

МОДЕЛ ЗА КВАЗИСТАТИЧНО ВПИСВАНЕ НА ДВУОСНА ТРАМВАЙНА ТАЛИГА В КРИВА

Емил М. Михайлов¹⁾, Добринка Атмаджова²⁾

emm_1968@abv.bg, atmadzhova@abv.bg

¹⁾ „Столичен електротранспорт” ЕАД, София, ул. „Подполковник Калитин” № 30

²⁾ ВТУ „Т. Каблешков”, София, ул. Гео Милев 158

РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: трамвай, талига, квазистатично вписване, контакт колело-релса.

Резюме: „Моделът за квазистатично вписване на двуосна трамвайна талига в крива” е допълнение на „Модел за квазистатично вписване в крива на железопътен двуосов екипаж”. Наличието на еластични елементи в сглобката между главината и бандажа дава възможност бандажната гривна да се премества спрямо главината. Към разработеният метод за квазистатично вписване на движещ се в крив участък от пътя железопътен двуосов екипаж с отчитане компонентите на скоростта на плъзгане и обусловените от тях тангенциални сили в контактните точки „колело-релса”, завъртането на колоосите в план и ъгъла на атака на атакуващата колоос са добавени особеностите на трамвайните колела и талиги и условията на работата им. Изграденият аналитичен апарат е допълнен със зависимостите произтичащи от конструктивните особености на колелата за возила предназначени за градски пътнически превози. Получените зависимости са удобни за изследване хоризонталните връзки в ходовата част на лек релсов подвижен състав (трамвайни мотриси), които са предназначени за модернизация и изграждане на нови изделия и ще доведат до съществени подобрения на динамично-ходовите качества, намаляване интензивността на износване на ребордите и релсите, повишаване безопасността на движение и допустимите скорости и намаляване на разходите и рисковете от разбиване на релсовия път и подвижния състав. Изложеният модел показва приложимостта за определяне характеристиките на трамвайните талиги и възможността за оптимизация им.

1. УВОД

„Моделът за квазистатично вписване на двуосна трамвайна талига в крива” е разработен въз основа на „Модел за квазистатично вписване в крива на железопътен двуосов екипаж” [1]. Моделът отчита компонентите на скоростта на плъзгане и обусловените от тях сили в контактните точки „колело-релса”, завъртането на колоосите в план и ъгъла на атака на атакуващата колоос и особеностите на трамвайните колоси – еластичност на колелата и предаване на двигателен въртящ момент.

2. КООРДИНАТНИ СИСТЕМИ И ОЗНАЧЕНИЯ В МОДЕЛА.

2.1. Индекси.

- За колосите – j ($j = 1, 2$);
- За леви колела и букси – „ s ”;
- За десни колела и букси – „ d ”;
- За контактните точки на ребордите – „ r ”;
- Обобщен индекс – k ($k = s, sr, d, dr$).

2.2. Координатни системи.

- за талигата: O, x, y, z - с начало: геометричния център на рамата в равнината на колоосите;
- за 1. колоос: O_1, x_1, y_1, z_1 - с начало: геометричния център на колооста;
- за 2. колоос: O_2, x_2, y_2, z_2 - с начало: геометричния център на колооста;
- за всяка контактна точка по търкалящата повърхност на бандажа: A, l, q, n - с начало т. „ A ”;
- $A_{kj}(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj})$ - координати на всяка контактна точка по търкалящата повърхност на бандажа;
- $B_{bkj}(x_{bkj}, y_{bkj}, z_{bkj})$ - координати на геометричните центрове на бандажите.

3. ГЕОМЕТРИЧНИ И СИЛОВИ ЗАВИСИМОСТИ ПРИ ВПИСВАНЕ В КРИВА НА ДВУОСНА ЖЕЛЕЗОПЪТНА ТАЛИГА.

Разглежда се механична система от три тела: рама на талигата и двете колооси.

