

ГАЖК " ЎЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙЎЛЛАРИ "

ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА

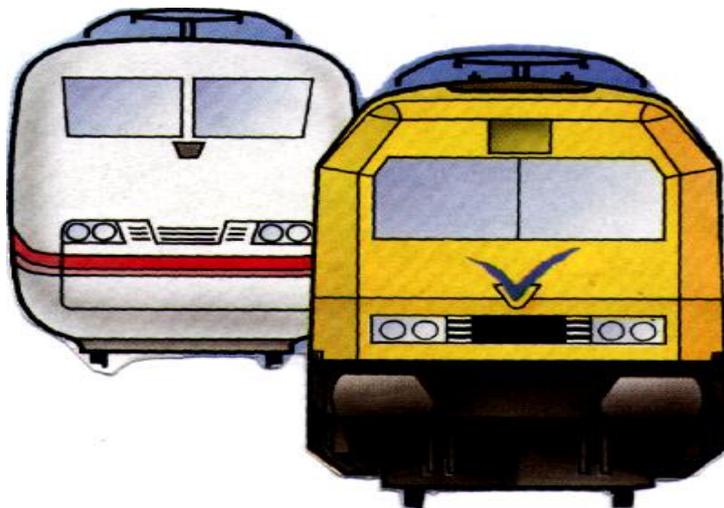
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям по дисциплине
«ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА»

для подготовки магистрантов по специальности

5A521310 – «Электрический транспорт»

на базе направления бакалавриата

5521300 – «Электротехника, электромеханика, электротехнология»



Ташкент-2008

УДК 621.536; 628.01

Методические указания составлены для выполнения практических и самостоятельных работ по дисциплине «Основы моделирования динамики подвижного состава электрического транспорта» для подготовки магистрантов ТашИИТа по специальности 5А521310 - «Электрический транспорт» на базе направления бакалавриата 5521300 – «Электротехника, электромеханика, электротехнология».

Методические указания обсуждены на заседании кафедры «Промышленный и городской электрический транспорт», рекомендованы к изданию научно-методической комиссией института.

Авторы: Г. А. ХРОМОВА - зав. кафедрой «Городской и промышленный электрический транспорт», д.т.н., профессор
С. В. СОБОЛЕВ - ассистент
С. М. САЛИМЖАНОВ - магистрант

Рецензенты:

А. А. РИЗАЕВ - д.т.н., профессор.
Ш. С. ФАЙЗИБАЕВ - д.т.н., доцент

©Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, 2008.

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие интенсификации перевозок (рост скоростей движения и веса ПС ЭТ) значительно усложнились проблемы обеспечения безопасной и безотказной работы подвижного состава электрического транспорта, повысились требования к механической части наземных транспортных систем. В этих условиях в большей степени проявляется необходимость глубокого понимания магистрантами-электромеханиками особенностей работы подвижного состава, характера нагружения, причин выхода из строя основных узлов механической части, овладения методами их динамического расчёта.

Основной целью данной дисциплины является ознакомление магистрантов с методами динамического расчета в области проектирования нового и модернизации существующего электрического транспорта и всех наземных систем в целом.

Задачей дисциплины является - изучение динамических явлений подвижного состава при его взаимодействии при движении с путем. Изучение таких явлений необходимо для правильного выбора схемы и параметров оборудования ЭТ и в частности виброзащитных устройств, а также для снижения динамических сил, действующих на элементы механической части, на находящиеся в нем люди, а также на путь. Для исследования динамики подвижного состава широко применяются расчёты на ЭВМ и испытания отдельных элементов и в целом подвижного состава.

Магистранты ТашИИТ специальности 5А521310 -«Электрический транспорт» в ходе освоения курса «Основы моделирования динамики подвижного состава электрического транспорта» должны овладеть знаниями:

- по основным методам и новым технологиям аналитического и численного решения прикладных инженерных задач в области динамического расчета и проектирования нового, а также модернизации существующего городского и промышленного электрического транспорта;
- по основным принципам построения математических моделей и алгоритмов для прикладных задач в области динамики подвижного состава электрического транспорта;
- по возможностям программирования и расчета инженерных задач *в среде Mathcad 12* при ознакомлении с базовыми принципами численного дифференцирования и интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений;
- по обработке данных результатов динамических расчетов ПС ЭТ с использованием принципа «алгоритм + структуры данных = программы».

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Практические занятия направлены на приобретение навыков составления и решения уравнений, описывающих динамические явления, возникающие в механической части электрического транспорта, получение навыков выполнения динамических расчетов по определению резонансных частот и амплитуд колебаний подвижного состава (вагонов метрополитена, электровозов, электропоездов и т.д.) с использованием ЭВМ.

Темы практических занятий:

1. Исследование влияния рессорного подвешивания на вертикальную динамику экипажа.

2. Определение скорости начала опрокидывания экипажа при его движении в кривой.
3. Определение скорости схода экипажа с рельсов из-за бокового отжатия внешнего рельса.
4. Определение скорости схода экипажа с рельсов вследствие выполазания гребня бандажа набегающего колеса на поверхность головки внешнего рельса.
5. Определение скорости начала хордового положения экипажа в кривой.

Элементы научных исследований при самостоятельной работе задаются магистрантам с учетом их теоретической подготовки, оснащенности вычислительными средствами, макетами и натурными образцами кафедры и ее научно-исследовательской тематики.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ ДИНАМИКУ ЭКИПАЖА

Цель практической работы: определение силы динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при движении с различными скоростями по рельсовому пути с периодически повторяющимися неровностями.

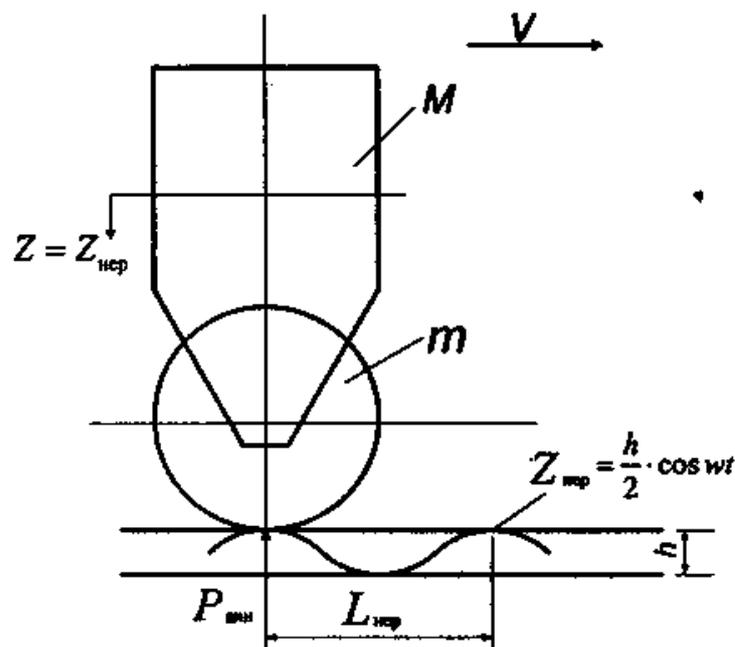


Рисунок 1.1. - Экипаж без рессорного подвешивания.

Уравнение вертикальной динамики (рисунок 1.1) в этом случае имеет вид

$$(M + m) \cdot \ddot{z}_{\text{нер}} = P_{\text{дин}}$$

или

$$P_{\ddot{z}} = (M + m) \cdot \frac{h}{2} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t),$$

где

$$\omega = \frac{2\pi \cdot V}{L_{\text{нер}}}$$

Отсюда

$$P_{\ddot{z}} = 2 \cdot (M + m) \cdot h \cdot \left(\frac{\pi \cdot V}{L_{\text{нер}}} \right)^2 \cdot \cos(\omega t), \text{ кН};$$

$$P_{\text{дин. max}} = 19.72 \cdot (M + m) \cdot \frac{h}{L_{\text{нер}}^2} \cdot V^2, \text{ кН},$$

где :

$M + m$ - масса экипажа, отнесённая к одной оси, т;

h - глубина неровности, м;

$L_{\text{нер}}$ - длина неровности, м;

V - скорость движения экипажа, м/с.

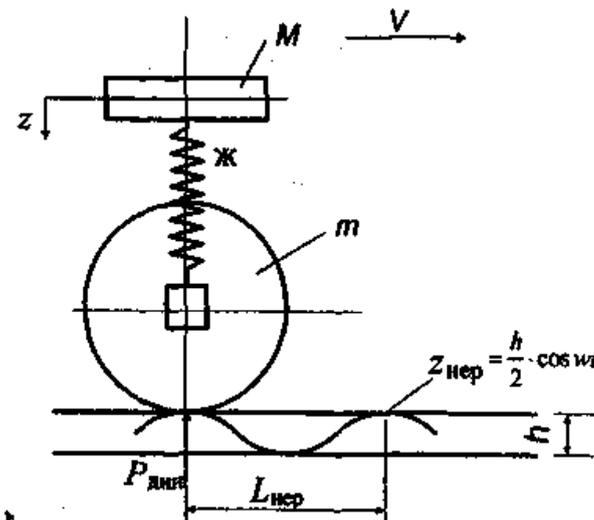


Рисунок 1.2. Экипаж с рессорным подвешиванием.

Рассмотрим упругий элемент - рессору - между массой подрессоренных частей M и массой неподдресоренных частей m (рисунок 1.2).

Пусть \mathcal{J} - жесткость рессорного подвешивания, отнесённая к одной оси, кН/м;

z - текущая координата вертикальных перемещений центра тяжести подрессоренной массы M ;

$z_{\text{нер}}$ - текущая координата неровности пути.

