_0(x) = \frac{1}{Z_C} U_2 \operatorname{sh} \gamma x \quad (6)$$

Індекс «0» означає стан холостого ходу.

Приведенні вище формули дозволять теоретично вирахувати значення напруг і струмів в контактній мережі [4]. Ці величини будуть проілюстровані на діаграмах.

Волнове опір обчислюється за формулою:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_o + j\omega L_o}{G_o + j\omega C_o}} = |Z_c| \cdot e^{j\varphi_c} \quad (7)$$

де  $Z_c$  – волнове опір;  
 $R_o, L_o, G_o, C_o$  – удільні параметри лінії;  
 $\varphi_c$  – аргумент волнового опору.

При навантаженні лінії волновим опором не виникає зворотна хвиля. Струм і напруга будуть змінюватися монотонно, збільшуючись експоненціально по мірі наближення до генератора:

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_2 \cdot e^{\gamma x}$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_2 \cdot e^{\gamma x} \quad (8)$$

Обчислення проводилися для контактної мережі Опитувального кільця – Жмигруд.

Для визначення рівнів напруг в обраних пунктах контактної мережі було проведено комп'ютерне моделювання на моделі контактної мережі як ланки чотирьох-полосників типу П [5, 6], яка представлена на рис. 1.

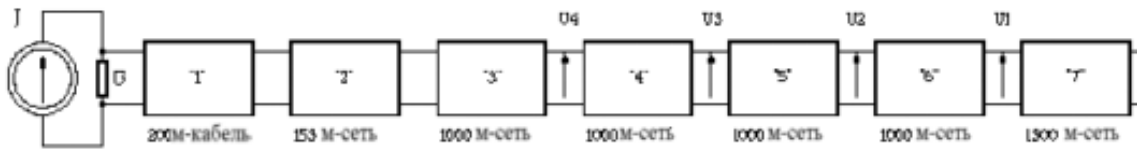


Рис. 1. Модель контактної мережі

Таблиця 1

f [Гц]	Удільні параметри ланки контактної мережі			Удільні параметри фідера живлення і відсмоктувального кабелю		
	Ck [μF/км]	Lk [mH/км]	Rk [Ω/км]	Cs [nF/км]	Ls [mH/км]	Rs [Ω/км]
320	1,64	0,4	2,42	18	1,17	0,54
800	1,55	0,8	3,62	18	1,13	0,84
1600	1,8	0,84	4,53	18	1,08	1,64
3600	1,8	0,8	3,94	18	1,03	3,97
6000	1,8	0,68	10	18	1,02	4
9000	2	0,65	15	18	1,02	4,5

В моделі враховувалися удільні параметри R, L, C контактної мережі, а також удільні параметри фідера живлення контактної мережі (КФ) і відсмоктувального фідера (ОФ). Для кожної частоти були прийняті відповідні параметри чотирьохполосників. Моделювання проводилося для наступних удільних параметрів (виміряних для цієї мережі, табл. 1).

Контактна мережа була замкнута на рейс в кінці моделі ділянки. На рис. 2 представлена спрощена схема моделі, в якій позначені точки визначення рівнів напруг.

На основі побудованої моделі контактної мережі з урахуванням удільних параметрів R, L, C проводилися обчислення на комп'ютері. Модель включала десять чотирьохполосників типу П, імітують визначені ділянки контактної мережі, індуктивність тягової підстанції; фільтр підстанції. Схема моделі представлена на рис. 3. Обчислення за моделлю проводилися для її декількох конфігурацій:

- з фільтрами підстанції і без них;
- ділянку з одностороннім і двохстороннім живленням;
- електровоз (струмове впливання з змінної частотою (0÷30 кГц) знаходиться в кінці і в середині досліджуваної ділянки).

В моделі прийнято, що на ділянці тягової мережі (ТМ) знаходиться один електровоз. Моделювання проводилося для наступних параметрів моделі (див. табл. 2).