Първата група зависимости (уравнения) се изразяват с условията за равновесие на трите тела:

$$(1) \quad \mathfrak{R}_{sjx} \cdot \left(1 - \frac{y_{sj}}{R} - \frac{r_{sj}}{r_{ej}}\right) + \mathfrak{R}_{djx} \cdot \left(1 - \frac{y_{dj}}{R} - \frac{r_{dj}}{r_{ej}}\right) + \mathfrak{R}_{srjx} \cdot \left(1 - \frac{y_{srj}}{R} - \frac{r_{srj}}{r_{ej}}\right) - (-1)^j \cdot C_x \cdot \left(\delta_{sjx} - (-1)^j \cdot \delta_{djx}\right) = 0$$

$$(2) \quad N_{sj} \cdot \sin \gamma_{sj} - N_{dj} \cdot \sin \gamma_{dj} - \mathfrak{R}_{sjiy} \cdot \alpha_j + \mathfrak{R}_{djiy} \cdot \alpha_j + N_{srj} \cdot \sin \gamma_{srj} - \mathfrak{R}_{srjiy} \cdot \alpha_j - 2 \cdot C_y \cdot \delta_{jy} - m_R \cdot a_H = 0$$

$$(3) \quad -N_{sj} \cdot \cos \gamma_{sj} - N_{dj} \cdot \cos \gamma_{dj} - \mathfrak{R}_{sjiy} \cdot \alpha_j \cdot \tan \gamma_{sj} + \mathfrak{R}_{djiy} \cdot \alpha_j \cdot \tan \gamma_{dj} - N_{srj} \cdot \cos \gamma_{srj} - \mathfrak{R}_{srjiy} \cdot \alpha_j \cdot \tan \gamma_{srj} + F_{sj} + F_{dj} + m_R = 0$$

$$(4) \quad -\left(N_{sj} \cdot \cos \gamma_{sj} + \mathfrak{R}_{sjiy} \cdot \alpha_j \cdot \tan \gamma_{sj}\right) \cdot y_{sj} - \left(N_{dj} \cdot \cos \gamma_{dj} - \mathfrak{R}_{djiy} \cdot \alpha_j \cdot \tan \gamma_{dj}\right) \cdot y_{dj} - \left(N_{sj} \cdot \sin \gamma_{sj} - \mathfrak{R}_{sjiy} \cdot \alpha_j\right) \cdot r_{sj} + \left(N_{dj} \cdot \sin \gamma_{dj} - \mathfrak{R}_{djiy} \cdot \alpha_j\right) \cdot r_{dj} - \left(N_{srj} \cdot \cos \gamma_{srj} + \mathfrak{R}_{srjiy} \cdot \alpha_j \cdot \tan \gamma_{srj}\right) \cdot y_{srj} - \left(N_{srj} \cdot \sin \gamma_{srj} - \mathfrak{R}_{srjiy} \cdot \alpha_j\right) \cdot r_{srj} - \left(F_{sj} - F_{dj}\right) \cdot b_b = 0$$

$$(5) \quad \mathfrak{R}_{sjx} \cdot \left(1 - \frac{y_{sj}}{R} - \frac{r_{sj}}{r_{ej}}\right) \cdot r_{sj} + \mathfrak{R}_{djx} \cdot \left(1 - \frac{y_{dj}}{R} - \frac{r_{dj}}{r_{ej}}\right) \cdot r_{dj} + \mathfrak{R}_{srjx} \cdot \left(1 - \frac{y_{srj}}{R} - \frac{r_{srj}}{r_{ej}}\right) \cdot r_{srj} = 0$$

$$(6) \quad \Re_{sjx} \cdot \left(1 - \frac{y_{sj}}{R} - \frac{r_{sj}}{r_{ej}} \right) \cdot y_{sj} + \Re_{djx} \cdot \left(1 - \frac{y_{dj}}{R} - \frac{r_{dj}}{r_{ej}} \right) \cdot y_{dj} + \Re_{srjx} \cdot \left(1 - \frac{y_{srj}}{R} - \frac{r_{srj}}{r_{ej}} \right) \cdot y_{srj} - b_b \cdot C_x \cdot (\delta_{sjx} - \delta_{djx}) = 0$$

