

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТРЕПТЕНИЯТА НА РУДНИЧЕН САМОСВАЛ, ПРЕДИЗВИКВАНИ ОТ ПЪТНИТЕ НЕРАВНОСТИ

Стефан Пулев

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. Разглежда се едномасов динамичен модел на рудничен самосвал с две степени на свобода. Кинематичното слушение от пътните неравности е представено с помощта на синусоидална функция. Нейната амплитуда се определя от типичните за даден пътен участък височини на неравностите, а честотата – от тяхната дължина и от скоростта на движение. Изведени са диференциалните уравнения на вертикалните трептения (подскачането) и на надлъжните ъглови трептения (галопирането). Аналитично и графично е получен законът за движението.

A STUDY OF THE VIBRATIONS OF A MINING DUMPER TRUCK THAT ARE CAUSED BY ROAD SURFACE ROUGHNESS

Stefan Pulev

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia

ABSTRACT. A one-mass dynamic model of a mining dumper truck with two degrees of freedom is investigated. The kinematic distortion caused by road roughness is modelled using a sinusoidal function. The amplitude is determined by the height of bumps typical for a given section of the road, and the frequency - by the bumps' length and the speed of the vehicle. The differential equations for the vertical and longitudinal angular vibrations are derived and solved. The law of motion is reached analytically and graphically.

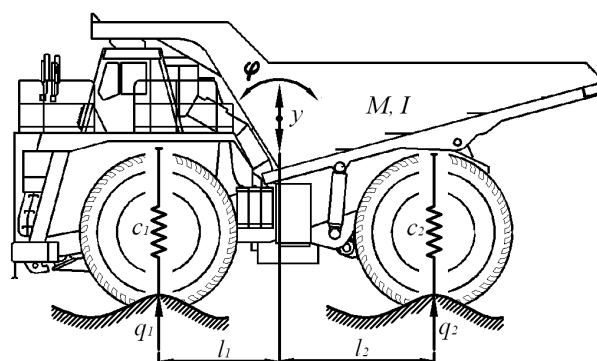
Увод

Рудничните самосвали са основно транспортно средство при открит добив на полезни изкопаеми. Те се движат върху технологични пътища, постоянни или временни, местещи се заедно с напредването на минните разработки. Пътната настилка е трошенокаменна или изобщо липсва. Качеството ѝ се влияе много от атмосферните условия: валежи, влажност, температура. Лесно се деформира и изнася вследствие значителното тегло на самосвалите и пренасяните товари. Пътния профил е грапав, вълнообразен с периодично повтарящи се, много близки по дължина и дълбочина неравности. Доказано е, че при преминаване през три-четири такива неравности трептенията на транспортното средство са като при безкраен синусоидален профил. Поради големия радиус и еластичността си колелата имат способност да изглаждат малките и резките неравности. Всичко това обосновава апроксимирането на пътния релеф с помощта на синусоидална функция. Нейната амплитуда се определя от типичните за даден пътен участък височини на неравностите, а честотата – от тяхната дължина и от скоростта на движение.

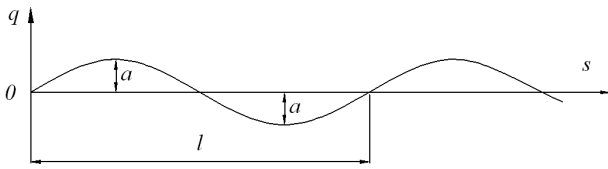
Настоящата работа си поставя за цел да определи закона за трептенията на рудничен самосвал, породени от пътните неравности и да даде предписания за максималната безопасна скорост, с която трябва да се движи самосвала по технологичните пътища.

Динамичен модел

Разглежда се едномасов динамичен модел с две степени на свобода (фиг. 1). Обобщените координати, определящи положението на трептящата маса, са вертикалното преместване y и надлъжното завъртане φ спрямо положението на статично равновесие. Инерционните характеристики на самосвала са масата m и инерционния момент I . Коефициентите на еластичност на предното и задното окачване са съответно c_1 и c_2 . C L е означена базата на самосвала, l_1 и l_2 са разстоянията от предното и задното окачвания до центъра на тежестта. Демпфирането на предното и задното окачване се пренебрегва защото предизвиква затихване на амплитудата, но влияе слабо върху честотата на трептенията.



