

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ АВТОПОЕЗДА  
ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ

Рассматривается случай движения седельного и лесовозного автопоезда по участку дороги на режиме торможения. Задачи о вынужденных колебаниях автопоезда на режиме торможения решались при случайном воздействии.

Колебательная система, эквивалентная седельному и лесовозному автопоезду, приведена на рис. I. В этой модели учтены продольно-угловые перемещения, подрессоренные и неподдресоренные массы, а также наличие балансирной подвески в прицепе-ропуске. Считаем, что перераспределение динамической массы по осям системы при торможении на процесс вертикальных колебаний влияния не оказывает.

Система, приведенная на рис. I, имеет шесть степеней свободы, характеризующихся следующими обобщенными координатами: вертикальные и продольно-угловые перемещения подрессоренных масс тягача  $Z_T$  и  $\theta$ , вертикальные перемещения центра тяжести пакета хлыстов  $Z_x$ , прицепа-ропуски  $Z_n$  и  $\theta_n$ , вертикальные перемещения неподдресоренных масс передней  $\xi_1$  и  $\xi_2$  задней осей тягача.

Полученные на основании уравнения Лагранжа дифференциальные уравнения вертикальных колебаний автопоезда имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} & (M_T + m_{1x}) \ddot{Z}_T + k' \dot{Z}_T + c' Z_T + m_{1x} (l_2 - d) \ddot{\theta} + k'' \dot{\theta} + c'' \theta - k_1 \xi_1 - c_1 \dot{\xi}_1 - \\ & - k_2 \xi_2 - c_2 \dot{\xi}_2 + K_1 K_2 k_x \dot{Z}_n + K_1 K_2 c_x Z_n - K_1 k_x \dot{Z}_x - K_1 c_x Z_x = 0; \\ & [M_T \rho_T^2 + m_{1x} (l_2 - d)^2] \ddot{\theta} + k'' \dot{\theta} + c'' \theta + m_{1x} (l_2 - d) \ddot{Z}_T + c'' Z_T + l_1 k_1 \dot{\xi}_1 + l_1 c_1 \dot{\xi}_1 - \\ & - l_2 K_2 \dot{\xi}_2 - l_2 c_2 \dot{\xi}_2 + K_2 K_3 k_x \dot{Z}_n + K_2 K_3 c_x Z_n - K_2 k_x \dot{Z}_x - K_2 c_x Z_x = 0; \quad (1) \\ & m_1 \ddot{\xi}_1 + (k_1 + k_{w1}) \dot{\xi}_1 + (c_1 + c_{w1}) \xi_1 - k_1 \dot{Z}_T - c_1 Z_T + k_1 l_1 \dot{\theta} + c_1 l_1 \theta = k_{w1} \dot{q}_1 - c_{w1} q_1; \\ & m_2 \ddot{\xi}_2 + (k_2 + k_{w2}) \dot{\xi}_2 + (c_2 + c_{w2}) \xi_2 - k_2 \dot{Z}_T - c_2 Z_T - l_2 k_2 \dot{\theta} - c_2 l_2 \theta = k_{w2} \dot{q}_2 + c_{w2} q_2; \end{aligned}$$