$$(7) \quad C_x \cdot \left(\sum_{j=1}^2 \delta_{sjx} + \sum_{j=1}^2 \delta_{djx} \right) + P_{cx} = 0$$

$$(8) \quad 2C_y \cdot \sum_{j=1}^2 \delta_{jy} - P_{cy} - m_D \cdot a_H = 0$$

$$(9) \quad -\sum_{j=1}^2 F_{sj} - \sum_{j=1}^2 F_{dj} + P_{cz} + m_D \cdot g = 0$$

$$(10) \quad b_b \cdot \sum_{j=1}^2 (F_{sj} - F_{dj}) - M_{cx} - P_{cy} \cdot h_c - m_D \cdot a_H \cdot h_D = 0$$

$$(11) \quad l_D \sum_{j=q}^2 (-1)^{j+1} (F_{sj} + F_{dj}) = 0$$

$$(12) \quad C_x \cdot b_b \cdot \sum_{j=1}^2 (\delta_{sjx} - \delta_{djx}) + 2C_y \cdot l_D (\delta_{1y} - \delta_{2y}) = 0$$

където: R - радиус на кривата по оста на пътя; $y_{kj}, r_{kj}, \gamma_{kj}$ - напречна координата на контактната точка A_{kj} и радиус на търкаляне и ъгъл на наклона спрямо хоризонталата при $\alpha_j = 0$; r_{ej}, α_j - еквивалентен радиус и ъгъл на атака на колооста; δ_{jy}, C_y - напречно преместване на колооста спрямо рамата и напречна коравина на буксовата връзка; δ_{kix}, C_x - надлъжно преместване на буксата спрямо рамата и надлъжна коравина на буксовата връзка; m_R, m_D - маси на колооста и талигата; a_H, g - некомпенсирано центробежно и земно ускорения; $2b_b, 2l_D$ - напречно разстояние между буксите и база на талигата; F_{kj} - вертикална сила, предавана от рамата върху буксата; N_{kj} - нормална сила в точката на контакта, предавана върху колелото; $P_{cy}, P_{cz}, P_{cx}, M_{cx}$ - напречна, вертикална и надлъжна сили и въртящ момент, редуцирани към централния лагер или страничните плъзгалки на талигата; h_c, h_D - височини на централния лагер и на масовия център на талиговата рама спрямо равнината, определена от осите на колосите.

Втората група зависимости (уравнения) представляват геометричните изрази за ъгъла на атака между колелата и релсата в зависимост от разположението на талигата в крива, преместванията на колоосите (буксите) спрямо рамата и др. изразът за ъгъла на атака за j^{-ma} колоос окончателно има вида:

$$(13) \quad \alpha_j = (-1)^{j+1} \cdot \frac{l_D}{R} + \frac{1}{2l_D} \cdot [(\sigma_2 - \sigma_1) + (\delta_{1y} - \delta_{2y}) + (\lambda_{v2} - \lambda_{v1})] - \frac{(\delta_{sjx} - \delta_{djx})}{2b_b}$$

където деформацията на външната релса $\delta_{sj} = \frac{Y_{sj}}{C_s}$ е отношението между страничния натиск на външната релса $Y_{s1(2)}$ и хоризонталната коравина C_s на релсата.

Третата група зависимости (уравнения) имат кинематично-геометричен характер и са изразени с апроксимирани функционални зависимости между параметрите на контактните точки и координатите σ_j на съответните колооси:

- зависимости на координатата „ y ” от координатата „ σ ” при $\alpha = 0$:

$$(14) \quad y_{kj} = y_{kj}(\sigma_j)$$

- зависимости на параметъра „ r ” от координатата „ y ”:

$$(15) \quad r_{kj} = r_{kj}(y_{kj})$$

- зависимости на параметъра „ γ ” от координатата „ y ”:

$$(16) \quad \gamma_{kj} = \gamma_{kj}(y_{kj})$$

4. ОСОБЕНОСТИ НА ТРАМВАЙНИТЕ ТАЛИГИ.