Уравнение вертикальных колебаний

$$M \cdot \ddot{z} + \mathcal{J} \cdot (z - z_{\text{нер}}) = 0; \quad (1.1)$$

$$m \cdot \ddot{z}_{\text{нер}} - \mathcal{J} \cdot (z - z_{\text{нер}}) + P_{\text{дин}} = 0; \quad (1.2)$$

Решение уравнения (1.1) ищем в виде

$$z = A \cdot \cos(\omega t).$$

После подстановки данного выражения в уравнение (1.2) получаем

$$z = \frac{k^2 \cdot h}{2(k^2 - \omega^2)} \cdot \cos(\omega t),$$

где:

$$k = \sqrt{\frac{\mathcal{J}\mathcal{C}}{M}}, \text{ 1/с- круговая частота свободных колебаний;}$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot V}{L_{i\ddot{a}\delta}}, \text{ 1/с- круговая частота вынужденных колебаний.}$$

Если $\omega \rightarrow k$, то амплитуда колебаний $A = Z_{max} \rightarrow \infty$, то есть имеет место резонанс колебаний. Соответствующая скорость движения называется резонансной или критической.

Тогда

$$k = \omega \text{ или } \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{I}}} = \frac{2\pi \cdot V}{L_{i\ddot{a}\delta}}.$$

Отсюда

$$V = V_{\dot{E}\dot{D}\dot{E}\dot{O}} = \frac{k \cdot L_{i\ddot{a}\delta}}{2\pi}, \text{ м/с}$$

или

$$V_{\dot{E}\dot{D}\dot{E}\dot{O}} = \frac{L_{i\ddot{a}\delta}}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{I}}}, \text{ м/с;}$$

$$V_{\dot{E}\dot{D}\dot{E}\dot{O}} = 0,573 \cdot L_{i\ddot{a}\delta} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{I}}}, \text{ км/ч.}$$

После подстановки найденного решения в уравнение (1.2) получим

$$P_{\ddot{a}\dot{e}\dot{t}} = \alpha \cdot (z - z_{i\ddot{a}\delta}) - m \cdot \ddot{z}_{i\ddot{a}\delta} = \alpha \cdot \left(\frac{m}{\alpha} \cdot \frac{h}{2} \cdot \omega^2 + \frac{k^2 \cdot h}{2 \cdot (k^2 - \omega^2)} - \frac{h}{2} \right) \cdot \cos(\omega t).$$

Отсюда находим максимальное значение $P_{дин. max}$:

$$P_{\ddot{a}\dot{e}\dot{t}. max} = \alpha \cdot \left(\frac{m}{\alpha} \cdot \frac{h}{2} \cdot \omega^2 + \frac{k^2 \cdot h}{2 \cdot (k^2 - \omega^2)} - \frac{h}{2} \right), \text{ кН.}$$

Уравнение вертикальной динамики (рисунок 1.3) в случае колебаний экипажа с гасителем колебаний в системе одноярусного рессорного подвешивания имеет вид:

$$M \cdot \ddot{z} + \mathcal{J}\mathcal{C} \cdot (z - z_{нер}) + \beta \cdot (\dot{z} - \dot{z}_{нер}) = 0; \quad (1.3)$$

$$m \cdot \ddot{z}_{нер} - \mathcal{J}\mathcal{C} \cdot (z - z_{нер}) - \beta \cdot (\dot{z} - \dot{z}_{нер}) + P_{дин} = 0; \quad (1.4)$$

Коэффициент сопротивления гидравлического гасителя колебаний:

$$\beta = \frac{H}{k \cdot z}, \text{ кН*с/м,}$$

где:

$$H = \mathcal{J}\mathcal{C} \cdot \frac{h}{2} - \text{максимальное значение возмущающей силы, кН;}$$

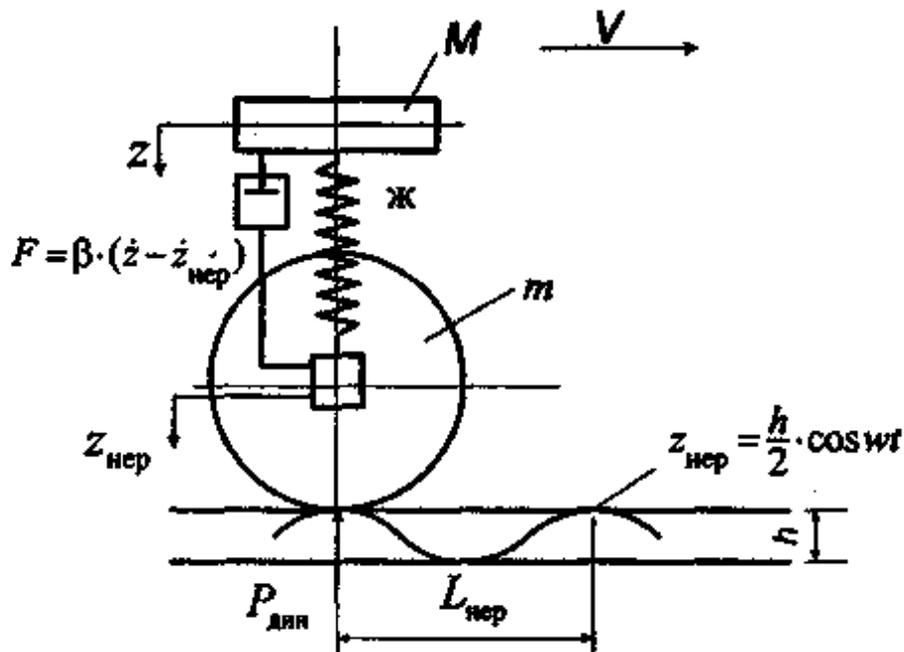


Рисунок 1.3. Экипаж с гасителем колебаний в системе одноярусного рессорного подвешивания.

$$k = \sqrt{\frac{\mathcal{J}}{M}} - \text{частота свободных колебаний, } 1/\text{с};$$

$z = k_{\text{вд}} \cdot z_{\text{ст}}$ - амплитуда вертикальных колебаний подрессоренной массы M , м;
 $k_{\text{вд}} = (0.3 - 0.35)$ - коэффициент вертикальной динамики по амплитуде (см. [1]);

$z_{\text{ст}} = |V_{\text{констр}}|$ - статический прогиб рессорного подвешивания, м.

Отсюда

$$\beta = \frac{\mathcal{J}}{k} \cdot \frac{k_{\text{вд}} \cdot z_{\text{ст}} - \frac{h}{2}}{k_{\text{вд}} \cdot z_{\text{ст}}}, \text{ кН*с/м.}$$

Из уравнения (1.4):

$$P_{\text{дин}} = \mathcal{J} \cdot (z - z_{\text{нер}}) + \beta \cdot (\dot{z} - \dot{z}_{\text{нер}}) - m \cdot \ddot{z}_{\text{нер}}$$

После подстановки и некоторых преобразований получим

$$P_{\text{дин}} = \left(\mathcal{J} \cdot \left(k_{\text{вд}} \cdot z_{\text{ст}} - \frac{h}{2} \right) + m \cdot \omega^2 \cdot \frac{h}{2} \right) \cos(\omega t) + \beta \cdot \omega \cdot \left(\frac{h}{2} - k_{\text{вд}} \cdot z_{\text{ст}} \right) \cdot \sin(\omega t);$$

$$P_{\text{дин. max}} = \sqrt{\left(\mathcal{J} \cdot \left(k_{\text{вд}} \cdot z_{\text{ст}} - \frac{h}{2} \right) + m \cdot \omega^2 \cdot \frac{h}{2} \right)^2 + \beta \cdot \omega \cdot \left(\frac{h}{2} - k_{\text{вд}} \cdot z_{\text{ст}} \right)^2}, \text{ кН.}$$

Программа выполнения работы:

1. Составить программу для численного расчета в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
2. Определить величины критической скорости.
3. Построить графическую зависимость $Z_{max} = f(V)$.
4. Построить графическую зависимость $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}} = f(V)$ для экипажа с рессорным подвешиванием и без него.
5. Построить графическую зависимость $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}} = f(L_{\dot{I}\ddot{A}\dot{D}})$ при $V = V_{\dot{E}\ddot{I}\ddot{N}\dot{O}\dot{D}}$.
6. Вычислить $\lambda, k, \omega, V_{крит}, T, \beta$.
7. Вычислить $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}}$ для экипажа с гасителем колебаний в системе одноярусного рессорного подвешивания при $V_{крит}$.
8. Построить графическую зависимость $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}} = f(\omega \cdot t)$ при критической скорости $V_{крит}$, на графике показать период колебаний T в резонансном режиме.
9. Сравнить вычисленные по программе $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}}$ с $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}}$ при критической скорости и отсутствии гасителей колебаний.

Содержание отчета

1. Расчетная схема и уравнения с подробными комментариями.
2. Графические зависимости $Z_{max} = f(V)$, $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}} = f(V)$ и $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}} = f(L_{\dot{I}\ddot{A}\dot{D}})$ для экипажа с рессорным подвешиванием и без него; $D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}} = f(\omega \cdot t)$ при критической скорости $V_{крит}$, расчетные значения $\lambda, k, \omega, V_{крит}, T, \beta, D_{\dot{A}\ddot{E}\dot{I}}$ для экипажа с гасителем колебаний в системе одноярусного рессорного подвешивания.
3. Текст программы для расчетов в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. В каких единицах измеряются круговая и циклическая частоты колебаний?
2. Какие части экипажа относятся к неподрессоренным, а какие – к поддрессоренным?
3. От чего зависит величина критической (резонансной) скорости?
4. Каково условие возникновения резонанса колебаний?
5. Как определить жёсткость рессорного подвешивания?
6. От каких параметров зависит период и частота свободных колебаний?

7. Сформулируйте смысловые определения каждого из слагаемых уравнений вертикальной динамики.
8. Поясните физический смысл коэффициента сопротивления гидравлического гасителя колебаний β .
9. Что характеризует коэффициент вертикальной динамики по амплитуде?
10. Каково назначение гасителей колебаний?
11. Какие типы гасителей колебаний применяются в ПС ЭТ ?
12. От каких параметров зависит частота вынужденных вертикальных колебаний?
13. От чего зависит амплитуда установившегося процесса колебаний при резонансе?