Фиг. 1. Динамичен модел на рудничен самосвал



Фиг. 2. Надлъжен профил на пътните неравности

Надлъжния профила на пътя е представен на фиг. 2 като синусоида с амплитуда a и период l , които представляват съответно височината и дължината на неравностите. Ако самосвалът се движи праволинейно с постоянна скорост v , изминатият от него път ще бъде $s = v.t$. Кинематичното смущение върху предните и задните колела се представя с изразите:

$$q_1 = a \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l}, \quad q_2 = a \cdot \sin \left(\frac{2\pi vt}{l} - \frac{2\pi L}{l} \right).$$

С помощта на тригонометрични преобразувания е полезно да представим q_2 в следната форма:

$$q_2 = a \cdot \cos \frac{2\pi L}{l} \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l} - a \cdot \sin \frac{2\pi L}{l} \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l}$$

Диференциалните уравнения, описващи движението на самосвала са получени с помощта на уравненията на Лагранж от II род имат вида:

$$\begin{cases} m\ddot{y} + (c_1 + c_2)y + (c_1l_1 - c_2l_2)\varphi = a \left(c_1 + c_2 \cdot \cos \frac{2\pi L}{l} \right) \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l} - c_2 a \cdot \sin \frac{2\pi L}{l} \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l} \\ I\ddot{\varphi} + (c_1l_1^2 + c_2l_2^2)\varphi = a \left(-c_1l_1 + c_2l_2 \cos \frac{2\pi L}{l} \right) \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l} - c_2l_2 a \cdot \sin \frac{2\pi L}{l} \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l} \end{cases}$$

Двете уравнения в системата са свързани, тоест завъртането на ъгъл φ (галопирането) се влияе от движението по y (подскачането). Тази връзка между главните движения на автомобила е нежелателна и влошава плавността. За да се постигне независимост е необходимо да бъде изпълнено условието

$$c_1l_1 - c_2l_2 = 0.$$

Производителите на съвременните автомобили се съобразяват с него и можем да считаме, че е изпълнено. Отчитайки този факт, получаваме две независими диференциални уравнения. Първото описва вертикалните трептения на центъра на тежестта:

$$m\ddot{y} + (c_1 + c_2)y = a \left(c_1 + c_2 \cdot \cos \frac{2\pi L}{l} \right) \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l} - c_2 a \cdot \sin \frac{2\pi L}{l} \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l} \quad (1)$$

Второто характеризира надлъжните ъглови трептения на рудничния самосвал:

$$I\ddot{\varphi} + (c_1l_1^2 + c_2l_2^2)\varphi = a \left(c_1l_1 - c_2l_2 \cos \frac{2\pi L}{l} \right) \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l} + c_2l_2 a \cdot \sin \frac{2\pi L}{l} \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l} \quad (2)$$

От чисто математична гледна точка двете диференциални уравнения се решават независимо едно от друго, но по един и същи начин. Поради бързото затихване на свободните трептения е интересно да се изследват чисто принудените трептения на самосвала.

$$\dot{y} = \frac{2\pi v A}{l} \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l} - \frac{2\pi v B}{l} \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l}$$

$$\dot{\varphi} = -A \left(\frac{2\pi v}{l} \right)^2 \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l} - B \left(\frac{2\pi v}{l} \right)^2 \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l} \quad (4)$$

Изследване на вертикалните трептения

Законът на принудените вертикални трептения търсим във вида

$$y = A \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l} + B \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l} \quad (3)$$

За да определим интеграционните константи A и B диференцираме двукратно спрямо времето изразът (3) и получаваме съответно формулите за вертикалните скорост \dot{y} и ускорение \ddot{y} на центъра на тежестта на трептящия автомобил:

След заместване на (3) и (4) в диференциалното уравнение (1) и приравняване на коефициентите пред $\sin \frac{2\pi vt}{l}$ и $\cos \frac{2\pi vt}{l}$ от двете страни на равенството получаваме изразите за интеграционните константи A и B :