Деякі результати обчислень представлені на графіках (рис. 4-6) для системи живлення і секціонування Опитувального кільця – Жмигруд.

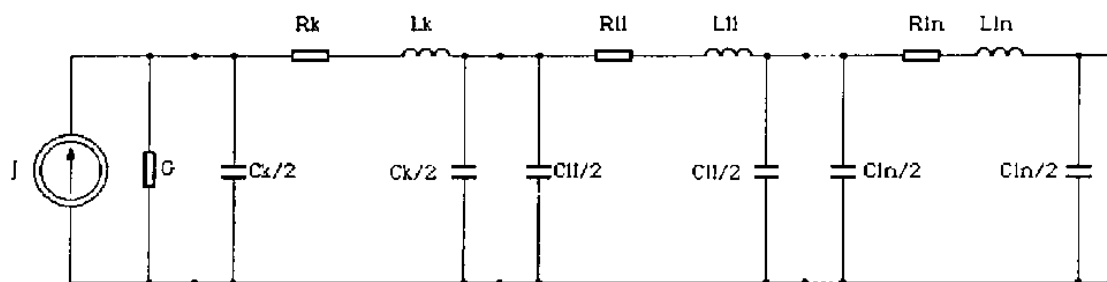


Рис. 2. Упрощенная модель контактной сети

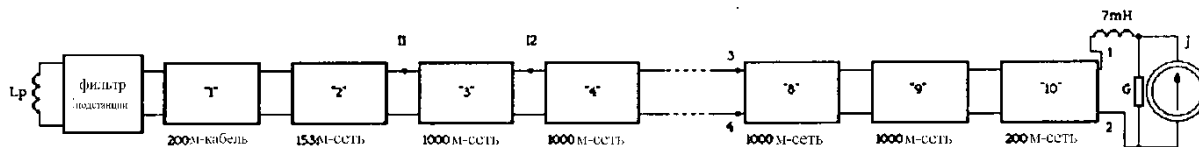


Рис. 3. Модель контактной сети, использованная для вычислений

Таблица 2

Электрические параметры модели

№ п.п.	Параметры	Значение параметра		
1	Индуктивность подстанции	$L = 1,75 \text{ мГн}$		
2	Параметры фильтра подстанции	$C1 = 40 \text{ мФ}$ $L1 = 0,44 \text{ мГн}$ $RL1 = 0,072 \text{ Ом}$	$C2 = 90 \text{ мФ}$ $L2 = 0,78 \text{ мГн}$ $RL2 = 0,23 \text{ Ом}$	$C3 = 100 \text{ мФ}$
3	Удельные параметры кабеля питания	$C = 1,8 \text{ мФ/км}; L = 0,8 \text{ мФ/км}; R = 9,25 \text{ Ом/км}$		
4	Удельные параметры контактной сети	$C = 18 \text{ нФ/км}; L = 1,2 \text{ мГн/км}; R = 5,6 \text{ Ом/км}$		