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ НАЧАЛА ОПРОКИДЫВАНИЯ ЭКИПАЖА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ В КРИВОЙ

Цель практической работы: определение угла наклона кузова и скорости начала опрокидывания экипажа при движении в кривой, и влияние на их величины основных параметров экипажа и пути.

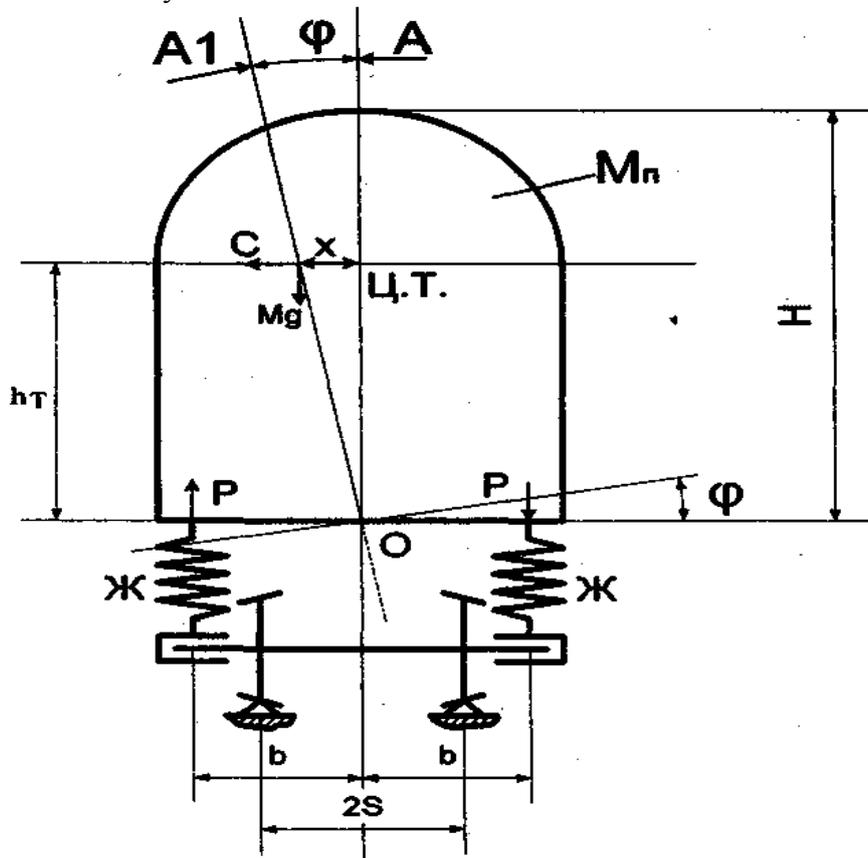


Рисунок 2.1. - Расчётная схема экипажа и действующих на него сил.

Расчётная схема экипажа и действующих на него сил представлена на рисунке 2.1.
На рисунке 2.1 :

M_{II} - подрессоренная масса экипажа, т:

$$M_{II} = M \cdot n, \quad (2.1)$$

где:

M - подрессоренная масса экипажа, отнесенная к одной оси, т;

n - число осей экипажа;

$$\alpha = \frac{M_i \cdot g}{Z_{\tilde{n}\tilde{o}}} - \text{жёсткость одной стороны рессорного подвешивания}$$

экипажа, кН/м;

Z_{cm} - статический прогиб рессорного подвешивания, м;

h_m - высота центра тяжести наддресорного строения от верхней плоскости рессорного подвешивания, м;

φ - угол наклона наддресорного строения, рад;

$2b$ - расстояние между осями рессорных комплектов в поперечной плоскости, м.

При расчётах принять $2b = (2,1...2,2)$ м;

$$\tilde{N} = \frac{M_i \cdot V^2}{R} - \text{центробежная сила инерции, возникшая при движении}$$

экипажа по кривой, кН;

P - реакции рессорного подвешивания, вызванные наклоном наддресорного строения на угол φ .

Из приведённой на рисунке 2.1 схемы следует, что при движении в кривой на подрессоренную часть действует опрокидывающий момент:

$$\dot{I}_{\tilde{n}\tilde{o}} = C \cdot h_o + \dot{I}_i \cdot g \cdot x, \text{ кН*м}, \quad (2.2)$$

где $x = h_T \cdot \varphi$.

Этому моменту противодействует восстанавливающий момент реакций рессорного подвешивания:

$$M_{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} = 2 \cdot P \cdot b, \text{ кН*м}. \quad (2.3)$$

Здесь

$$P = \mathcal{J} \cdot b \cdot \varphi, \text{ кН},$$

тогда

$$M_{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}} = 2 \cdot \alpha \cdot b^2 \cdot \varphi, \text{ кН*м}.$$

$$M_{\tilde{n}\tilde{o}} = \frac{M_i \cdot V^2}{R} \cdot h_T + M_i \cdot g \cdot h_T \cdot \varphi = M_i \cdot h_T \cdot \left(\frac{V^2}{R} + g \cdot \varphi \right). \quad (2.4)$$

Условием равновесия наддресорного строения является равенство:

$$\dot{I}_{\tilde{n}\tilde{o}} = \dot{I}_{\hat{a}\hat{i}\hat{n}\hat{o}},$$

или

$$\frac{M_i \cdot V^2}{R} \cdot h_T + M_i \cdot g \cdot h_T \cdot \varphi = 2 \cdot \alpha \cdot b^2 \cdot \varphi. \quad (2.5)$$

Преобразуя выражение, получим:

$$\frac{M_{\dot{i}} \cdot V^2}{R} \cdot h_T = (2 \cdot \alpha \cdot b^2 - M_{\dot{i}} \cdot g \cdot h_T) \cdot \varphi. \quad (2.6)$$

Отсюда

$$\varphi = \frac{M_{\dot{i}} \cdot V^2 \cdot h_T}{R(2 \cdot \alpha \cdot b^2 - M_{\dot{i}} \cdot g \cdot h_T)}, \text{ рад.} \quad (2.7)$$

Очевидно, устойчивость экипажа против опрокидывания будет обеспечена при условии:

$$\varphi \ll [\varphi]_{\max}, \quad (2.8)$$

где $[\varphi]_{\max}$ - максимально допустимый угол наклона наддрессорного строения, рад.

Условием, при которых опрокидывание экипажа станет неизбежным, соответствует равенство $x = b$, т.е. когда:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} = \frac{x_{\max}}{h_T} \approx [\varphi]_{\max} \geq \frac{b}{h_T} \quad (2.9)$$

так при $x = 1,1$ м и $h_T = 1,0$ м; $[\varphi]_{\max} = 1,1$ рад.

При этом реакции рессор достигнут величины:

$$P_{\max} = \alpha \cdot b \cdot \varphi_{\max}, \text{ кН}$$

$$M_{\ddot{a}\ddot{i}\ddot{o}} = P_{\max} \cdot 2 \cdot b = 2 \cdot \alpha \cdot b^2 \cdot \frac{x_{\max}}{h_T}, \text{ кН*м.} \quad (2.10)$$

Из равенства (в этих условиях):

$$\dot{I}_{\ddot{a}\ddot{i}\ddot{o}} \cdot \max = \dot{I}_{\ddot{a}\ddot{i}\ddot{o}}$$

Находим:

$$\frac{M_{\dot{i}} \cdot V^2}{R} \cdot h_T + M_{\dot{i}} \cdot g \cdot b = 2 \cdot \alpha \cdot b^2 \cdot \frac{b}{h_T}, \quad (2.11)$$

что даёт возможность определить скорость начала опрокидывания экипажа:

$$V_{\ddot{a}\ddot{i}\ddot{o}} \geq \sqrt{\frac{R \cdot b}{M_{\dot{i}} \cdot h_T} \cdot \left(2 \cdot \frac{\alpha \cdot b^2}{h_T} - M_{\dot{i}} \cdot g \right)}, \text{ м/с} \quad (2.12)$$

- без учёта возвышения наружного рельса ($h=0$),

$$V_{\ddot{a}\ddot{i}\ddot{o}} \cdot \ddot{a}\ddot{i}\ddot{c} = \sqrt{\frac{R \cdot b}{M_{\dot{i}} \cdot h_T} \cdot \left(2 \cdot \frac{\alpha \cdot b^2}{h_T} - M_{\dot{i}} \cdot g \right) + \frac{R \cdot g \cdot h}{2 \cdot S}}, \text{ м/с} \quad (2.13)$$

- с учётом возвышения наружного рельса ($h \neq 0$).

$2S=1,6$ - расстояние между кругами катания колёс, м.

Отклонение любой точки A от её среднего положения определяется из выражения:

$$\overline{AA_1} = H \cdot \varphi = \frac{M_{\dot{i}} \cdot H \cdot h_T}{R \cdot (2 \cdot \alpha \cdot b^2 - M_{\dot{i}} \cdot g \cdot h_T)} \cdot V^2, \quad (2.14)$$

где H — высота точки A над верхней плоскостью рессорного подвешивания, м.

Программа выполнения работы:

1. Составить программу для численного расчета в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
2. Построить графические зависимости $V = f(R)$ при наличии возвышения внешнего рельса ($h = \nu \cdot a \cdot r$), при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
3. Построить графические зависимости $V = f(R)$ при изменении величины статического прогиба рессорного подвешивания Z_{cm} .
4. Построить графические зависимости $V = f(R)$ для различных значений высоты центра тяжести надрессорного строения от верхней плоскости рессорного подвешивания h_m .
5. Определить угол наклона надрессорного строения φ .
6. Определить максимально допустимый угол наклона надрессорного строения $[\varphi]_{\max}$.
7. Определить отклонение точки А от её среднего положения.
8. Определить скорость начала опрокидывания экипажа $V_{\ddot{\alpha}}$ без учета возвышения наружного рельса ($h = 0$) и $V_{\ddot{\alpha} \hat{a} \hat{t} \hat{c}}$ с учетом возвышения наружного рельса ($h \neq 0$).