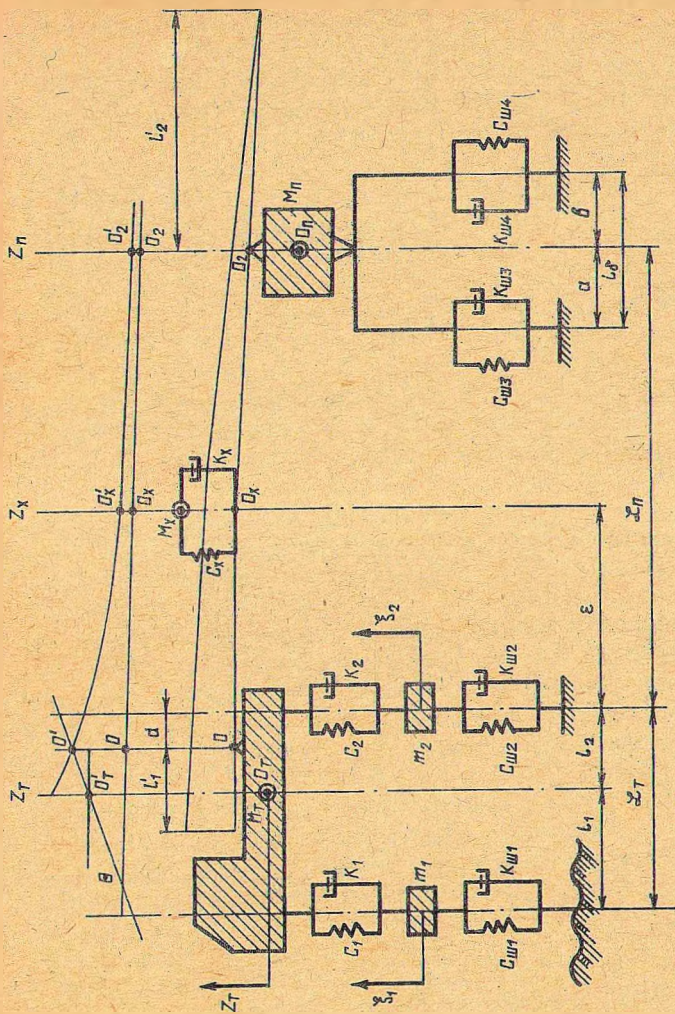


Рис. 1. Колебательная схема, эквивалентная лесовозному автополюзду

$q_1, q_2, q_3, q_4$  - текущие значения высот неровностей под колесами соответствующих осей автопоезда;

Размеры  $l_1, l_2, z_n, d, \epsilon, l_0$  - обозначены на рис. I.

Источником воздействия на систему являются неровности дороги, причем

$$q_1 = f(t); q_2 = f(t - \tau_1); q_3 = f(t - \tau_2); q_4 = f(t - \tau_3);$$

где  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  - запаздывание воздействия на poszczególную ось по отношению к предыдущим:

$$\tau_1 = \frac{l_1}{v_n}; \tau_2 = \frac{l_1 + l_2 + d}{v_n}; \tau_3 = \frac{l_1 + l_2 + d + l_0}{v_n};$$

$v_n$  - текущие значения, постоянно изменяющиеся в процессе скорости движения.

Уравнения (I) для автопоезда МАЗ-509+ТМЗ-803 решали на ЭЦМ М-32. На печать выдавались перемещения и ускорения поддрессоренных и неподдрессоренных масс тягача, вертикальные перемещения и ускорения центра тяжести пакета хлыстов и прицепов-роспуска и, кроме того, среднеквадратичные величины перечисленных показателей.

Воздействие от дороги задавалось в виде таблицы реальных значений высот неровностей  $q_n$  по длине опытных участков дорог через определенные интервалы. Ввиду того, что движение системы неустановившееся, время  $t_n$ , соответствующее каждому из задаваемых значений высот  $q_n$ , равно:

$$t_n = \frac{v_n}{j} - \sqrt{\left(\frac{v_n}{j}\right)^2 - \frac{2 \cdot S_n}{j}}, \quad n=1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

где  $j$  - замедление (ускорение) поступательного движения автопоезда;

$S_n$  - величина тормозного пути.

Скорость  $v_n$  подсчитывали по формуле  $v_n = v_{n-1} - j t_{n-1}$  (при  $n=1$  скорость  $v_{n-1} = v_0$ ;  $t_{n-1} = t_0$ , начальная скорость  $v_0$ , при которой начинается торможение, задается).

В качестве расчетных принимали опытные участки дорог с гравийным покрытием, характеризующиеся различной степенью ровности.

Проанализировано более 45 различных вариантов решений, причем широко варьировались начальная скорость движения, замедление  $\dot{f}$  и тормозной путь  $S_n$ .

На рис. 2 приведены кривые ускорений автопоезда  $\ddot{Z}_T$  и  $\ddot{Z}_n$ , возникающие в процессе его торможения. Торможение осуществлялось на участке дороги со среднеквадратичной высотой неровностей  $G_n = 1,15$  см со скорости  $V_0 = 5,5$  и  $9,7$  м/с. Из рисунка видно, что функции  $\ddot{Z}_T = f(S)$  и  $\ddot{Z}_n = f(S)$  носят характер случайных колебаний. Причем характерно, что начиная от начала торможения по мере прохождения участка частоты колебаний существенно меняются. Так, например, преобладающей в начале движения по опытному участку (кривая 1) при начальной скорости движения  $V_0 = 5,5$  м/с является частота  $\omega = 39 \frac{1}{с}$ , а в конце движения  $\omega = 26 \frac{1}{с}$ . На колебания прицепа (кривые 3,4) заметно наложение высокочастотной составляющей как в начале, так и в конце процесса. Причем с увеличением скорости движения резко проявляются высокочастотные составляющие процесса (кривая 4). Наблюдается существенное по абсолютной величине различие амплитуды ускорений по длине участка торможения. Например, при  $V_0 = 5,5$  м/с,  $\dot{f} = 1,14$  м/с<sup>2</sup>, ускорения вертикальных колебаний  $\ddot{Z}_T$  по абсолютной величине изменяются от 1,3 до 7,8 м/с<sup>2</sup> (кривая 1). С увеличением начальной скорости движения существенно возрастают амплитуды вертикальных ускорений системы. Особенно это характерно для прицепа-ропуски. Так, с увеличением начальной скорости  $V_0$  от 5,5 до 9,7 м/с максимальное значение ускорений увеличивается примерно в два раза.

