

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДВУСТРАННИ НЕОГРАНИЧЕНИ РЕЛСОВИ ВЕРИГИ

Неделчо Неделчев*, Николай Николов**

nedelchev@vtu.acad.bg, niky_angel@yahoo.com

**ВТУ“Тодор Каблешков”, София 1574, ул. “Гео Милев” №158,
**”Метрополитен” АЕД, София 1000, ул. “Княз Борис I” №121
България*

Ключови думи: *релсова верига, синтез, максимална дължина.*

Резюме: *Предложена е заместителна схема на релсова верига с един захранващ и два релейни края. Разработени са четириполюсни модели в нормален, шунтов и контролен режим. Изследвана е шунтовата чувствителност и чувствителността към прекъсване на релса по отношение на всеки от приемниците. Предложен е алгоритъм за абстрактен синтез, чрез който са определени оптималните входни импеданси на апаратурата в краищата. Определена е максималната дължина на безнаставовите релсови вериги в Софийския метрополитен.*

1. Въведение

Основен недостатък на класическите релсови вериги е необходимостта от физически изолиращи настави. Освен че са източник на лоша надеждност, физическите изолиращи настави отслабват механичните качества на железния път и са несъвместими със световната тенденция за високоскоростно движение по заварени релси. Всичко това доведе до разработването и внедряването на релсови вериги без изолиращи настави (неограничени релсови вериги). За тях е характерна по-висока сигнална честота, като последната навлиза в тоналния диапазон. Това позволява да се намалят припокриващите се зони на чувствителност, да се реализират по-ефективни електрически изолиращи настави, да се създадат благоприятни условия за предаване на информация от релсовите вериги в локомотива на влака. Едновременно с това, повишаването на сигналната честота скъсява дължината на контролирания от релсовата верига железен път, което осъществява съществено осигурителните системи.

Увеличаването на дължината на тоналните релсови вериги може да се постигне по два начина. При първия от тях, по дължината на релсовата линия се включват компенсиращи кондензатори [1,2,3,4], а при втория - един захранващ

източник захранва два релейни края, разположени от лявата и от дясната му страна [5,6,7,8].

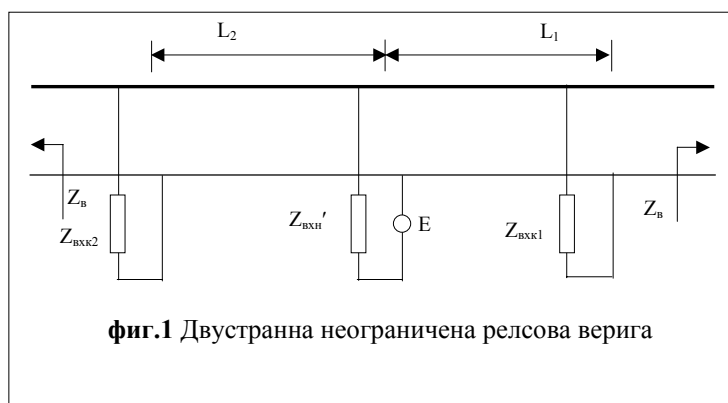
За определяне на максималната дължина на релсовите вериги с физически изолиращи настави съществува стройна теория [1,9,10]. Разработени са и компютърни симулатори [4]. За изследване на неограничени релсови вериги може да се използва общата теория на релсовите вериги, но отсъствието на физически изолиращи настави налага да се внесат съществени корекции в математическия модел. Същността на тези корекции е да се отчете влиянието на съседните релсови вериги. Опит за математично моделиране на неограничена релсова верига е направен в [11]. При него релсовата линия е разгледана като четириполусник, без да се отчете присъствието на земята. Съседните релсови линии са заместени с техните вълнови импеданси. Сериозен научен подход към проблема се съдържа в [9] и [12], но изследванията не са доведени докрай, като позволяват определяне на коефициентите на релсовия четириполусник само за нормален режим. Цялостен модел на неограничена релсова верига може да се намери в [2,13,14], а компютърни симулатори в [4,15,16].

Всички посочени по-горе изследвания се отнасят за неограничени релсови вериги с един релеен край. Не са известни публикации, които предлагат математически модел на двустранна неограничена релсова верига, а с предлаганите компютърни симулатори, като правило не може да се изследва коректно чувствителността на релсовата верига към прекъсване на релсовите нишки.

Целта на настоящата работа е да се разработи прецизен математически модел на двустранна неограничена релсова верига, да се анализират основните режими на работа и да се проведе абстрактен синтез на релсови вериги от този тип.