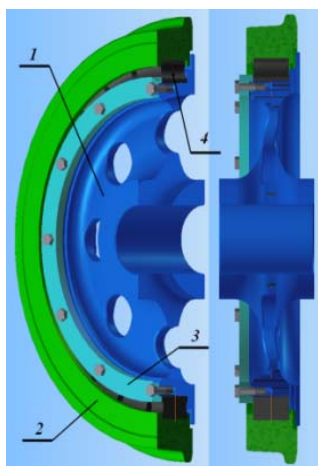
Особеностите на трамвайните талиги, отличаващи ги от вагонните талиги са: наличие на еластични елементи в колелата; преодоляване на криви с малки радиуси; предаване на двигателен въртящ момент към колелата; движение предимно по коловози, изградени с улейни релси; по-малко осово натоварване.

От изброените само по-малкото осово натоварване няма значение за вписването в крива. При преодоляване на криви с малки радиуси съпротивлението от крива има големи стойности. Тогава возилото трябва да се движи под тяга през цялата крива.

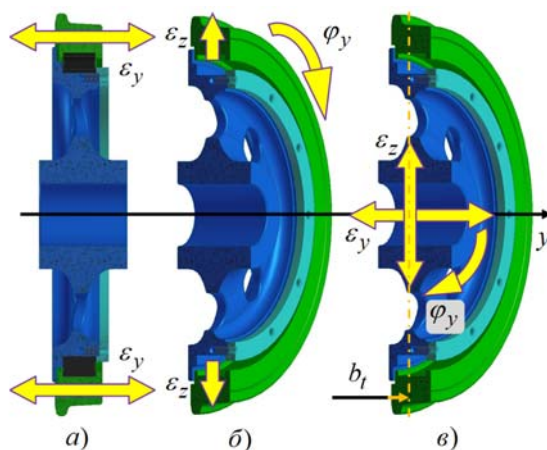
4.1. Конструктивни особености на трамвайното колело.

Наличието на еластични елементи в колелата е конструктивна особеност, която е характерна за трамвайните возила. Еластичните елементи, освен да поглъщат вибрации създават възможност на бандажите да имат премествания спрямо главините.

Целта на еластичният елемент е да подобри взаимодействието на колооста с пътя за сметка на намаляване на динамичните сили от необресорените маси, подобряване на плавността на хода и намаляване на шума при движение. При различните конструкции се използват гумени тампони или дискови метало-гумени пакети. В зависимост от конкретната конструкция се използва гума с твърдост по Шор в интервала $40 \div 80$ Sh.



Фиг. 1. Конструкция на трамвайно колело тип „Vochum 54”.



Фиг. 2. Премествания на бандажа спрямо главината на колелото.

При трамваите най-широко приложение е намерила конструкцията на колела тип „Vochum 54” (фиг. 1.). Колелото има еластичните елементи (4). Те са подредени във

венец между главината (1) и бандажа (2). На фигурата е показан разрез на колело разработено за произвежданите трамвайни мотриси в Завода за трамваи – София. В съвременните конструкции тампоните са променена форма като най-често имат V-образно напречно сечение.