Исследования показали, что экстремальные значения ускорений тягача появляются на одних и тех же неровностях и почти не зависят от величины замедления и начальной скорости движения автопоезда (кривые 1,2). Что касается прицепа-ропуски, то здесь с увеличением начальной скорости движения происходит некоторый сдвиг максимальных значений ускорений в направлении замедленного движения системы (кривые 3,4).

Характерной особенностью рассматриваемого режима движения является увеличение возможности появления резонансных явлений в системе. Ввиду того, что скорость движения непрерывно меняется, увеличивается возможность появления случая, когда среднее время проезда неровности будет близко к периоду

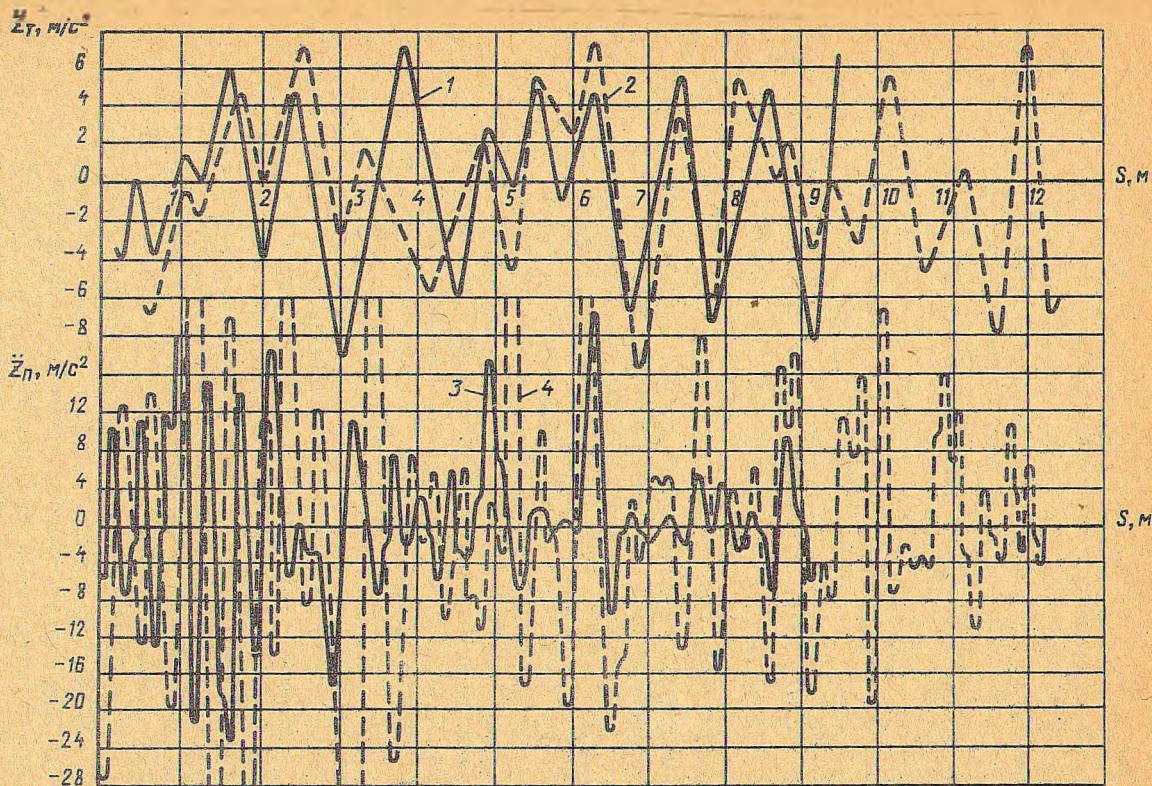


Рис. 2. Зависимости вертикальных ускорений масс автопоезда МАЗ-509+ТМЗ-803 от начальной скорости движения и величины замедления: 1 -  $\ddot{z}_T = f(S)$ ,  $d = 1,14 m/c^2$ ,  $v_0 = 5,5 m/c$ ; 2 -  $\ddot{z}_T = f(S_n)$ ,  $d = 3,50 m/c^2$ ,  $v_0 = 9,7 m/c$ ; 3 -  $\ddot{z}_n = f(S_n)$ ,  $d = 1,14 m/c^2$ ,  $v_0 = 5,5 m/c$ ; 4 -  $\ddot{z}_n = f(S_n)$ ,  $d = 3,50 m/c^2$ ,  $v_0 = 9,7 m/c$