2. Модел на двустранна неограничена релсова верига в нормален режим

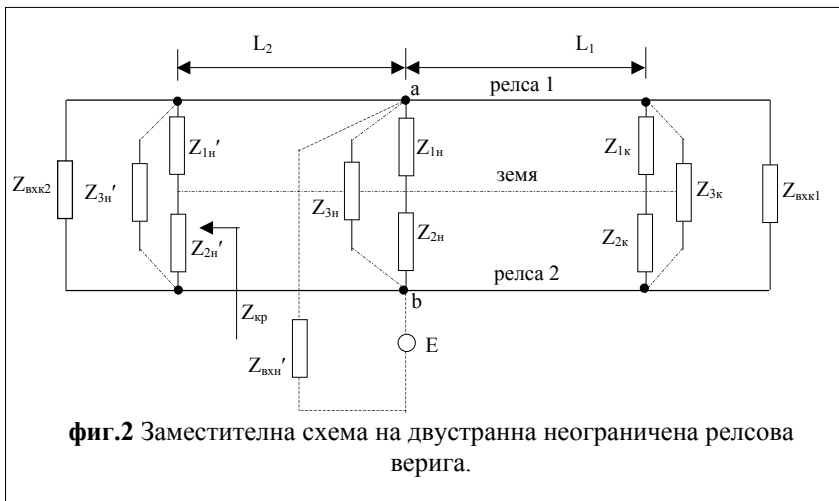
Двустранната неограничена релсова верига има схемата от фиг. 1, където: $Z_{вхн}$ е обратния входен импеданс на общия захранващ край, а $Z_{вхк1}$ и $Z_{вхк2}$ са входните импеданси на двата релейни края.



По този начин с един захранващ източник (E) се контролират два пътни участъка - с дължини респективно L_1 и L_2 . В ляво от втория пътен приемник и в дясно от първия има безкрайно дълги линии, чиито входни импеданси ще оказват влияние

върху работата на релсовата верига чрез вълновия импеданс $Z_в$.

При приемането, че ще бъдат изследвани чувствителностите към шунтиране и прекъсване на пътния участък с дължина L_1 , релсовата верига може да се представи със заместителната схема от фиг. 2.



В нея с $Z_{1к} = Z_{1н}'$ и $Z_{2к} = Z_{2н}'$ са заместени входните импеданси на безкрайно дългите двупроводни линии образувани между релса 1, респективно релса 2 и земя, а с $Z_{3к} = Z_{3н}'$ е изразен входния импеданс на безкрайно дългата линия между двете релси. С $Z_{1н}$, $Z_{2н}$

и $Z_{1н}$ са изразени аналогичните входни импеданси, но при ограничението, че на разстояние L_2 между двете релси е включен импеданса $Z_{вхк2}$. Съгласно [18], за симетрична релсова верига са в сила равенствата :

- (1) $Z_{1к} = Z_{1н}' = Z_{1н} = Z_{2к} = Z_{2н}' = Z_{2н} = Z_{в1}$;
- (2) $Z_{3к} = Z_{3н}' = 2Z_{в1}Z_{в2}/(Z_{в1} - Z_{в2})$,

където $Z_{в1}$ и $Z_{в2}$ са вълновите импеданси на релсовата линия при последователно и паралелно свързване на релсите.

Импедансът $Z_{3н}$ може да се определи чрез Z_{pp} , представляващ входния импеданс на релсовата линия, разположена отляво на захранващия край и гледана от към точки **a** и **b**.

$$(3) \quad Z_{pp} = Z_{в}(Z_{кр} \operatorname{ch} \gamma_2 L_2 + Z_{в} \operatorname{sh} \gamma_2 L_2) / (Z_{кр} \operatorname{sh} \gamma_2 L_2 + Z_{в} \operatorname{ch} \gamma_2 L_2),$$

където:

$$(4) \quad Z_{кр} = Z_{в} Z_{вхк2} / (Z_{в} + Z_{вхк2});$$

γ_2 е константата на разпространение на релсовата линия при последователно свързани релси.