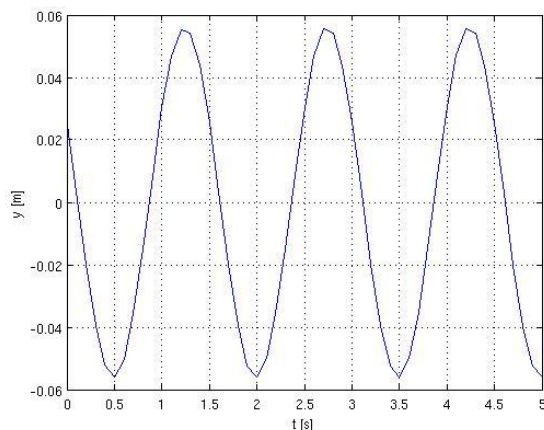
$$A = \frac{a \left(c_1 + c_2 \cdot \cos \frac{2\pi L}{l} \right)}{c_1 + c_2 - \frac{4\pi^2 v^2 m}{l^2}}, \quad B = \frac{-c_2 a \cdot \sin \frac{2\pi L}{l}}{c_1 + c_2 - \frac{4\pi^2 v^2 m}{l^2}}$$

Амплитудата на принудените вертикални трептения е:

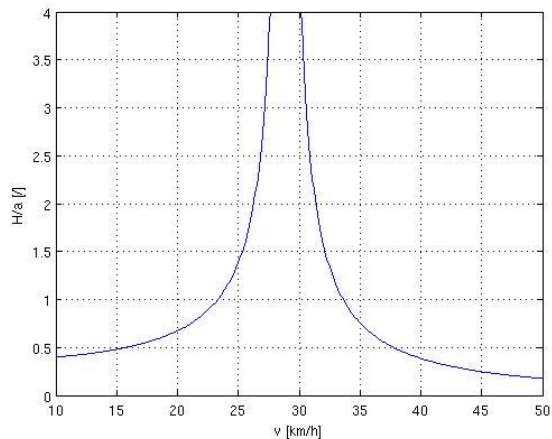
$$H = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$\Rightarrow H = a \cdot \frac{\sqrt{\left(c_1 + c_2 \cdot \cos \frac{2\pi L}{l}\right)^2 + \left(c_2 \cdot \sin \frac{2\pi L}{l}\right)^2}}{c_1 + c_2 - \frac{4\pi^2 v^2 m}{l^2}} \quad (5)$$

На фигура 3 е представен графично закона за вертикалните трептения за самосвал БЕЛАЗ-75131 с товарносимост 130 тона, използван и в българските открити рудници. Стойностите на параметрите са: $m = 130\,000\text{ kg}$, $l = 807\,391\text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $L = 5,3\text{ m}$, $l_1 = 3,551\text{ m}$, $l_2 = 1,749\text{ m}$, $c_1 = 10,93 \cdot 10^5\text{ N/m}$, $c_2 = 22,2 \cdot 10^5\text{ N/m}$. Самосвалът преминава през характерен пътен участък с височина $a = 0,05\text{ m}$ и дължина $l = 10\text{ m}$ на неравностите. Скоростта му е $v = 24\text{ km/h} = 6,67\text{ m/s}$.



Фиг. 3. Закон за вертикалните трептения



Фиг. 4. Амплитудно-честотна характеристика на вертикалните трептения

На фигура 4 се вижда амплитудно-честотната характеристика на вертикалните трептения, получена с помощта на формула (5). По абсцисата са нанесени стойностите на скоростта на самосвала в интервала от 15 km/h до 50 km/h . Върху ординатата са дадени стойностите на безразмерния коефициент на динамичност H/a . При скорост на самосвала от 28 km/h се наблюдава силно увеличение на коефициента на динамичност, съответно на амплитудата на вертикалните трептения. Това явление е неблагоприятно, защото ще предизвика нежелани повреди по качването и пътно-транспортни произшествия. Това е най-неблагоприятната скорост за преминаване през конкретния пътен участък. От гледна точка на безопас-

ността, при височина $a = 0,05\text{ m}$ и дължина $l = 10\text{ m}$ на неравностите, максимално допустимата скорост е 24 km/h .