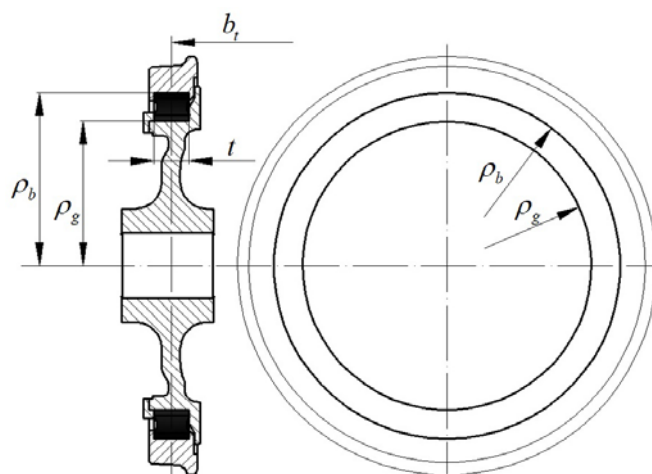
4.2. Премествания на бандажа при еластичното колело.

На фигура 2. са показани възможните премествания на бандажа на трамвайното колело спрямо главината.

- преместване ε_y по оста y (фиг. 2.а);
- преместване ε_z по оста z (фиг. 2.б);
- завъртане φ_y по оста y (фиг. 2.в).

Преместването ε_z на бандажа по оста z е под действието на вертикални сили – от натоварването и неравностите на пътя. По напречната хоризонтална ос y преместванията са две. Осеве преместване ε_y в резултат от направляващата сила, напречната сила при лъкатушене на талигата и при продължителен контакт на реборда с главата на релсата при дълго пропадане на едната релса. И завъртане около напречната хоризонтална ос φ_y вследствие на действието на двигателния и спиращия моменти.

Схемата на еластично колело (фиг. 3.) е аналогична на гумено-метален шарнир от [2].



Фиг. 3. Параметри на венцът от еластични елементи.

Изхождайки от фигура 3. преместванията на бандажа спрямо главината на колелото се описват със следните зависимости:

$$(17) \quad \varepsilon_z = \frac{2P_z}{3\pi Gt} \cdot \frac{t^2 + 3(r_g + r_b)^2}{t^2 + 6(r_b - r_g)^2} \cdot \frac{(r_b - r_g)^3}{(r_g + r_b)^3}$$

$$(18) \quad \varepsilon_y = \frac{P_y}{2\pi Gt} \cdot \ln \frac{r_b}{r_g}$$

$$(19) \quad \varphi_y = \frac{M_y}{4\pi Gt} \cdot \frac{r_b^2 - r_g^2}{r_g^2 \cdot r_b^2}$$

където: M_y – двигателен или спирачен моменти; P_y, P_z – осева или радиална сила; G – модул на ъгловата деформация; t – ширина на венца от еластични елементи; ρ_g, ρ_b – радиуси на главината и бандажа.

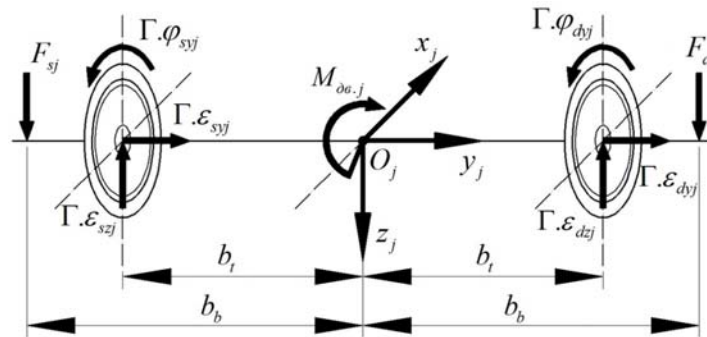
4.3. Геометрични и силови зависимости на трамвайна колоос.