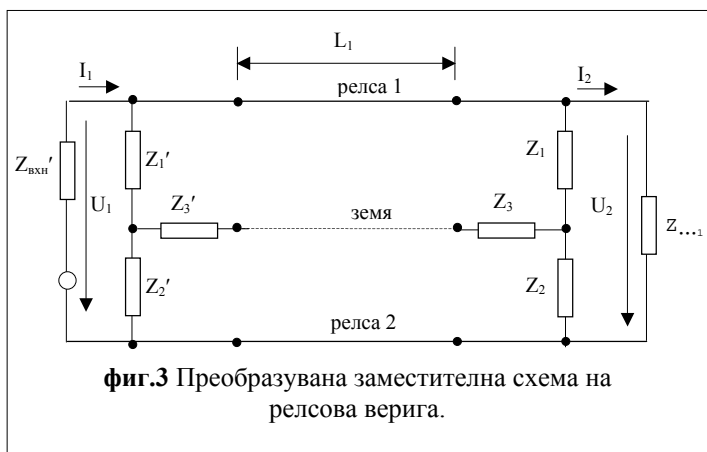
Като се изходи от факта, че Z_{pp} по дефиниция е

$$(5) \quad Z_{pp} = (Z_{1н} + Z_{2н})Z_{3н} / (Z_{1н} + Z_{2н} + Z_{3н});$$

и се отчете равенство (1), за $Z_{3н}$ се получава следния израз:

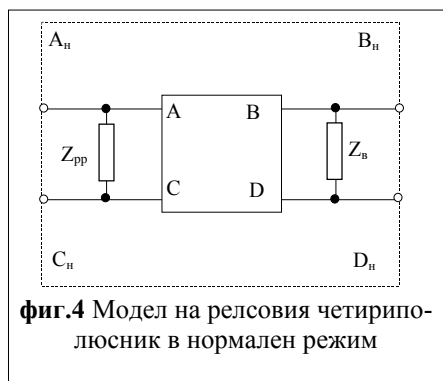
$$(6) \quad Z_{3н} = 2Z_{в1}Z_{pp} / (2Z_{в1} - Z_{pp}).$$

Чрез преобразувания "триъгълник-звезда" заместителната схема на релсовата верига може да се сведе до вида от фиг. 3, където:



$$(7) Z_1 = Z_2 = Z_{1к}Z_{3к}/(2Z_{1к} + Z_{3к}) = Z_{в2}; \quad (8) Z_3 = Z_{1к}^2/(2Z_{1к} + Z_{3к}) = (Z_{в1} - Z_{в2})/2;$$

$$(9) Z_1' = Z_2' = Z_{1н}Z_{3н}/(2Z_{1н} + Z_{3н}) = Z_{рр}/2; \quad (10) Z_3' = 0,5(Z_{в1} - 0,5Z_{рр});$$



При допуснатата асиметрия в релсовата линия през импедансите Z_3 и Z_3' не протича ток, което означава, че за нормален режим релсовият четириполюсник може да се представи по показания на фиг.4 начин, а за коефициентите му да се напишат следните равенства:

$$(11) A_n = A + B/Z_1;$$

$$(12) B_n = B;$$

$$(13) C_n = A/Z_{рр} + C + (B/Z_{рр} + D)/Z_{в};$$

$$(14) D_n = B/Z_{рр} + D,$$

където:

$$(15) A = D = \text{ch}\gamma_2 L_1; \quad (16) B = Z_{в} \text{sh}\gamma_2 L_1; \quad (17) C = \text{sh}\gamma_2 L_1 / Z_{в};$$

3. Моделиране на релсовата верига в шунтов и контролен режим и критични характеристики

3.1. Шунтов режим

Коефициентите на неограничените двустранни релсови вериги при наличие на шунт със стойност $R_{ш}$ в пределите на участъка с дължина L_1 могат да се определят с помощта на заместителната схема от фиг.5. Същата е съставена за безкрайно голяма стойност на съпротивлението на изолацията ($r_u = \infty$).

$$(18) A_{ш} = A_{ш1}; \quad (19) B_{ш} = B_{ш1};$$

$$(20) C_{ш} = C_{ш1} + A_{ш1}/Z_1; \quad (21) D_{ш} = D_{ш1} + B_{ш1}/Z_1,$$

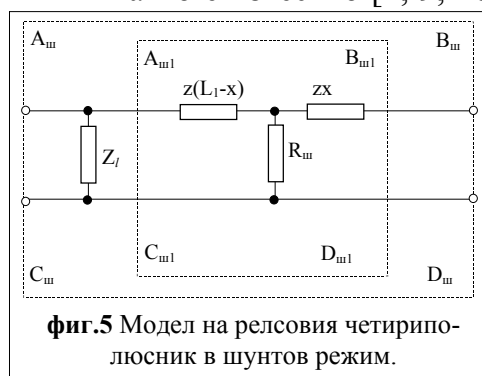
където:

$$(22) A_{ш1} = 1 + z(L_1 - x)/R_{ш}; \quad (23) B_{ш1} = zL_1 = z^2 x(L_1 - z)/R_{ш};$$

$$(24) C_{ш1} = 1/R_{ш}; \quad (25) D_{ш1} = 1 + zx/R_{ш};$$

$$(26) Z_1 = zL_2 + Z_{вк2}; \quad z \text{ е километричния импеданс на релсовата линия.}$$