собственных колебаний системы. Тогда амплитуда вынужденных колебаний увеличивается, однако из-за постоянно меняющихся частот воздействия возрастания амплитуд колебаний будут кратковременными. Иногда это является причиной резкого возрастания амплитуд ускорений системы на неустановившихся режимах движения по сравнению с установившимися. Так, например, наибольшее ускорение тягача  $\ddot{Z}_T$  (кривая 1) при  $j = 1,14 \text{ м/с}^2$  и  $v_0 = 5,5 \text{ м/с}$  на расстоянии 3,8 м от начала участка торможения по абсолютной величине составляет  $7,8 \text{ м/с}^2$  (скорость прохождения этой же точки  $v = 3,74 \text{ м/с}$ ). В то же время при установившемся движении со скоростью  $v = v_0 = \text{const}$  наибольшее отклонение составило в этом месте пути всего  $4,2 \text{ м/с}$  (см. рис. 2, кривая I). В равной степени происходят также и обратные явления.

На рис. 3 приведены зависимости среднеквадратичных значений  $G_{\ddot{Z}_T}, G_{\ddot{Z}_n}, G_{\ddot{\xi}_1}, G_{\ddot{\xi}_2}$  и максимальных значений  $\ddot{Z}_{Tmax}$  и  $\ddot{Z}_{nmax}$  от величины замедления  $j$  и тормозного пути  $S_n$ .

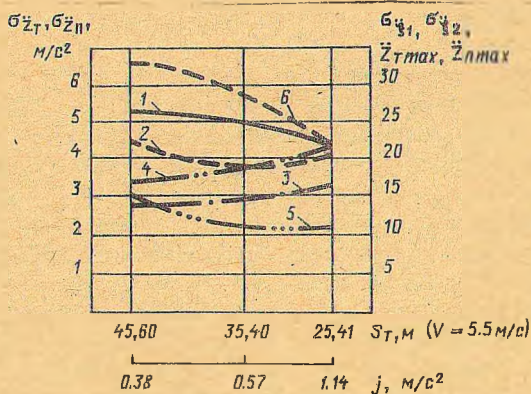


Рис. 3. Зависимости среднеквадратичных и максимальных величин вертикальных ускорений от величины замедления, тормозного пути и начальной скорости движения:

- а) 1 -  $G_{\ddot{Z}_n} = f(j)$ ; 2 -  $G_{\ddot{Z}_T} = f(j)$ ;  
 3 -  $G_{\ddot{\xi}_1} = f(j)$ ; 4 -  $G_{\ddot{\xi}_2} = f(j)$ ; 5 -  $\ddot{Z}_{Tmax} = f(j)$ ;  
 6 -  $\ddot{Z}_{nmax} = f(j)$  при  $v_0 = 5,5 \text{ м/с}$

Из рисунка видно, что с увеличением  $j$  ускорения неподдрессированных масс передней и задней осей тягача  $G_{\ddot{\xi}_1}, G_{\ddot{\xi}_2}$  (крив-

вне 3,4 ) возрастают. Так, при увеличении  $j$  от 0,38 до 1,14 м/с<sup>2</sup> среднеквадратичные значения ускорений  $G_{\Sigma}$  и  $G_{\Sigma_{\text{max}}}$  увеличиваются в 1,16 и 1,21 раза соответственно. Что касается  $\Sigma_{\text{T max}}$  и  $G_{\Pi}$  (кривые 5,6), то с увеличением  $j$  при неизменной начальной скорости движения ( $V_0 = 5,5$  м/с) их значения уменьшаются. Однако для кривой 2 характерным является то обстоятельство, что при  $j$  больше 0,57 м/с<sup>2</sup>  $G_{\Sigma_{\text{T}}}$  начинают увеличиваться.

Таким образом, проведенные исследования показали, что разработанная методика учитывает основные закономерности колебаний лесовозного автопоезда на неустановившихся режимах и может быть использована для исследования вертикальных колебаний автопоездов на неустановившихся режимах движения.

Установлено, что вертикальные ускорения системы зависят от величины начальной скорости торможения (разгона) и его интенсивности. В сравнении с установившимся движением со скоростью, равной начальной скорости торможения, уровень статистических показателей вертикальной динамики при неустановившихся режимах ниже. Величина частоты процесса колебаний системы по мере ее замедления уменьшается.

Одной из основных особенностей вертикальной динамики системы при неустановившемся движении является значительное увеличение вероятности прохождения системы через резонанс и, как следствие этого, вероятности появления больших по абсолютной величине единичных отклонений амплитуд колебаний. В сравнении с установившимся движением на неустановившихся режимах при проезде одной и той же неровности дороги возможно появление амплитуд колебаний по максимальной величине на 50-60% больше.