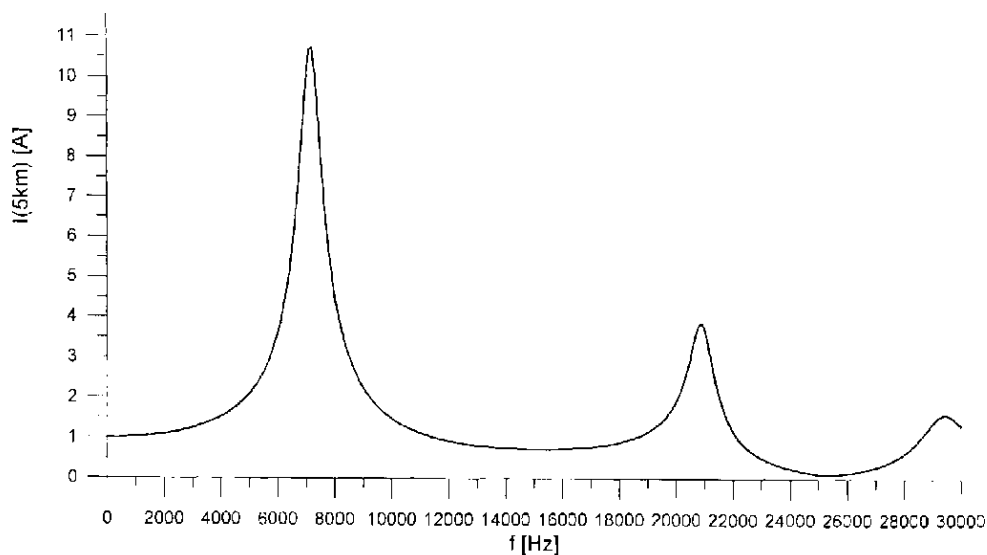


Рис. 4. Ток сети на 5 км в функции частоты, генерирующий источник в конце участка, фильтр подстанции включен

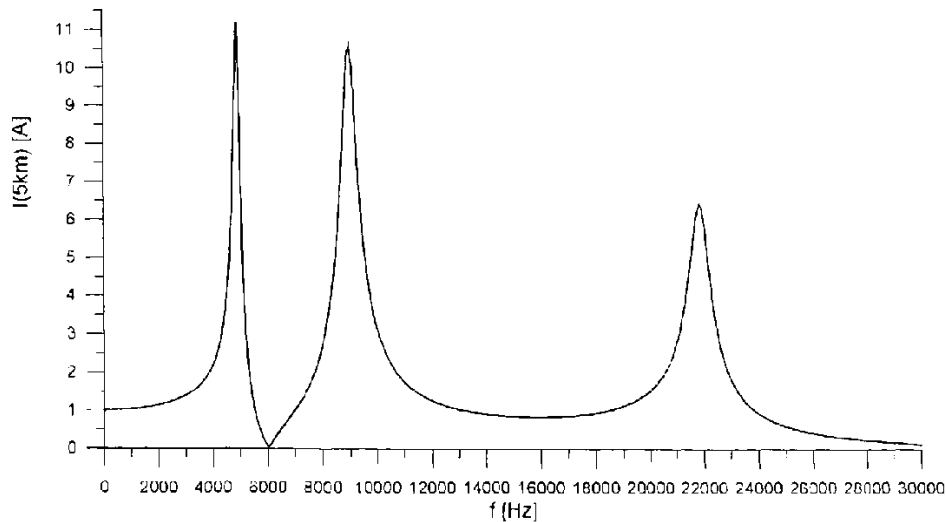


Рис. 5. Ток сети на 5 км в функции частоты, генерирующий источник в конце участка, фильтр подстанции отключен