Както е известно [1, 9, 10] шунтовата чувствителност на релсовата верига



може да се установи по стойността на критерия $K_{ш}$, дефиниран като отношение между токовете в пътния приемник преди и след шунтирането при критични стойности на първичните параметри. Тъй като напрежението на хранящия източник е константно, $K_{ш}$ се изразява като отношение на съответните импеданси на предаване:

$$(27) K_{ш} = |Z_{пш}|/(N|Z_{п}|),$$

където:

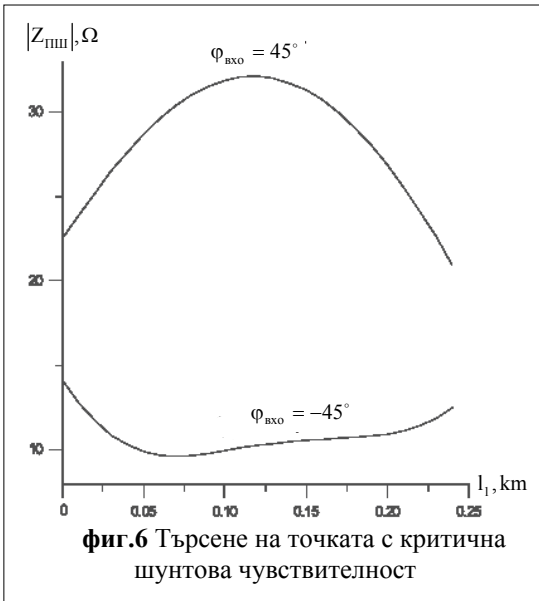
$$(28) Z_{п} = A_n Z_{вк1} + B_n + (C_n Z_{вк1} + D_n) Z_{вн}';$$

N отразява коефициента на възврата на пътния приемник.

Шунтовия режим е изпълнен, ако за всяко x е изпълнено неравенството:

$$(29) K_{ш} \geq 1.$$

При изследване на шунтовия режим на релсовите вериги е важно да се знае предварително кои са точките с критична чувствителност. Най-често това са



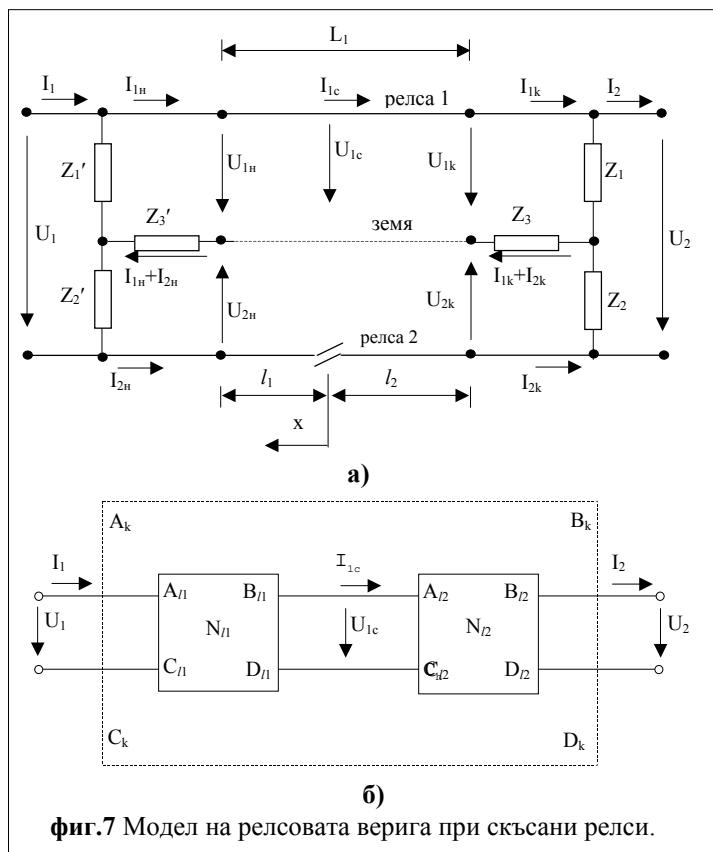
краищата. В разглеждания най-общ случай не е възможно да се изведе удобна аналитична чувствителност за координатата с най-лоша чувствителност. Като илюстрация на това твърдение е достатъчно да се погледне фиг.6, на която се вижда характера на разпределението на импеданса $Z_{шш}$, а следователно и на $K_{ш}$ по дължината на релсовата линия.