Содержание отчета

1. Расчетная схема и уравнения с подробными комментариями.
2. Графические зависимости $V = f(R)$ при наличии возвышения внешнего рельса ($h = \nu \cdot a \cdot r$), при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
3. Графические зависимости $V = f(R)$ при изменении величины статического прогиба рессорного подвешивания Z_{cm} .
4. Графические зависимости $V = f(R)$ для различных значений высоты центра тяжести надрессорного строения от верхней плоскости рессорного подвешивания h_m .
5. Расчетное значение угла наклона надрессорного строения φ .
6. Расчетное значение максимально допустимого угла наклона надрессорного строения $[\varphi]_{\max}$.
7. Расчетное значение отклонения точки А от её среднего положения.
8. Расчетные значения скорости начала опрокидывания экипажа $V_{\ddot{\alpha}}$ без учета возвышения наружного рельса ($h = 0$) и $V_{\ddot{\alpha} \hat{a} \hat{t} \hat{c}}$ с учетом возвышения наружного рельса ($h \neq 0$).

9. Текст программы для расчетов в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
10. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. На что влияет угол наклона экипажа при движении в кривой?
2. Поясните, как влияет высота центра тяжести экипажа на его устойчивость против опрокидывания?
3. Чем определяется предельно допустимая величина угла наклона кузова?
4. Сформулируйте условие обеспечения устойчивости экипажа против опрокидывания при движении в кривой?
5. Поясните, как влияет жесткость рессорного подвешивания на устойчивость экипажа против опрокидывания?

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СХОДА ЭКИПАЖА С РЕЛЬСОВ ИЗ-ЗА БОКОВОГО ОТЖАТИЯ ВНЕШНЕГО РЕЛЬСА

Цель практической работы: определение скорости схода экипажа, вызванной боковым отжатием внешнего рельса, и влияние на ее величину основных параметров экипажа и пути.

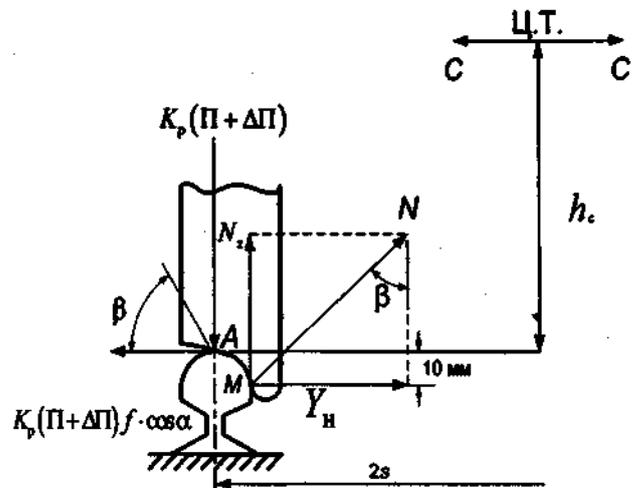


Рисунок 3.1. Расчетная схема с учетом сил, действующих на направляющее колесо.

Сход экипажа с рельсов вследствие бокового отжатия внешнего (наружного) рельса наступает при $Y_H \geq 90$ кН.

Из уравнения равновесия горизонтальных сил, действующих на направляющее колесо (рисунок 3.1), следует, что

$$Y_H = (C - C') + K_p (\Pi + \Delta\Pi) \cdot f \cdot \cos \alpha, \quad (3.1)$$

где:

$C = \frac{m_{\text{э}} V^2}{2R}$ - центробежная сила экипажа, отнесённая к одной оси, кН;

$C' = \frac{m_{\text{э}} g}{n} \cdot \frac{h}{2s}$ - составляющая веса экипажа, вызванная возвышением внешнего рельса и направленная к центру кривой, кН;

$\Pi = \frac{m_{\text{э}} g}{2n}$ - статическое давление колеса на рельс, кН;

$\Delta\Pi = (C - C') \cdot \frac{h_c}{2s}$ - увеличение вертикального давления набегающего колеса от действия результирующей центробежной силы, кН;

$f = 0,25$ - коэффициент трения между бандажом и головкой рельса в точке A их контакта по кругу катания;

K_p - коэффициент разгрузки набегающего колеса от возможных случайных изменений его вертикального давления на рельс (практически $K_p = 1,0$ при движении в кривой);

$$\text{Здесь } \cos \alpha = \frac{B}{\sqrt{B^2 + 4s^2}}.$$

$m_{\text{э}}$ - масса экипажа, т;

$$m_{\text{э}} = (M + m) \cdot n, \quad (3.2),$$

где:

$M+m$ - масса экипажа отнесённая к одной оси, т;

n - число осей экипажа;

R - радиус кривой, м;

V - скорость движения экипажа в кривой, м/с;

$g = 9,81$ - ускорение свободного падения, м/с²;

h - возвышение внешнего рельса, м;

$2s \approx 1,6$ - расстояние между кругами катания колёс, м;

h_c - высота центра тяжести экипажа над уровнем головок рельсов, м;

B — жёсткая база экипажа, м.

После подстановки приведённых выражений в уравнение для Y_H и некоторых преобразований получаем:

при учёте возвышения наружного рельса ($h \neq 0$)

$$Y_H = \frac{m_{\text{э}}}{2R} \cdot \left\{ \left[1.0 + K_p \cdot \frac{h_c}{2s} \cdot f \cdot \cos \alpha \right] \cdot V^2 + \frac{Rg}{n} \left[K_p \cdot f \left(1.0 - \frac{h \cdot h_c}{2s^2} \right) \cdot \cos \alpha - \frac{h}{s} \right] \right\}, \text{кН}; \quad (3.3)$$

в кривых без возвышения наружного рельса ($h = 0$)

$$Y_H = \frac{m_{\text{э}}}{2R} \left\{ \left[1.0 + K_p \cdot \frac{h_c}{2s} \cdot f \cdot \cos \alpha \right] \cdot V^2 + \frac{Rg}{n} K_p \cdot f \cdot \cos \alpha \right\}, \text{кН} \quad (3.4)$$

Эти выражения позволяют определить и построить графическую зависимость $Y_H = f(V)$ для конкретного экипажа при его движении по кривой заданного радиуса.

Для заданной величины направляющего усилия Y_H определяется соответствующая скорость движения V .

По величине $Y_H = 90$ кН определяется скорость, при которой создаются условия для недопустимого бокового отжатия внешнего рельса и схода экипажа с рельсов ($V_{\text{сх}}$).

Получаем:

при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$)

$$V_{\text{сх}} \geq \sqrt{\frac{2R \cdot \left\{ \frac{Y_H}{m_{\text{э}}} - \frac{g}{2n} \left[K_p \cdot f \cdot \left(1 - \frac{h \cdot h_c}{2S^2} \right) \cos \alpha \right] - \frac{h}{s} \right\}}{\left(1.0 + K_p \cdot f \cdot \frac{h_c}{2s} \cdot \cos \alpha \right)}}, \text{м/с}; \quad (3.5)$$

при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h=0$)

$$V_{\text{сх}} \geq \sqrt{\frac{2R \cdot \left\{ \frac{Y_H}{m_{\text{э}}} - \frac{g}{2n} K_p \cdot f \cdot \cos \alpha \right\}}{\left(1.0 + K_p \cdot f \cdot \frac{h_c}{2s} \cdot \cos \alpha \right)}}, \text{м/с} \quad (3.6)$$

Программа выполнения работы:

1. Составить программу для численного расчета в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
2. Построить графические зависимости $Y_H = f(V)$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(\hat{A})$, $Y_H = f(\hat{A})$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(R)$ при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
3. По заданной величине направляющего усилия Y_H определить соответствующую скорость движения V при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
4. По величине направляющего усилия $Y_H = 90$ кН определить скорость схода $V_{\tilde{N}\tilde{O}}$ экипажа с рельсов при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).

Содержание отчета

1. Расчетная схема и уравнения с подробными комментариями.
2. Графические зависимости: $Y_H = f(V)$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(\hat{A})$, $Y_H = f(\hat{A})$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(R)$ и расчетные значения Y_H , V и $V_{\tilde{N}\tilde{O}}$ при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
3. Текст программы для расчетов в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
4. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Поясните физическую природу сил, действующих на колесо в точках А и М.
2. Как определяется направление силы трения в точке А ?
3. Поясните, как влияет на величину направляющего усилия возвышение наружного рельса ?
4. Что представляет собой коэффициент разгрузки колеса K_p ?
5. Для чего делается уширение рельсовой колеи в кривой и от чего зависит его величина ?
6. Как влияет возвышение внешнего рельса на величину максимальной скорости, допустимой по условиям безопасности движения экипажа в кривой ?
7. Как влияет уширение рельсовой колеи на условия движения экипажа в кривой ?

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СХОДА ЭКИПАЖА С РЕЛЬСОВ ВСЛЕДСТВИЕ ВЫПОЛЗНИЯ ГРЕБНЯ БАНЖАДА НАБЕГАЮЩЕГО КОЛЕСА НА ПОВЕРХНОСТЬ ГОЛОВКИ ВНЕШНЕГО РЕЛЬСА

Цель практической работы: изучение условий, вызывающих сход экипажа с рельсов вследствие выползания гребня бандажа набегающего колеса на поверхность головки внешнего рельса. Расчетная схема представлена на рисунке 4.1.