Описаните особености на трамвайните мотриси налагат модела за квазистатично вписване на двуосна талига да се допълни с уравнения отчитащи тези разлики. Наличието на еластични елементи при трамвайните колела дава възможност на бандажите да извършват ограничени премествания спрямо главините на колелата. Тези премествания, описани в (17), (18) и (19) са показани на фигура 4. и от тях следват уравненията:

$$(20) \quad \mp 2\Gamma.\varphi_{kyj} \mp 2\Gamma.\varepsilon_{kyj} \pm M_{\partial e.j} = 0$$

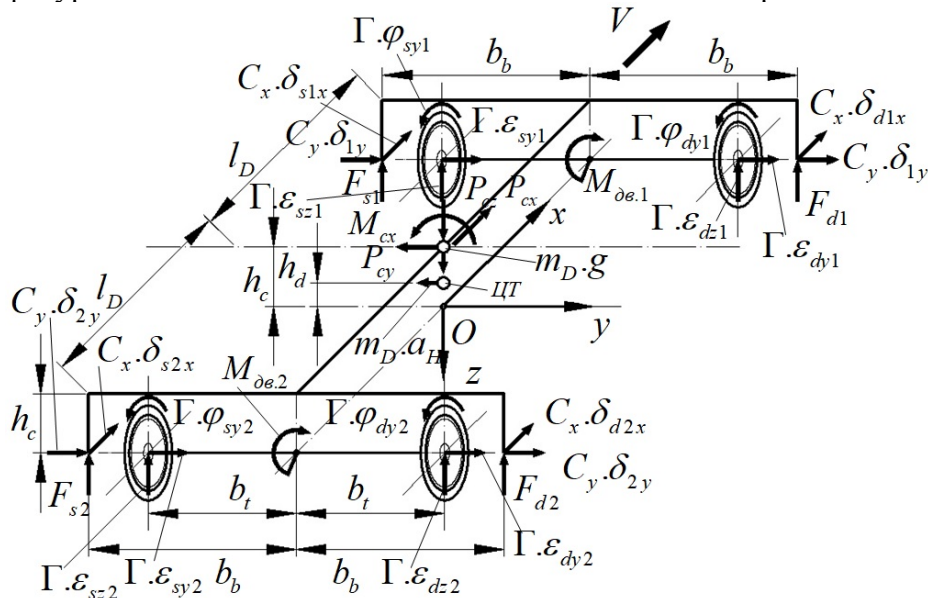
$$(21) \quad F_{sj} \cdot b_b - 2\Gamma.\varepsilon_{kzj} \cdot b_t + F_{dj} \cdot b_b = 0$$

В (20) двигателния момент може да се замени със спирачен, като се промени и неговия знак. Тогава се променят и посоките на завъртане на бандажите около оста y .



Фиг. 4. Възможни премествания на бандажа спрямо главината на колелото

На фигура 8. са показани силите действащи на талиговата рама и колоосите.



Фиг. 5. Разпределение на силите, действащи върху талиговата рама и колоосите при вписване на талигата в крива.

От схемата показана на фигура 5. са изведени уравненията за силите и преместванията на бандажите спрямо координатната система за талигата O, x, y, z .

$$(22) \quad 4.G.\varphi_{kyj} + 4.G.\varepsilon_{kyj} - 2.M_{\partial e.j} = 0$$

$$(23) \quad F_{sj}.b_b - 4.G.\varepsilon_{kzj}.b_t + F_{dj}.b_b = 0$$

4.4. Обобщение на „Модел за квазистатично вписване на двуосна трамвайна талига в крива”.

„Моделът за квазистатично вписване на двуосна трамвайна талига в крива” има общо 46 уравнения, разпределени така: 24 уравнения от статическите условия за равновесие на двете колооси и рамата; 4 уравнения изразяващи разположението в крива на талигата заедно с колооси и рамата при отчитане на взаимните им хоризонтални премествания и напречните деформации на релсата; 6 уравнения, за главната координата „у” на контактните точки в зависимост от координатата σ_j при $\alpha_j = 0$; 12 уравнения, изразяващи геометрично-кинематичните параметри r_{kj} и γ_{kj} в контактните точки във функция от координатите y_{kj} .