Показаните резултати са за сигнална честота $f = 750 \text{ Hz}$; $|Z_{вхн}| = |Z_{вхк1}| = |Z_{вхк2}| = |Z_{вх0}| = 0,5\Omega$; коефициент на повърхностна утечка $p = 9,1$; $L_1 = L_2 = 0,25\text{km}$; фази на импедансите в краищата $\varphi_{вхн} = \varphi_{вхк1} = \varphi_{вхк2} = \varphi_{вх0}$. Примерът показва, че за прецизната

проверка на шунтовата чувствителност, тя следва да се изчислява с малка стъпка по цялата ѝ дължина.

3.2. Контролен режим

За определяне на коефициентите на релсовия четириполусник при скъсана релса в участъка с дължина L_1 се използват схемите от фиг.7. По аналогия с [1] релсовият четириполусник е разделен на две части N_{l1} и N_{l2} - с коефициенти $A_{l1}, B_{l1}, C_{l1}, D_{l1}$ и $A_{l2}, B_{l2}, C_{l2}, D_{l2}$, като коефициентите на целия четириполусник A_k, B_k, C_k, D_k представляват матричното произведение на коефициентите на съответните четириполусници. За определяне на коефициентите на четири-



полусника N_l се търси зависимостта между напрежението и тока в началото му (U_1 и I_1) и напрежението и тока в неговия край (U_{1c} и I_{1c}).

Възможност за това дават равенствата:

$$(30) U_1 = U_{1n} - U_2;$$

$$(31) I_1 = U_{1n}/Z_1' + I_{1n}(1+Z_3'/Z_1') + I_{2n}Z_3'/Z_1',$$

където:

$$(32) U_{1n} = A_1 \text{ch} \gamma_1 l_1 + A_2 \text{sh} \gamma_1 l_1 + A_3 \text{ch} \gamma_2 l_1 + A_4 \text{sh} \gamma_2 l_1;$$

$$(33) U_{2n} = A_1 \text{ch} \gamma_1 l_1 + A_2 \text{sh} \gamma_1 l_1 - A_3 \text{ch} \gamma_2 l_1 - A_4 \text{sh} \gamma_2 l_1;$$

$$(34) I_{1n} = (A_1 \text{sh} \gamma_1 l_1 + A_2 \text{ch} \gamma_1 l_1)/Z_{B1} + (A_3 \text{sh} \gamma_2 l_1 + A_4 \text{ch} \gamma_2 l_1)/Z_{B2};$$

$$(35) I_{2H} = (A_1 \operatorname{sh} \gamma_1 l_1 + A_2 \operatorname{ch} \gamma_1 l_1) / Z_{B1} - (A_3 \operatorname{sh} \gamma_2 l_1 + A_4 \operatorname{ch} \gamma_2 l_1) / Z_{B2};$$

A_1, A_2, A_3 и A_4 са интеграционни константи, за чието определяне се съставят граничните условия за точките с координати $x = 0$ и $x = l_1$:

$$(36) A_2 / Z_{B1} - A_4 / Z_{B2} = 0; \quad (37) A_2 / Z_{B1} + A_4 / Z_{B2} = I_{1c};$$

$$(38) A_1 + A_3 = U_{1c}; \quad (39) U_{1H} + U_{2H} + (Z_1' + 2Z_3')(I_{1H} + I_{2H}) = 0;$$

След заместване в (39) на величините $Z_1', Z_3', U_{1H}, U_{2H}, I_{1H}$ и I_{2H} с техните равни от равенства (9), (10) и (32)÷(35) последното добива вида:

$$(40) A_1 + A_2 = 0.$$

Решението на системата (36), (37), (38) и (40) е:

$$(41) A_1 = -Z_{B1} I_{1c} / 2; \quad (42) A_2 = Z_{B1} I_{1c} / 2;$$

$$(43) A_3 = U_{1c} + Z_{B1} I_{1c} / 2; \quad (44) A_4 = Z_{B2} I_{1c} / 2.$$

Коефициентите $A_{1l}, B_{1l}, C_{1l}, D_{1l}$ се определят числено като се изберат две произволни комбинации U_{1c}^a, I_{1c}^a и U_{1c}^b, I_{1c}^b за U_{1c} и I_{1c} , като $U_{1c}^a / I_{1c}^a \neq U_{1c}^b, I_{1c}^b$. За всяка двойка U_{1c}^i, I_{1c}^i чрез равенства (30) и (31) се определят двойка U_1^i, I_1^i . Получава се системата:

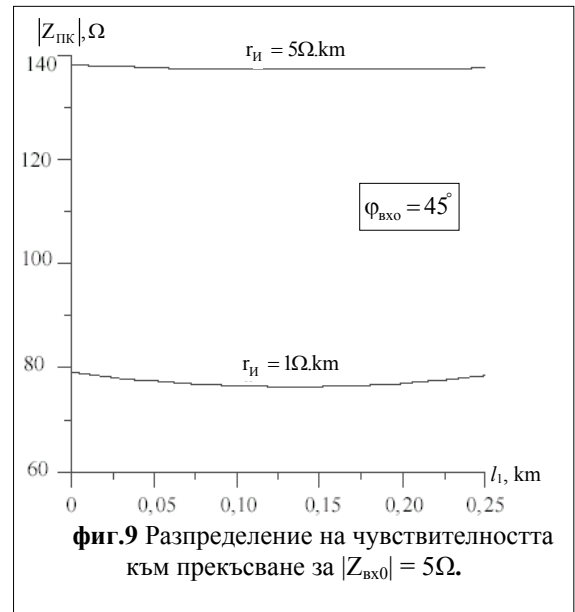
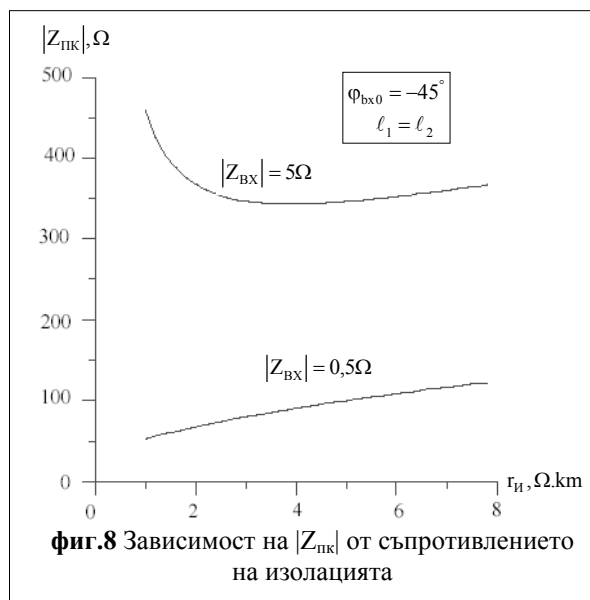
$$(45) U_1^a = A_{1l} U_{1c}^a + B_{1l} I_{1c}^a; \quad (46) I_1^a = C_{1l} U_{1c}^a + D_{1l} I_{1c}^a;$$

$$(47) U_1^b = A_{1l} U_{1c}^b + B_{1l} I_{1c}^b; \quad (48) I_1^b = C_{1l} U_{1c}^b + D_{1l} I_{1c}^b.$$

чието решение дава търсените коефициенти.

Коефициентите $A_{l2}, B_{l2}, C_{l2}, D_{l2}$ се определят по същия начин, като във всички равенства Z_1' се заменя с Z_1, Z_3' се заменя с Z_3 , а l_1 се заменя с l_2 . Освен това при матричното умножаване на коефициентите на четириполусниците N_{1l} и N_{l2} , коефициентите A_{l2} и D_{l2} разменят местата си.

Чувствителността на релсовата верига към прекъсване на релсовата нишка



се определя с критерия:

$$(50) K_k = |Z_{пк}| / (N |Z_{п}|),$$

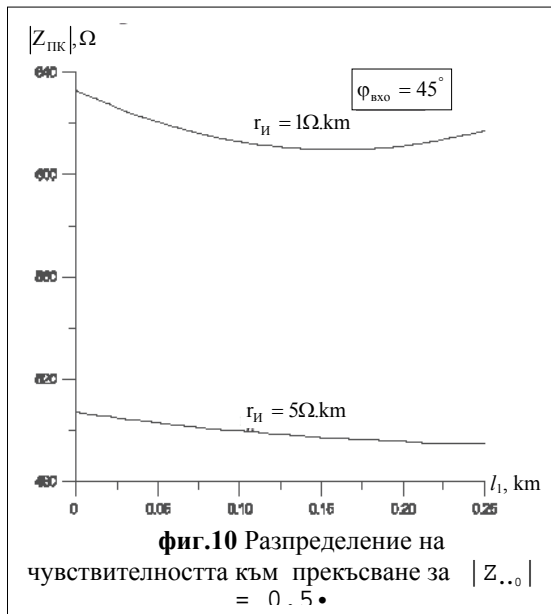
където:

$$(51) Z_{пк} = A_k Z_{вхк1} + B_k + (C_k Z_{вхк1} + D_k) Z_{вхн}';$$

За осигурена чувствителност на релсовата верига към прекъсване е необходимо:

$$(52) K_k \geq 1$$

за всяка точка от дължината и за всяка стойност на съпротивлението на изолацията.