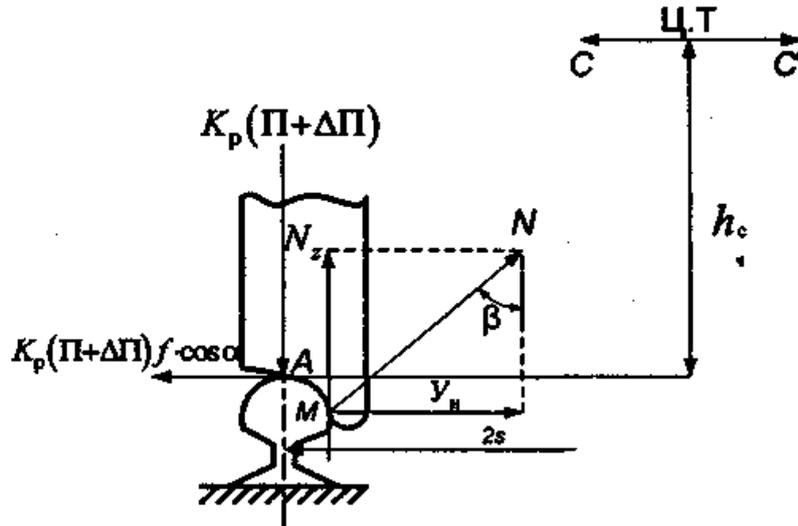


Рисунок 4.1. Расчетная схема для изучения условий, вызывающих сход экипажа с рельсов вследствие выползания гребня бандажа набегающего колеса на поверхность головки внешнего рельса.

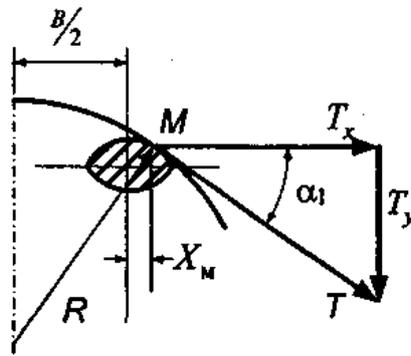


Рисунок 4.2. Расчётная схема действующих на набегающее колесо сил.

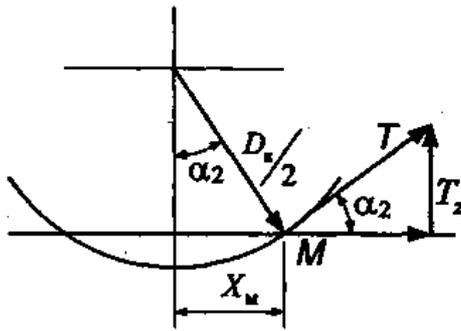


Рисунок 4.3. Схема действия сил.

При движении в кривой набегающее колесо гребнем своего бандажа взаимодействует с головкой внешнего рельса в точке M . Возникающая при этом сила трения $T = \mu N = \mu \frac{Y_n}{\sin \beta}$ направлена в сторону движения под углом α_1 и α_2 соответственно к вертикальной и горизонтальной плоскости. Расчёт показывает, что смещение точки M вдоль оси пути $X_M \leq 25$ мм, а горизонтальная T_x и вертикальная T_z составляющие силы трения не превышают 2% величины полученной силы $N_z = N \cdot \cos \beta$. Поэтому их влиянием на процесс схода можно пренебречь. Расчётная схема действующих на набегающее колесо сил представлена на рисунке 4.2. Условие выползания колеса на рельс может быть записано в виде соотношения

$$N_z \geq K_p (\Pi + \Delta\Pi) \quad (4.1)$$

или
$$Y_n \geq \frac{K_p}{\operatorname{ctg} \beta} (\Pi + \Delta\Pi) = K_p (\Pi + \Delta\Pi) \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (4.2).$$

При этом
$$Y_n = (C - C') + K_p (\Pi + \Delta\Pi) \cdot f \cdot \cos \alpha \quad (4.3).$$

В этих формулах:

$C = \frac{m_{\text{э}} V^2}{2R}$ - центробежная сила экипажа, отнесенная к набегающей колесной паре, кН;

$C' = \frac{m_{\text{э}} g}{n} \cdot \frac{h}{2s}$ - горизонтальная составляющая силы тяжести экипажа, отнесённая к одной колёсной паре, кН;

$\Pi = \frac{m_{\text{э}} g}{2n}$ - статическое давление колеса на рельс, кН,

где:

n - число колёсных пар экипажа;

h - возвышение внешнего рельса, м;

R - радиус кривой, м;

$2s = 1,6$ - расстояние между кругами катания колёс, м;

$m_{\text{э}}$ - масса экипажа, т;

$$m_{\text{г}} = (M + m) \cdot n,$$

где:

$(M + m)$ - масса экипажа, отнесённая к одной оси, т;

$g = 9,81$ - ускорение свободного падения, м/с²;

$\Delta \dot{I} = (\tilde{N} - \tilde{N}') \frac{h_c}{2s}$ - изменение вертикального давления колеса от действия

результатирующей центробежной силы, кН;

h_c - высота центра тяжести экипажа над уровнем головок рельсов, м;

K_p - коэффициент разгрузки колеса от колебаний и других факторов;

$f=0,25$ - коэффициент трения бандажа о рельс;

$\beta=65^\circ$ - угол наклона образующей гребня к горизонту;

$$\cos \alpha = \frac{\hat{A}}{\sqrt{\hat{A}^2 + 4s^2}} \quad (4.4),$$

где B - база экипажа, м.

После подстановки и соответствующих преобразований получим:

при наличии возвышения наружного рельса ($h \neq 0$)

$$V_{\tilde{n}\tilde{o}\tilde{a}} = \sqrt{\frac{gR}{n} \cdot \frac{\left\{ K_p (\operatorname{tg} \beta - f \cdot \cos \alpha) + \frac{h}{s} \left[1.0 - \frac{K_p h_c}{2s} \cdot (\operatorname{tg} \beta - f \cdot \cos \alpha) \right] \right\}}{\left[1.0 - \frac{K_p h_c}{2s} (\operatorname{tg} \beta - f \cdot \cos \alpha) \right]}}, \text{ м/с} \quad (4.5)$$

при отсутствии возвышения наружного рельса ($h=0$)

$$V_{\tilde{n}\tilde{o}} = \sqrt{\frac{gR}{n} \cdot \frac{K_p (\operatorname{tg} \beta - f \cdot \cos \alpha)}{\left[1.0 - \frac{K_p h_c}{2s} (\operatorname{tg} \beta - f \cdot \cos \alpha) \right]}}, \text{ м/с.} \quad (4.6)$$

Требуется определить, при каких значениях h_c и K_p скорость схода становится положительной, (т.е. действительной). Необходимо сделать анализ подкоренного

выражения и при $1.0 - \frac{K_p h_c}{2s} (\operatorname{tg} \beta - f \cdot \cos \alpha) \geq 0$ скорость схода будет

действительной.

Далее

$$Y_i = (C - C') + \hat{E}_\delta \cdot \dot{I} \cdot f \cdot \cos \alpha + \hat{E}_\delta \cdot (\tilde{N} - \tilde{N}') \cdot \frac{h_c}{2s} \cdot f \cdot \cos \alpha \quad (4.7).$$

После подстановки и необходимых преобразований получим:

при наличии возвышения наружного рельса ($h \neq 0$)

$$Y_i \geq \frac{m \dot{Y}}{2} \left\{ \frac{V^2}{R} \left(1.0 + K_p \cdot \frac{h_c}{2s} \cdot f \cdot \cos \alpha \right) + \frac{g}{n} \left[\left(K_p \cdot f \cdot \cos \alpha \right) - \frac{h}{s} \left(1.0 + K_p \cdot \frac{h_c}{2s} \cdot f \cdot \cos \alpha \right) \right] \right\}, \text{ кН} \quad (4.8)$$

при отсутствии возвышения наружного рельса ($h=0$)

$$Y_i \geq \frac{m_Y}{2} \left\{ \frac{V^2}{R} \left(1.0 + K_p \cdot \frac{h_c}{2s} \cdot f \cdot \cos \alpha \right) + \frac{K_p \cdot g}{n} \cdot f \cdot \cos \alpha \right\}, \text{ кН} \quad (4.9).$$

Требуется построить графическую зависимость $Y_i = f(V)$ и определить Y_i при $V_{\tilde{n}\tilde{o}\hat{a}}$ и $V_{\tilde{n}\tilde{o}}$.

Программа выполнения работы:

1. Составить программу для численного расчета в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
2. Построить графические зависимости $Y_H = f(V)$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(\hat{A})$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(\hat{E}_D)$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(R)$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(h_c)$ при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
3. Определить, при каких значениях h_c и K_p скорость схода $V_{\tilde{N}\tilde{O}}$ становится положительной, (т.е. действительной) при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
4. Определить направляющее усилие Y_H при $V_{cx\hat{e}}$ и V_{cx} при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).

Содержание отчета

1. Расчетные схемы и уравнения с подробными комментариями.
2. Графические зависимости: $Y_H = f(V)$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(\hat{A})$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(\hat{E}_D)$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(R)$, $V_{\tilde{N}\tilde{O}} = f(h_c)$ при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
3. Расчетные значения h_c и K_p , при которых скорость схода $V_{\tilde{N}\tilde{O}}$ становится положительной, (т.е. действительной) при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
4. Расчетное значение направляющего усилия Y_H при $V_{cx\hat{e}}$ и V_{cx} при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
5. Текст программы для расчетов в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
6. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Что характеризует коэффициент разгрузки K_P ?
2. Как влияет коэффициент разгрузки K_P на условия схода экипажа с рельсов ?
3. Поясните физическую природу силы N_Z и причину появления силы T_Z и её направление ?
4. Как влияет высота центра тяжести экипажа на условия схода экипажа с рельсов ?
5. Поясните влияние радиуса кривой на условия схода экипажа с рельсов.
6. Поясните влияние базы на условия схода экипажа с рельсов.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ НАЧАЛА ХОРДОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭКИПАЖА В КРИВОЙ

Цель практической работы: определение скорости начала хордового положения экипажа в кривой.