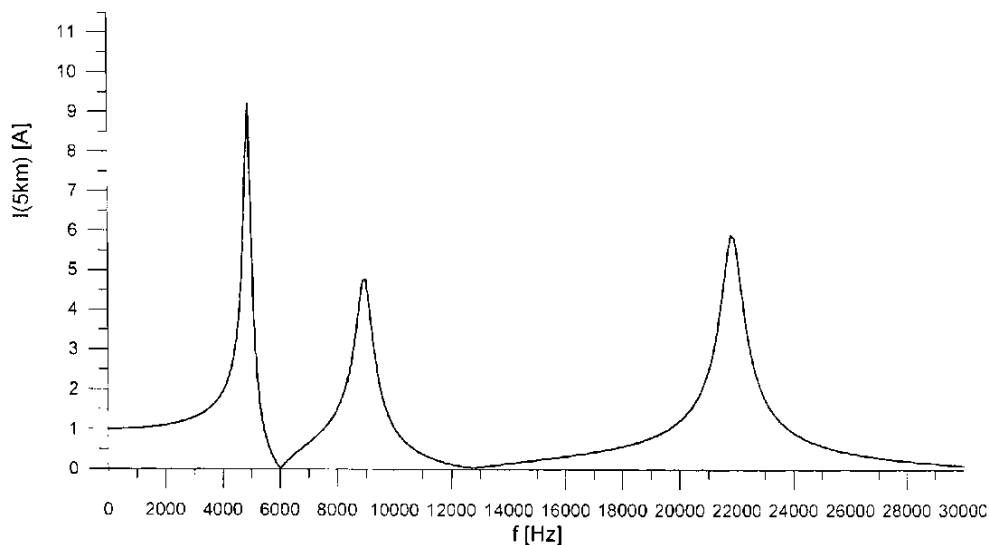


Рис. 6. Ток сети на 7 км в функции частоты, генерирующий источник по середине участка, фильтр подстанции отключен

Из приведенных данных моделирования следует, что для системы с односторонним питанием с включенным фильтром подстанции, в ТС возникают резонансные частоты 7,2 кГц и 20,9 кГц, соответствующие им кратности составляют 11,4 и 9,14 для локомотива в конце участка, а также 7,3 и 7,9 – для локомотива в середине участка. Для той же схемы с отключенным фильтром подстанции возникают резонансные частоты 4,9 кГц, 9,0 кГц и 21,8 кГц, кратность которых составляет 13,2, 9,9 и 11,3 для локомотива в конце участка, а также 10,9, 4,5 и 10,4 для локомотива в середине участка. Для схемы участка с двусторонним питанием с включенным фильтром подстанции, в ТС возникает резонансная частота 13,4 кГц и кратность 1,0 для локомотива в конце участка, а также 8,2 кГц для локомотива в середине участка. В аналогичном случае, но с отключенным фильтром подстанции, в ТС

возникают резонансные частоты 5,2 кГц и 16,4 кГц, кратность которых составляет соответственно 5,9 и 2,1 для локомотива в конце участка а также 7,4 и 9,7 для локомотива посередине участка.

Резонансные частоты зависят от схемы электроснабжения и длины участка, а амплитуды – от координаты поезда. В случае одностороннего питания с одним локомотивом, которое имеет место на Опытном кольце, возникает резонанс в диапазоне 5÷9,4 кГц для частоты 7,2 кГц. В случае двухстороннего питания резонанс передвигается к 13,4 кГц и происходит в диапазоне 13,2÷13,6 кГц.

Измерения, для подтверждения расчетов, проводились на Опытном кольце в городе Жмигруд. Испытуемая сеть была отключена от шин ТП. На тяговой подстанции на исследуемый участок ТС подавался синусоидальный ток с управляемой частотой при помощи генератора

с усилителем. В конце было осуществлено гальваническое соединение КС и обратной цепи. Вдоль исследуемого участка контактной сети двигалась автодрезина с двигателем внутреннего сгорания, что облегчало измерения напряжений между контактной сетью и обратной цепью в избранных точках. Из этого вытекает, что испытания проводились в функции времени и пути (расстояния). Благодаря радиосвязи была обеспечена синхронизация измерений.

Результаты измерений сравнивались с результатами вычислений на модели. Из этого сравнения следует, что результаты вычисления близки к измеренным значениям. Разница составляет от 0,58% до 5,9%. Результаты измерений при частоте 3600 Гц отличаются от вычисленных значений (ошибка около  $7 \div 10\%$ ) – это обусловлено резонансной частотой этого участка сети и вытекающими из этого измерительными ошибками.

Теоретический анализ, показал, что участок длиной в 5,43 км уже можно считать длинной линией с распределенными параметрами. Вычисления на модели и измерения очень близки друг другу, при условии правильного принятия удельных параметров контактной сети. Моделирование контактной сети как цепи из четырехполосников типа П является хорошим методом оценки явлений, возникающих в контактной сети как линии большой длины.