Неизвестните величини в уравненията са: 6 нормални сили N_{kj} в контактните точки; 12 геометрично-кинематични параметри на контактните точки, в т.ч.: 6 радиуси r_{kj} ($k = s, sr, d, dr; j = 1, 2$) и 6 ъгли γ_{kj} ($k = s, sr, d, dr; j = 1, 2$) на наклона на бандажния профил; 6 напречни координати y_{kj} ($k = s, sr, d, dr; j = 1, 2$) на координатните точки; 4 параметъра за положението на колоосите σ_j ($j = 1, 2$) и α_j ($j = 1, 2$); 6 параметъра за преместванията на буксите δ_{kix} ($k = s, d; j = 1, 2$) и δ_{jy} ($j = 1, 2$); 10 параметъра ε_{kyj} ($k = s, d; j = 1, 2$), φ_{kyj} ($k = s, d; j = 1, 2$) и ε_{kzj} ($k = s, d; j = 1, 2$) за премествания на бандажите относно главините; 2 параметъра за еластичните деформации на релсите δ_{sj} ($j = 1, 2$); 1 надлъжна сила в централния лагер P_{cx} ; 2 величини за еквивалентните радиуси на колоосите r_{ej} ($j = 1, 2$); 4 вертикални сили F_{kj} ($k = s, d; j = 1, 2$) между рамата и колоосите; 2 въртящи момента $M_{\partial e.j}$ ($j = 1, 2$) (двигателни или спирачни) към колоосите.

Броят на неизвестните в системата е 55, с 9 повече от броя на уравненията, но решението на системата е възможно тъй като се използват някои особености при експлоатационните условия, както в началния модел.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработен е „Модел за квазистатично вписване на двуосна трамвайна талига в крива”. Моделът отчита компонентите на скоростта на плъзгане в контактните точки „колело-релса”, възникващите в тях сили, завъртането на колоосите в план, ъгъла на атака на атакуващата колоос и особеностите на трамвайните колооси.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Ахмаджова Д., Метод за определяне на характеристиките на буксовите връзки с рамата на талига за пътнически вагони, Дисертация, ВТУ „Тодор Каблешков“, София, 2000 г.
- [2] Ружеков Т., Пенчев Ц., Димитров Е., „Теория и конструиране на железопътна техника”, ВТУ, София, 2011 г.

MODEL FOR QUASI-STATIC ENTRY OF A TWO-AXLE TRAM BOGIE IN A CURVE

Emil M. Mihaylov ¹⁾, Dobrinka Atmadzhova ²⁾

emm_1968@abv.bg, atmadzhova@abv.bg

¹⁾ Sofia Public Electrical Transport Company JSC, 30 Lieutenant Colonel Kalitin str.,
THE REPUBLIC OF BULGARIA

²⁾ Todor Kableshkov University of transport, Sofia, 158 Geo Milev Str.,
THE REPUBLIC OF BULGARIA

Key words: tram, bogie, quasi-static entry, wheel-rail contact.

Abstract: "The model for quasi-static entry of a two-axle tram bogie in a curve" is a supplement to "Model for quasi-static entry in a curve of a railway two-axle crew". The presence of elastic elements in the joint between the hub and the rim allows the rim bracelet to move relative to the hub. To the developed method for quasi-static entry of a railway biaxial crew moving in a curved section of the road, taking into account the components of the sliding speed and the tangential forces determined by them in the contact points "wheel-rail", the rotation of the wheelsets in plan and angle of attack on the attacking wheelset, the features of the tram wheels and bogies and the conditions of their work have been added. The developed analytical apparatus is supplemented with the dependences arising from the structural features of the wheels for vehicles intended for urban passenger transport. The obtained dependences are convenient for studying the horizontal connections in the running gear of light rail rolling stock (tram railcars), which are designed for modernization and construction of new products and will lead to significant improvements in dynamic-running characteristics, reducing the intensity of wear of the flanges and rails, increasing traffic safety and allowable speeds, and reducing the costs and risks of breaking the rail tracks and the rolling stock. The presented model shows the applicability for determining the characteristics of the tram bogies and the possibility for its optimization.