Условия: экипаж уже занял в кривой хордовое положение, но направляющее усилие на последнюю (заднюю) колёсную пару ещё отсутствует ($Y_{H2} = 0$). Схемы положения экипажа и действующие на последнюю (по ходу движения) колёсную пару силы представлены на рисунке 5.1.

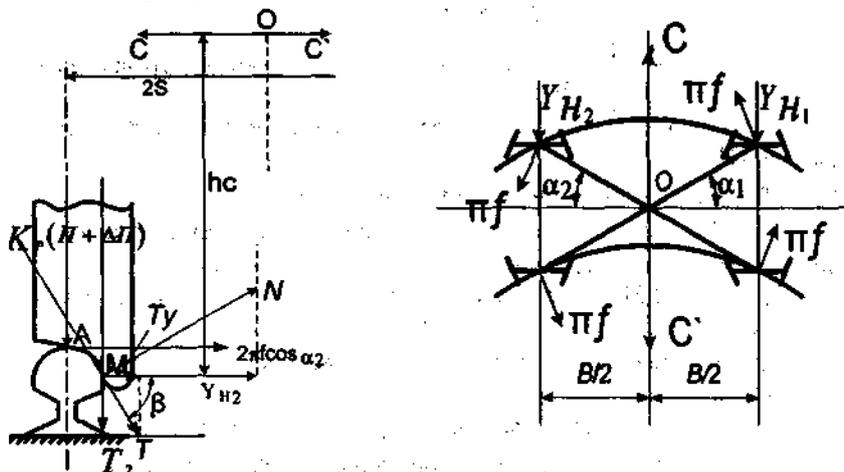


Рисунок 5.1. Схемы положения экипажа и действующие на последнюю (по ходу движения) колёсную пару силы.

В симметричных экипажах $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, соответственно:

$$\cos \alpha = \frac{B}{\sqrt{B^2 + 4s_1}} \quad (5.1).$$

Для заднего (сбегающего) колеса уравнение равенства суммы сил приобретает вид:

$$Y_2 + 2\Pi \cdot f \cdot \cos \alpha - (C - C') + T_y = 0 \quad (5.2).$$

Учитывая, что

$$2\Pi = \frac{m_{\text{э}} \cdot g}{n}, \text{ кН} \quad (5.3),$$

где $m_{\text{э}} = (m + M) \cdot 2$ - масса экипажа, приходящаяся на одну тележку, т;

n - число колёсных пар тележки;

$g = 9,81$ - ускорение свободного падения, м/с².

$C = \frac{m_{\text{э}} \cdot V^2}{2R}$ - отнесенная к задней оси центробежная сила, действующая на экипаж, кН,

где V - скорость движения экипажа, м/с;

R - средний радиус кривой, м.

$\tilde{N}' = \frac{m_{\text{э}} \cdot g}{n} \cdot \frac{h_{\hat{a}}}{2s_1}$ - составляющая веса экипажа, уравнивающая часть

центробежной силы C , обусловленная возвышением наружного рельса, кН,

где $h_{\hat{a}}$ - возвышение наружного рельса, м.

$2s_1 = 2s + e$ расстояние между кругами катания колёс с учётом уширения колеи в кривой,

где $2s = 1.58$ - расстояние между кругами катания колёс в прямых участках пути;

e - уширение рельсовой колеи в кривой, зависящее от её среднего радиуса, м.

$T_y = \mu \cdot Y_{i2} \cdot \tilde{n} \operatorname{tg} \beta$ - горизонтальная составляющая силы трения T ,

где $\beta = 65^\circ$ - угол наклона образующей гребня бандажа к горизонту в точке M ;

$\mu = 0,25$ - коэффициенты трения бандажа о поверхность головки рельса в точке M .

$f = 0,25$ - коэффициенты трения бандажа о поверхность головки рельса в точке A .

В работе принять $\operatorname{ctg} \beta = 0,466$.

Подстановка значений указанных величин в уравнение равновесия сил после несложных преобразований позволяет получить следующие выражения для определения направляющего усилия Y_{H2} .

Без учёта возвышения наружного рельса ($h = 0$):

$$Y_{i2} \geq \frac{m_{\text{э}}}{1 + \mu \cdot \tilde{n} \operatorname{tg} \beta} \left\{ \frac{V^2}{2R} - \frac{B \cdot g \cdot f}{n \cdot \sqrt{B^2 + 4s_1^2}} \right\}, \text{ кН} \quad (5.4).$$

С учётом возвышения наружного рельса ($h \neq 0$):

$$Y_{i2B} \geq \frac{m_{\text{э}}}{1 + \mu \cdot \tilde{n} \operatorname{tg} \beta} \left\{ \frac{V^2}{2R} - \frac{g}{n} \left(\frac{B \cdot f}{\sqrt{B^2 + 4s_1^2}} + \frac{h_B}{2s_1} \right) \right\}, \text{ кН} \quad (5.5).$$

Нетрудно видеть, что $Y_2 = 0$ (начало хордового положения) при:

$$V_{\min.xi} = \sqrt{\frac{2R \cdot g}{n} \cdot f \cdot \frac{B \cdot f}{\sqrt{B^2 + 4s_1^2}}}, \text{ м/с} \quad (5.6);$$

$$V_{min.xi} = \sqrt{\frac{2R \cdot g}{n} \cdot \left(\frac{B \cdot f}{\sqrt{B^2 + 4s_1^2}} + \frac{h_B}{2s_1} \right)}, \text{ м/с} \quad (5.7).$$

При всех $V > V_{min.xi}$ экипаж будет занимать в кривой заданного радиуса хордовое положение.

По результатам расчётов строятся графические зависимости $V_{min}(B)$ для разных значений R и $V_{min}(R)$ при разных значениях h_e (от $h = 0$ до $h = 0,15$).

Программа выполнения работы:

1. Составить программу для численного расчета в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
2. Построить графические зависимости $V_{min}(\hat{A})$ для разных значений R и $V_{min}(R)$ при разных значениях h_e (от $h = 0$ до $h = 0,15$).
3. Определить направляющее усилие Y_H при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
4. Определить скорость начала хордового положения экипажа в кривой $V_{min} \delta i$ при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).

Содержание отчета

1. Расчетные схемы и уравнения с подробными комментариями.
2. Графические зависимости $V_{min}(\hat{A})$ для разных значений R и $V_{min}(R)$ при разных значениях h_e (от $h = 0$ до $h = 0,15$).
3. Расчетное значение направляющего усилия Y_H при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
4. Расчетное значение скорости начала хордового положения экипажа в кривой $V_{min} \delta i$ при наличии возвышения внешнего рельса ($h \neq 0$) и при отсутствии возвышения внешнего рельса ($h = 0$).
5. Текст программы для расчетов в среде *Mathcad 12* (см. приложение 1), исходные данные для расчетных исследований принять в соответствии с данными таблицы 1 (приложение 2) и номером варианта.
6. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Какое положение экипажа в кривой называется хордовым ?
2. Для чего делается уширение рельсовой колеи в кривой и от чего зависит его величина ?
3. При каких основных допущениях определяется минимальная скорость начала хордового положения ?
4. Как влияет возвышение внешнего рельса в кривой на величину направляющего усилия ?
5. Какое положение экипажа в кривой называется наибольшим перекосом ?
6. Поясните, как определяется направление силы T ?

Список использованной литературы:
Основная литература:

1. Механическая часть тягового подвижного состава./ Под ред. И.С. Бирюкова, А. Н. Савоськина и др. М.: Транспорт, 1992.- 440 с.
2. Руководство по эксплуатации вагонов метрополитена моделей 81-714,5 и 81-717,5./ Акционерное общество «Метровагонмаш».-М.:Транспорт, 1983.- 447 с.
3. С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, Н. И. Челноков. Динамика вагонов: Учебник. М.: Транспорт, 1991.- 352 с.
4. В. В. Лукин, П. С. Анисимов, Ю. П. Федосеев. Вагоны. Общий курс: Учебник для вузов ж.-д. трансп./ Под ред. В.В.Лукина. – М.: Маршрут, 2004.-424 с.
5. Бирюков И.В. Механическая часть тягового подвижного состава.- М.: Транспорт, 1992.-396 с.

**Литература, разработанная преподавателями кафедры
«Городской и промышленный электрический транспорт»
ТашИИТ:**

1. Динамика ва ЭТЦТ чидамлигини ошириш усуллари. // Аспирантлар ва магистрантлар учун маърузалар матни. – Муалифлар: Г. А. Хромова, Ш. С. Файзибаев, С. А. Хромов. Препринт, ТашИИТ, 2004. – 47 с.
2. Динамика и способы повышения прочности ПС ЭТ. // Курс лекций для аспирантов и магистрантов. Конспект составили Г. А. Хромова, Ш. С. Файзибаев, С. А. Хромов. Препринт, ТашИИТ, 2004. – 48 с.
3. Системы автоматизированного проектирования электрического оборудования на электроподвижном составе. Методические указания по выполнению курсового проекта для магистрантов-электромехаников. // Составили: Г. А. Хромова, И.К Байгузин. Препринт, ТашИИТ, 2007. – 27 с.
4. САПР для ПС ЭТ. Конспект лекций для магистрантов-электромехаников. // Конспект составили: Г. А. Хромова, И. К. Байгузин. Препринт, ТашИИТ, 2004. – 69 с.

Дополнительная литература:

1. И. И. Челноков. Гидравлические гасители колебаний пассажирских метрополитен вагон (трамвай)ов. М.: Транспорт, 1975.- 73 с.
2. Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. Численные методы: Учеб. пособие. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.- 600 с.
- 3 М. Херхагер, Х. Партолль. Mathcad 2000. Полное руководство. Перевод с немецкого под ред. К.Ю. Королькова. ВНУ, Киев, 2000.- 400 с.
4. Е. А. Волков. Численные методы. М.: Наука, 1982.- 352с.
5. В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. Матрицы и вычисления. – М.: Наука, 1984-532 с.
6. Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л Мирощниченко. Методы сплайн – функций.- М.: Наука, 1980.- 515 с.
7. Ч. Лоусон, Р. Хентон. Численное решение задач метода наименьших квадратов.- М.: Наука, 1986.- 354 с.
8. И. Вирт. Алгоритм + структуры данных = программы. Пер. с англ., М.: Мир, 1985.-406 с.