Из результатов проведенного моделирования следует, что в испытуемой ТС, длиной в 5,43 км, при одностороннем питании появляются резонансные частоты 7,2 кГц и 20,9 кГц при соответственно 11 и 9 кратном усилении тока. Зато при двухстороннем питании, в анализируемом диапазоне выступает, одна резонансная частота 13,4 кГц.

Представленные выше частотные характеристики кольца в г. Жмигруд относятся к случаю, в котором на моделируемом участке находится только один локомотив (такие условия возникают во время пробных поездок по опытному кольцу).

### Влияние на уровень помех

Поскольку резонансные частоты в контактной сети - как правило, выше, чем 1000 Гц, необходимо считаться с их воздействием на работу рельсовых цепей, работающих на частотах выше 1 кГц, то есть на рельсовые цепи, работающие в диапазоне  $1 \div 3$  кГц и цепи, работающие в полосе  $7 \div 16$  кГц и  $20 \div 36$  кГц. Для этих типов рельсовых цепей явление резонанса в контактной сети влияет на уровень допускаемых параметров помех. Полученные из измерений допус-

каемые параметры возмущений определяют в соответствии с формулой

$$A_{\text{ДР}} = A_{\text{Д}} \cdot Q^{-1} \quad (9)$$

где:  $A_{\text{ДР}}$  – допускаемая величина с резонансом;  $A_{\text{Д}}$  – допускаемая величина без резонанса;

$Q$  – добротность тяговой сети.

Уравнение (9) справедливо для предельных значений амплитуд помех, для которых частота совпадает с резонансной частотой тяговой сети. Другими словами, расстояние от допустимой амплитуды помех для частоты, совпадающей с частотой резонанса, должно быть увеличено в соответствии с формулой

$$C_{\text{Р}} = C \cdot Q \quad (10)$$

где:  $C_{\text{Р}}$  – расстояние от помех с резонансом;

$C$  – расстояние от помех с резонансом;

$Q$  – добротность тяговой сети.

### Выводы

Резонансы в контактной сети влияют на уровень помех в рельсовых цепях, работающих на частотах выше 1 кГц. Существование резонансов влияет также на приемлемые величины параметров помех для рельсовых цепей и определения расстояния помех от рабочих сигналов рельсовых цепей.

Резонансные явления в контактной сети должны быть приняты во внимание при определении допустимых параметров помех для электропоездов и рельсовых цепей. Кроме того, при разработке новых типов рельсовых цепей при выборе частоты их работы должны быть учтены явления резонанса в тяговой сети.

### REFERENCES

1. Sychenko, V. G. *Modeljuvannja elektromagnitnyh procesiv u tjavovij merezhi postijnogo strumu* [Simulation of electromagnetic processes in power network of DC]. *Visnyk Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu zaliznychnogo transportu im. ak. V. Lazarjana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National Technical University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, vol. 38, pp. 73-76.
2. Określenie dopuszczalnych poziomów i parametrów zakłóceń dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym / Praca IK 4430/10. Warszawa, 2011.
3. Białoń A. Badanie kompatybilności elektromagnetycznej taboru z urządzeniami wykrywania pociągu z uwzględnieniem normy EN 50238 *Problemy Kolejnictwa*, z.152 / A. Białoń, D. Adamski, P. Pajka // Warszawa, 2011.
4. Untersuchung der Beeinflussung von Glaisstromkreisen. Frage A 122 / Bericht nr 9. Utrecht, 1973.