Проведените примерни изчисления за $f = 750\text{Hz}$; $p = 9,1$; $L_1 = L_2 = 0,25\text{km}$. (фиг.8, фиг.9 и фиг.10) показват че:

1) Критичното съпротивление на изолацията в контролен режим може да е по-малко или по-голямо от минималната му стойност.

2) Чувствителността към прекъсване има минимална стойност в рамките на релсовата верига, без да може да се твърди, че съвпада с краищата или средата ѝ.

3) Горните два извода показват, че и в контролен режим изследването трябва да се прави за голям брой точки, с малка стъпка, като за всяка от точките числено се определи критичното съпротивление на

изолация.

4. Абстрактен синтез на двустранна неограничена релсова верига

Задачата на абстрактния синтез е да се определи максималната дължина на релсовата верига и се намерят най-подходящите стойности на импедансите в краищата ѝ. За опростяване на задачата ще бъде прието, че: $Z_{\text{вхн}}' = Z_{\text{вхк1}} = Z_{\text{вхк2}} = Z_{\text{вх0}}$; $L_1 = L_2$. Алгоритъмът за синтез предвижда следните стъпки:

- задаване на начални параметри: $f, z, r_{\text{u min}}, R_{\text{ш}}, p, N$;
- задаване на масив от стойности на $\varphi_{\text{вх0}}$;
- за всяка стойност на $\varphi_{\text{вх0}}$ се задава масив от стойности на $|Z_{\text{вх0}}|$;
- за всяка стойност на $|Z_{\text{вх0}}|$ се задава начална стойност на L_1 ;
- за тази стойност на L_1 се определят критичното място на скъсване, критичното съпротивление на изолацията за това място, стойността на $K_{\text{к}}$. Ако $K_{\text{к}} \geq 1$ се определя точката с критична чувствителност към шунт. Ако за стойността на шунтовата чувствителност в критичната точка е изпълнено $K_{\text{ш}} \geq 1$ се увеличава стойността на L_1 . Този процес продължава до стойността на L_1 , за която едното от двете условия $K_{\text{к}} \geq 1$ и Ако $K_{\text{ш}} \geq 1$ се наруши. За максимална дължина на релсовата верига се приема предишната стойност на L_1 , за която са били изпълнени и двете условия.

Част от резултатите от прилагането на горния алгоритъм (за $f = 750\text{Hz}$) може да се видят в таблица 1.

По така описаната методика е проведен абстрактен синтез за релсовите вериги използвани в Софийския метрополитен. Стойностите на импедансите в краищата им бяха определени експериментално и са съответно:

$Z_{\text{вхн}}' = 0,11384e^{j4,707}$ и $Z_{\text{вхк1}} = Z_{\text{вхк2}} = 0,2402e^{j6,0192}$. Установено бе, че максималната им дължина е $1,625\text{km}$. при $r_{\text{u}} = 2\Omega.\text{km}$.

Таблица 1.

$r_{\text{umin}}, \Omega \cdot \text{km}$	$R_{\text{ш}}, \Omega$	p	$Z_{\text{вх0}}, \Omega$	$L_{\text{max}}, \text{km}$
1	0,06	0	$0,3e^{-j45}$	1,475
		1	$0,4e^{-j45}$	1,75
		10	$(0,9 \div 1,3)e^{-j45}$	1,975
	0,25	1	$0,8e^{-j45}$	0,95
		10	$0,8e^{-j45}$	0,95
2	0,06	1	$0,5e^{-j45}$ $0,6e^{-j45}$	2,525
		10	$(1,3 \div 1,8)e^{-j45}$	3,125
	0,25	1	$1,1 \div 1,4e^{-j45}$	1,725
		10	$(1,1 \div 1,4)e^{-j45}$	1,725