9. В. П. Когаев. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. - М.: Машиностроение, 1977.-232 с.

10. В. П. Дьяконов. Энциклопедия Mathcad 2001i и Mathcad 11.- М.: Солон-Пресс, 2004. – 832 с.

11. Е. Г. Макаров. Инженерные расчеты в Mathcad. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2003.- 448 с.

Интернет-сайты:

1. **ЖДМ**-online • Информационная служба журнала **<Железные дороги мира>** - [www. GDM-online.ru](http://www.GDM-online.ru)

2. WESSEX INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Англия – Кембридж ,UK) www.wessex.ac.uk

3. Московский институт инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ) - [www. miiit-inf.ru](http://www.miiit-inf.ru)

4. Российский государственный открытый технический университет путей сообщения (РГОТУПС) - [www. rgotupc.ru](http://www.rgotupc.ru)

5. Сан-Петербургский Университет инженеров путей сообщения (СПУПС – ЛИИЖТ) - [www. liigt-inf.ru](http://www.liigt-inf.ru)

Образец программы для выполнения практических работ по курсу "Основы моделирования динамики подвижного состава электрического транспорта" (программы для среды MathCad 12)

1. Исходные данные для численного динамического расчета и алгоритм для численного моделирования системы (The Algorithm for numerical modelling)

Таблица исходных данных

Максимальная скорость движения экипажа (вагона метрополитена):

$V_{max} := 110 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$V := \frac{V_{max}}{3.6} \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$V = 30.556 \frac{\text{м}}{\text{с}}$	
$h_{\text{н}} := 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$			глубина неровности участка рельсового пути, варьируется от 1 мм до 4 мм
$L_{\text{н}} := 1 \text{ м}$			длина стыковой неровности (таблица 1)
$\omega := 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L_{\text{н}}}$	$V = 30.556 \frac{\text{м}}{\text{с}}$		при скорости движения экипажа
$\omega = 19.199 \frac{1}{\text{с}}$			круговая частота вынужденных колебаний , 1/с
$M := 21.5 \text{ т}$			масса подрессоренных частей, т
$m := 4 \text{ т}$			масса неподрессоренных частей, т
$G_t := 8.1 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$			жесткость рессорного подвешивания тележки на одну колесную пару, кН/м

Характеристики рельсового пути при движении экипажа летом:

$m_p := 310 \text{ кг}$	$G_p := 45 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$		жесткость рельсового пути, участвующая в совместных колебаниях экипажа
$\beta_p := 0.237 \cdot 10^6 \frac{1 \cdot \text{с}}{\text{м}}$			

Характеристики рельсового пути при движении экипажа зимой:

$m_{p1} := 650 \text{ кг}$	$G_{p1} := 77 \cdot 10^3 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$	$\beta_{p1} := 0.374 \cdot 10^6 \frac{1 \cdot \text{с}}{\text{м}}$	
$\alpha := \frac{2 \cdot G_t \cdot G_p}{2G_t + G_p}$			жесткость рессорного подвешивания, отнесенная к одной оси (летом) , кН/м

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 1.191 \times 10^4 & \frac{\varepsilon \dot{f}}{\dot{f}} \quad \varepsilon_1 &:= \frac{2 \cdot Gt \cdot Gp1}{2Gt + Gp1} & \text{жесткость рессорного подвешивания} \\ \varepsilon_1 &= 1.62 \times 10^4 & & & \text{(зимой), кН/м} \end{aligned}$$

1 задача. Оценка влияния рессорного подвешивания на вертикальную динамику экипажа

1.1. Расчет максимальных вертикальных перемещений центра тяжести неподдресоренной массы M (экипаж с рессорным подвешиванием), м

$$k := \sqrt{\frac{\varepsilon}{M}} \quad \frac{1}{\tilde{n}} \quad k = 23.538 \quad \frac{1}{\tilde{n}} \quad \text{круговая частота свободных колебаний}$$

$$k1 := \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{M}} \quad k1 = 27.447 \quad \frac{1}{\tilde{n}}$$

$$T := \frac{1}{k} \quad T = 0.042 \quad \tilde{n} \quad \text{период свободных колебаний экипажа}$$

$$t := 0, \frac{T}{20} .. 20 \cdot T \quad \tilde{n} \quad \text{изменение цикла по времени принято от 0 до 2 T}$$

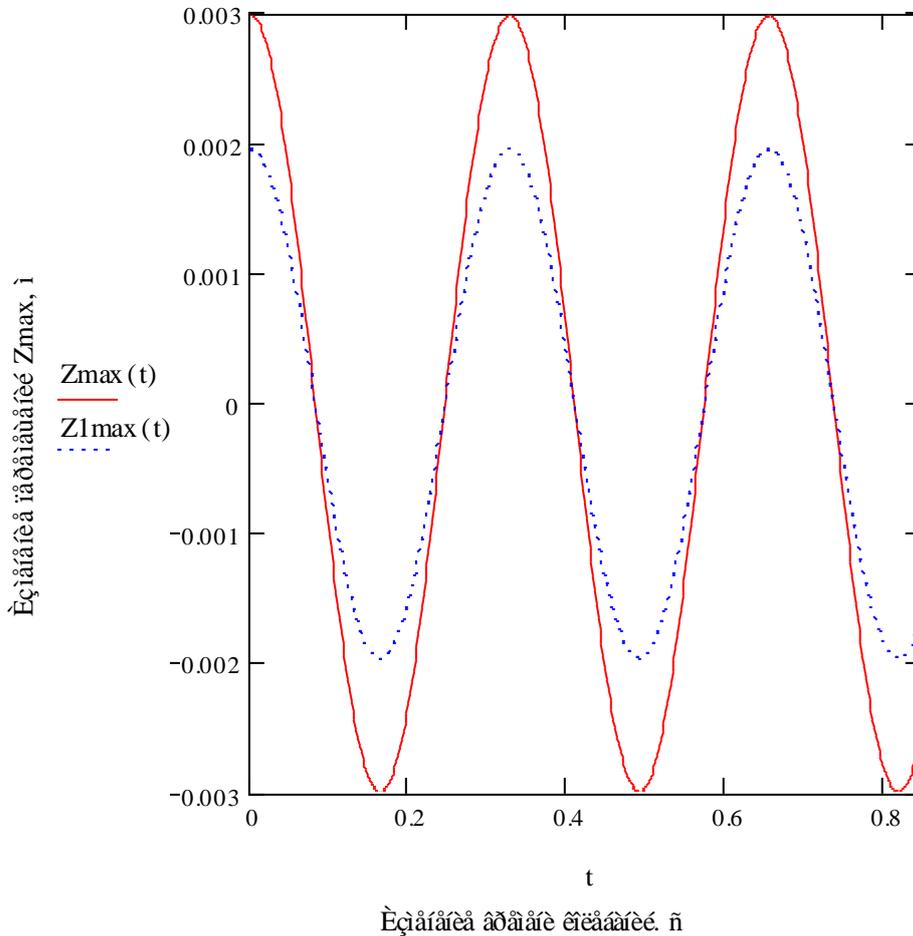
$$20 \cdot T = 0.85 \quad \text{с}$$

$$Z_{\max}(t) := \frac{k^2 \cdot h \cdot \delta \cdot \cos(\omega \cdot t)}{2 \cdot (k^2 - \omega^2)} \quad \text{м} \quad \text{изменение координаты вертикальных перемещений центра тяжести подрессоренной массы M (колебания летом), м}$$

$$Z1_{\max}(t) := \frac{k1^2 \cdot h \cdot \delta \cdot \cos(\omega \cdot t)}{2 \cdot (k1^2 - \omega^2)} \quad \text{колебания экипажа зимой}$$

5t =	Z _{max} (5t) =	Z1 _{max} (5t) =
0	2.988·10 ⁻³	1.958·10 ⁻³
0.011	2.926·10 ⁻³	1.917·10 ⁻³
0.021	2.743·10 ⁻³	1.797·10 ⁻³
0.032	2.446·10 ⁻³	1.603·10 ⁻³
0.042	2.048·10 ⁻³	1.342·10 ⁻³
0.053	1.565·10 ⁻³	1.025·10 ⁻³
0.064	1.017·10 ⁻³	6.665·10 ⁻⁴
0.074	4.27·10 ⁻⁴	2.799·10 ⁻⁴
0.085	-1.806·10 ⁻⁴	-1.184·10 ⁻⁴
0.096	-7.808·10 ⁻⁴	-5.117·10 ⁻⁴
0.106	-1.349·10 ⁻³	-8.838·10 ⁻⁴
0.117	-1.86·10 ⁻³	-1.219·10 ⁻³
0.127	-2.295·10 ⁻³	-1.504·10 ⁻³
0.138	-2.635·10 ⁻³	-1.727·10 ⁻³
0.149	-2.865·10 ⁻³	-1.878·10 ⁻³
0.159	-2.977·10 ⁻³	-1.951·10 ⁻³

График изменения максимальных вертикальных перемещений центра тяжести нерессоренной массы М (экипаж с рессорным подвешиванием) при движении его по рельсовому пути (летом и зимой)



1.2. Расчет силы динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при движении с различными скоростями по рельсовому пути со стыковыми неровностями , кН