Изследване на надлъжните ъглови трептения

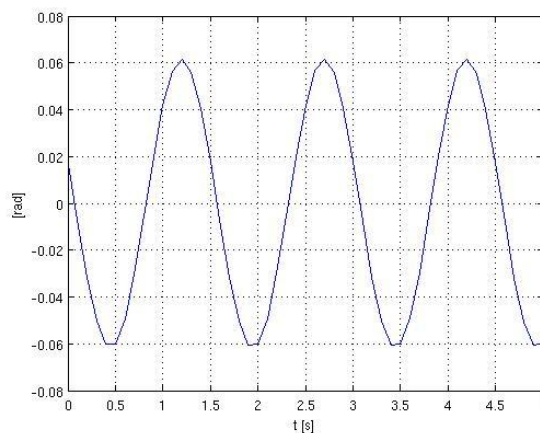
Решението на диференциалното уравнение (2) търсим във вида $\varphi = C \cdot \sin \frac{2\pi vt}{l} + D \cdot \cos \frac{2\pi vt}{l}$. Това е и законът на принудените ъглови трептения. Интеграционните константи C и D са определени по изложения по-горе начин и се представят с изразите:

$$C = \frac{a \left(c_1 l_1 - c_2 l_2 \cos \frac{2\pi L}{l} \right)}{c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 - \frac{4\pi^2 v^2 I}{l^2}}, \quad D = \frac{c_2 l_2 a \cdot \sin \frac{2\pi L}{l}}{c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 - \frac{4\pi^2 v^2 I}{l^2}}$$

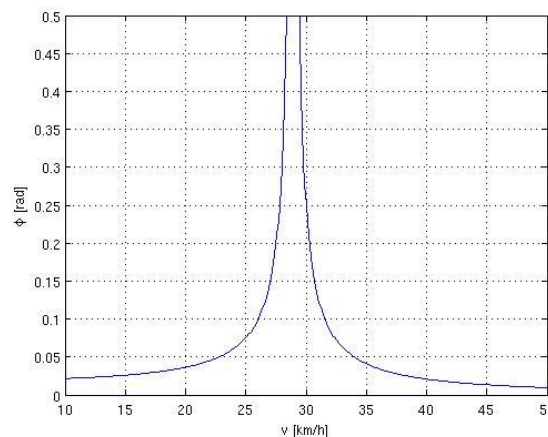
Амплитудата на принудените ъглови трептения е:

$$H = a \cdot \frac{\sqrt{\left(c_1 l_1 - c_2 l_2 \cos \frac{2\pi L}{l} \right)^2 + \left(c_2 l_2 \cdot \sin \frac{2\pi L}{l} \right)^2}}{c_1 l_1^2 + c_2 l_2^2 - \frac{4\pi^2 v^2 I}{l^2}}$$

На фигура 5 е изобразен закона на принудените ъглови трептения, а на фигура 6 – амплитудно-честотната характеристика.



Фиг. 5. Закон за ъгловите трептения



Фиг. 6. Амплитудно-честотна характеристика на ъгловите трептения

От фигура 6 се вижда, че най-опасна за ъгловите трептения също е скоростта от 28 km/h. Максимално допустимата скорост е 25 km/h.

Изводи

На основата на това изследване могат да се направят следните изводи:

1. При подходящ избор на координатна система, вертикалните трептения на самосвала (подскачането) и надлъжните ъглови трептения (галопирането) могат да се изследват независимо едно от друго.

2. Описанието на разглежданите явления може да се извърши с помощта на обикновени, нехомогенни диференциални уравнения от втори ред с постоянни коефициенти.

3. На основата на изведените закони на трептенията, предизвикани от пътните неравности, може да се направи задълбочен анализ за влиянието на отделните експлоатационни и конструктивни параметри на

рудничния самосвал върху неговата производителност, нисък разход на гориво, недопускането на произшествия.

4. Направени са предписания за максимално допустимата скорост на движение в конкретни пътни участъци.

Литература

- КАРЬЕРНЫЕ САМОСВАЛЫ БЕЛАЗ-75131, БЕЛАЗ-75132. Руководство по эксплуатации 7513-3902015 РЭ. ПО "Белорусский автомобильный завод", 2004 г.
- Цитович И.С., Альгин В.Б. Динамика автомобиля. Мн., Наука и техника, 1981.
- Рудь Ю.С., Радченко И.С., Белоножко В.Ю., Ткаченко А.С. Теория движения карьерных самосвалов при кинематическом возбуждении колебаний его механических систем от неровностей дорожного полотна. Разработка рудных месторождений. Научно-технический сборник, Выпуск 94, 2011, Кривой Рог.