5. Обобщения и изводи

В резултат на направените изследвания е създаден цялостен математически четириполусен модел на двустранна неограничена релсова верига. С този модел може да се анализира работата на релсовата верига в трите основни режима на работа. Същият модел може да се използва успешно за определяне на максималната дължина на релсовата верига и оптималните импеданси в краищата ѝ. Проведените изчисления показват, че използваните в практиката релсови вериги от този тип имат значително по-големи неизползвани възможности, които могат да се използват за поевтиняване на пътното оборудване на осигурителните системи в железопътния транспорт.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] БРЫЛЕЕВ, А. М., Ю.А. КРАВЦОВ, А.В. ШИШЛЯКОВ. Теория устройства и работа рельсовых цепей. М., Транспорт, 1978.
- [2] NEDELICHEV, N. Jointless track circuit length. IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol.146, №1, January 1999, 69 – 74.
- [3] FRICKE, H., H. SCHUCK, H. UEBEL. Vergrosserung der Wirkklänge isolierstossloser Gleisstromkreise ETR: Eisenbahntechn. Rdsch., 1990, 39, (3) 151 – 154.
- [4] DETH, F. V. The SNCF new approach to track circuits. Proc. IRSE 1992–1993, 52 – 67.
- [5] Circuit do voie sans joints universal – CSEE, Paris, 1980.
- [6] GROSE, B.H. Jointless Track Circuits and Electrified Railways. Proc. Inst. Electr. Eng. 1972, 110 – 126.
- [7] NORTON, D.J, L. S. LAWRENCE. Blockjointless Track circuit. Proc. Inst. Electr. Eng. 1975, 111 – 123.
- [8] DE VILDER, F., Train detection system, European Railway Signalling A&C Black, London, 1995, 121 – 142.
- [9] БРЫЛЕЕВ, А. М., К. Ф. КОТЛЯРЕНКО, Электрические рельсовые цепи. М., Транспорт, 1970.
- [10] NENOV, I., N. NEDELICHEV, R. J. HILL. Railway track circuit optimization using two-port network analysis. Proceedings of Second international confer-

ence on Modern supply systems and drives for electric traction, Warsaw, Poland, 5-7 October 1995, 217-221.

- [11] FRIELENHHAUS, K. F. Contingencies in the design of the audio track–circuit. Rail Engineering International, vol.4, №4, May 1974, 182–188.
- [12] БРЫЛЕЕВ, А. М., Ю. И. ПОЛЕВОЙ. Обобщенная методика расчета неограниченных рельсовых цепей. Труды МИИТ^a, 584., М., 1978, 98 –
- [13] NEDELICHEV, N., Mathematical determination of broken rail sensitivity of jointless track circuit. Rail Engineering International Edition 1999 №1, 5 – 8.
- [14] NEDELICHEV, N., I. NENOV. Determination of the maximum length of jointless track circuits, 4th International Scientific Conference of Railway Experts, Vrnjacka Banja, Yugoslavia, 2–4 October 1997, 92–96.
- [15] HILL, R. J., M. L. BEROVA. A simulation Tool for formal Design of Audio Frequency track circuits, Session 5, IRSE International Conference ASPECT '95, London, 25 – 27 Sept. 1995, 1 – 10.
- [16] HILL, R. J., P. C. COLES, A user–friendly simulator for modeling audio frequency track circuit operation – Proc. 1993 IEEE/ASME Joint Railroad conference, Pittsburgh, 6 – 8 April 1993, 77-86.
- [17] HILL, R. J., M. L. BEROVA. Computer modeling and simulation of jointless audio–frequency track circuit. Proceedings of 4th international conference on Computer aided design, manufacture, and operation in the railway and other mass transit systems: COMPRAIL 94, 7–9 September 1994, Computational Mechanics Publication, Madrid, Spain 499–506.
- [18] NEDELICHEV, N. Mathematical determination of track input impedances for signaling and traction power systems. Rail Engineering International. Edition 1998 №2, 8–11.

STUDY ON CENTRE-FED BOUNDLESS TRACK CIRCUITS

Nedelcho Nedelchev*, Nikolaj Nikolov**
nedelchev@vtu.acad.bg, niky_angel@yahoo.com

* *Higher School of Transport “Todor Kableshkov”*, ** *Metropolitan Ltd.*
Sofia-1574, Geo Milev Blvd. 158, Sofia-1000, Kniaz Boris Street 121,
Bulgaria,

Keywords: *Track circuits, Synthesis, Two-port-network models, Maximum length*

Summary: *The paper presents an equivalent diagram of a track circuit with one transmitting end and two receiving ends. Two-port-network models have been developed under normal, shunt and broken rail mode of operation. Shunt sensitivity and broken rail sensitivity have been studied in relation to each of the receivers. An algorithm of abstract synthesis used to determine the optimal input impedances of equipment at the ends. The maximum length of the boundless track circuits of the Underground in Sofia has been determined.*