5. Białoń A. Dopuszczalne parametry zakłóceń dla obwodów torowych stosowanych na PKP/ A. Białoń, J. Furman, A. Kazimierzczak, Ł. Zawadka // Logistyka 6, 2011.

kolejnictwa, z 152/ A. Białoń, A. Dłużniewski, Ł. John // Warszawa, 2011. - S. 51-66

6. Białoń A. Emisja zaburzeń radioelektrycznych emitowanych przez tabor kolejowy Problemy

Поступила в печать 29.03.2016.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

При оценке уровней тяговых помех в рельсовых цепях должны быть приняты во внимание не только помехи, вызванные постоянной составляющей тягового тока, но и вызванные его переменной составляющей. Переменный компонент стал играть более важную роль при внедрении на электровозах импульсного управления мощностью и скоростью поезда. Уровень помех в системе тяговая подстанция–электровоз–тяговая подстанция зависит в первую очередь от удельных параметров контактной сети и ее конфигурации, параметров тяговой подстанции и электровоза. Электровоз и тяговая подстанция являются источниками помех, а их уровень зависит от расстояния между ними. В определенных ситуациях организации железнодорожного движения, при определенных расстояниях между тяговой подстанцией и электровозом, а также при взаимном расположении электровозов может происходить увеличение уровня помех. Это обусловлено существованием резонансов в контактной сети.

**Ключевые слова:** контактная сеть, электромагнитные помехи, резонанс, волновое сопротивление, модель.

УДК 621.331.3

БЯЛОНЬ, АДАМСКИ Д., Ю. ФУРМАН (ИНСТИТУТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ)

Институт залізничного транспорту, 04-275 Варшава, Польша, вул. Хлопцького 50, тел.: +48 22 4731453, e-mail: [abialon@ikolej.pl](mailto:abialon@ikolej.pl), [dadamski@ikolej.pl](mailto:dadamski@ikolej.pl), [jfurman@ikolej.pl](mailto:jfurman@ikolej.pl).

## ВПЛИВ РЕЗОНАНСІВ У КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ НА ДОПУСТИМІ ПАРАМЕТРИ ПЕРЕШКОД

При оцінці рівнів тягових завад в рейкових колах повинні бути прийняті в увагу не тільки перешкоди, викликані постійної складової тягового струму, але і викликані його змінної складової. Змінний компонент став грати більш важливу роль при впровадженні на електровозах імпульсного керування потужністю і швидкістю поїзда. Рівень перешкод в системі тягова підстанція–электровоз–тягова підстанція залежить в першу чергу від питомих параметрів контактної мережі та її конфігурації, параметрів тягової підстанції та електровоза. Электровоз і тягова підстанція є джерелами перешкод, а їх рівень залежить від відстані між ними. У певних ситуаціях організації залізничного руху, при певних відстанях між тяговою підстанцією і електровозом, а також при взаємному розташуванні електровозу може відбуватися збільшення рівня перешкод. Це обумовлено існуванням резонансів в контактній мережі.

**Ключові слова:** контактна мережа, електромагнітні перешкоди, резонанс, хвильовий опір, модель.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саенко Ю. Л.*

UDC 621.331.3

A. BIAŁOŃ, D. ADAMSKI, Ju. FURMAN (INSTYTUT KOLEJNICTWA)

Instytut Kolejnictwa, 50 Chłopickiego Str., 04-275 Warsaw, Poland, [abialon@ikolej.pl](mailto:abialon@ikolej.pl), [dadamski@ikolej.pl](mailto:dadamski@ikolej.pl), [jfurman@ikolej.pl](mailto:jfurman@ikolej.pl).

## THE INFLUENCE OF RESONANCES IN THE CONTACT NETWORK ON THE ALLOWABLE INTERFERENCE PARAMETERS

When assessing levels of traction interference in rail circuits must be taken into account not only interference caused by DC component of traction current, but caused by its variable component. The AC component began to play a more important role in the implementation of the electric pulse controlling the power and speed of the train. The noise level in the system of traction substation–electric–traction substation depends primarily on the specific parameters of a contact network and its configuration parameters of traction substation and electric locomotive. Locomotive and traction sub-station are interference sources, and their level depends on the distance between them. In certain situations, the organization of rail traffic, at certain distance the deposits between the traction substation and electric locomotive, as well as at a mutual location, electric locomotive can increase the level of interference. This is due to the existence of resonances in the contact network.

**Keywords:** contact network, electromagnetic interference, resonance, impedance, model.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*