$(M + m) = 25.5$ δ масса экипажа, отнесенная к одной оси, т

$P1_{din}(t) := 2 \cdot (M + m) \cdot h_{íáð} \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t)$ экипаж без рессорного подвешивания

$$p1 := \frac{m \cdot h_{íáð} \cdot \omega^2}{2 \cdot \varepsilon} \qquad p2 := \frac{-h_{íáð}}{2} \qquad p3 := \frac{k^2 \cdot h_{íáð}}{2 \cdot (k^2 - \omega^2)}$$

$$P2_{din}(t) := [\alpha \cdot (p1 + p2 + p3)] \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

экипаж с рессорным
подвешиванием

$$p11 := \frac{m \cdot \dot{h} \cdot \ddot{\delta} \cdot \omega^2}{2 \cdot \alpha 1} \quad p22 := \frac{-\dot{h} \cdot \ddot{\delta}}{2} \quad p33 := \frac{k1^2 \cdot \dot{h} \cdot \ddot{\delta}}{2 \cdot (k1^2 - \omega^2)}$$

$$p1 = 1.238 \times 10^{-4} \quad p11 = 9.103 \times 10^{-5} \quad p2 = -1 \times 10^{-3}$$

$$p22 = -1 \times 10^{-3} \quad p3 = 2.988 \times 10^{-3} \quad p33 = 1.958 \times 10^{-3}$$

$$P3_{din}(t) := [\alpha 1 \cdot (p11 + p22 + p33)] \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

График изменения сил динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при его движении при изменении времени (с рессорным подвешиванием и без него, для зимних и летних условий)

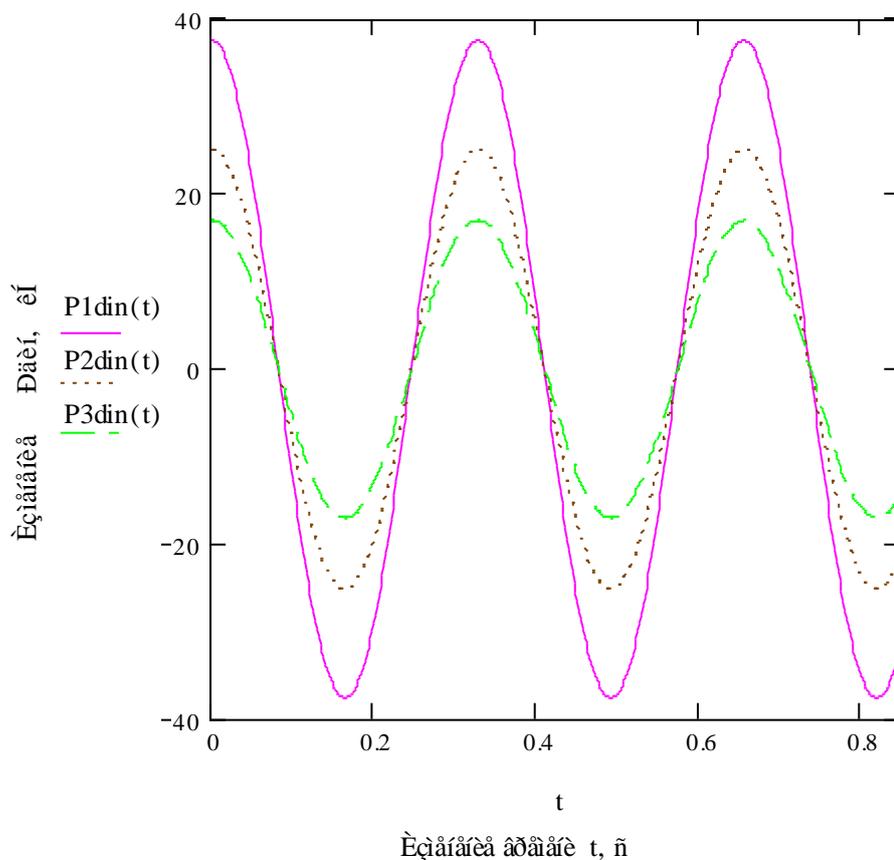


Таблица 1.1. - Расчет сил динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при изменении времени колебаний (сравнительный анализ для лета и зимы), кН

5t =	P1din(5t) =	P2din(5t) =	P3din(5t) =
0	37.596	25.15	16.991
0.011	36.817	24.628	16.639
0.021	34.513	23.087	15.597
0.032	30.778	20.589	13.91
0.042	25.768	17.237	11.645
0.053	19.691	13.172	8.899
0.064	12.797	8.561	5.783
0.074	5.373	3.595	2.428
0.085	-2.273	-1.52	-1.027
0.096	-9.825	-6.572	-4.44
0.106	-16.97	-11.352	-7.669
0.117	-23.412	-15.661	-10.581
0.127	-28.884	-19.322	-13.054
0.138	-33.159	-22.181	-14.986
0.149	-36.06	-24.122	-16.297
0.159	-37.467	-25.063	-16.932

Изменение скорости движения экипажа V: от 0 до 150 км/час :

$$V1 := 0,5 \cdot t \quad \frac{1}{\tilde{n}} \quad \omega1(V1) := 2 \cdot \pi \cdot \frac{V1}{L1 \cdot \tilde{\omega}} \quad \frac{1}{c}$$

$$P11din(V1) := 2 \cdot (M \cdot \tilde{m}) \cdot \tilde{h} \cdot \omega1(V1)^2$$

$$p1v(V1) := \frac{m \cdot \tilde{h} \cdot \omega1(V1)^2}{2 \cdot \tilde{\omega}} \quad p2v := \frac{-\tilde{h} \cdot \tilde{\omega}}{2}$$

$$p3v(V1) := \frac{k^2 \cdot \tilde{h} \cdot \omega1(V1)^2}{2 \cdot (k^2 - \omega1(V1)^2)} \quad \frac{150}{3.6} = 41.667$$

$$P22din(V1) := [\tilde{\omega} \cdot (p1v(V1) + p2v + p3v(V1))]$$

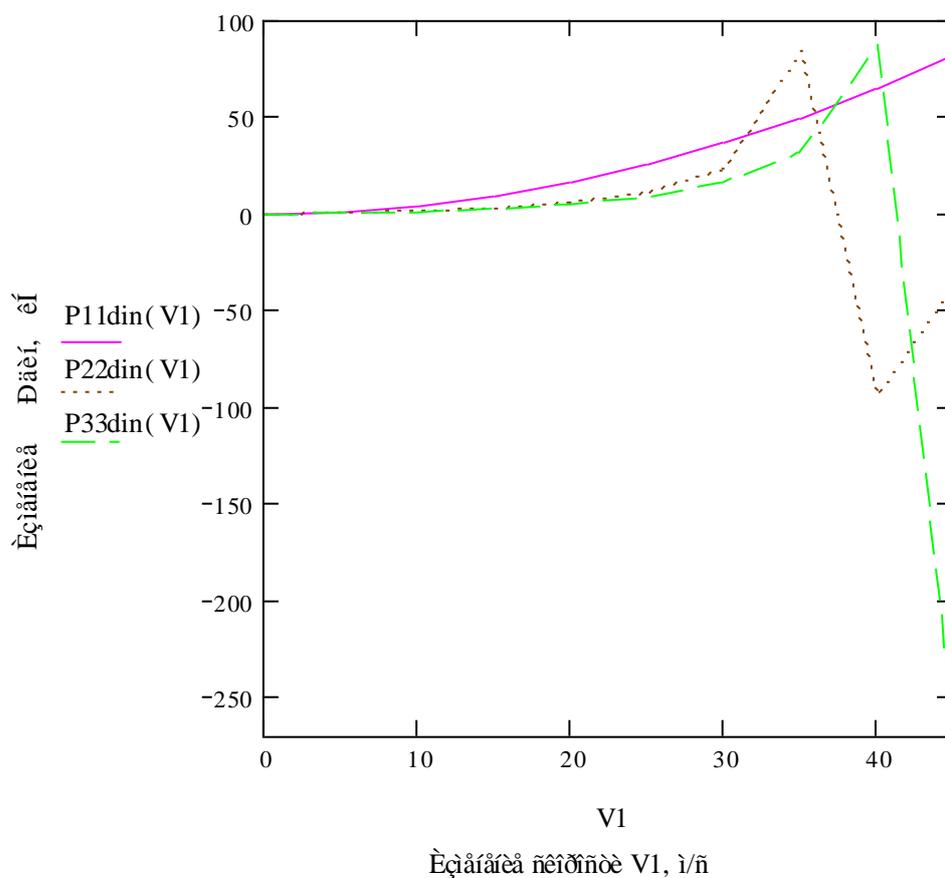
$$p11v(V1) := \frac{m \cdot \tilde{h} \cdot \omega1(V1)^2}{2 \cdot \tilde{\omega}1} \quad p33v(V1) := \frac{k1^2 \cdot \tilde{h} \cdot \omega1(V1)^2}{2 \cdot (k1^2 - \omega1(V1)^2)}$$

$$P33din(V1) := [\tilde{\omega}1 \cdot (p11v(V1) + p2v + p33v(V1))]$$

Таблица 1.2. - Расчет сил динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при движении с различными скоростями по рельсовому пути со стыковыми неровностями (сравнительный анализ для лета и зимы), кН

V1 =	P11din(V1) :	P22din(V1) =	P33din(V1) =
0	0	0	0
5	1.007	0.256	0.254
10	4.027	1.072	1.054
15	9.06	2.63	2.52
20	16.107	5.38	4.927
25	25.167	10.551	8.876
30	36.241	22.718	15.879
35	49.328	83.733	30.975
40	64.429	-94.41	86.608
45	81.543	-35.607	-277.624

График изменения сил динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при его движении при изменении скорости (с рессорным подвешиванием и без него, для зимних и летних условий)



1.3. Сила динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при движении с различными скоростями по рельсовому пути со стыковыми неровностями (с рессорным подвешиванием и без него), кН

$$V_k := \frac{90}{3.6} \cdot \frac{1}{\tilde{n}} \quad \text{конструкционная скорость принята равной 90 км/час}$$

$$L_{\text{н}} := 0.1, 5..45 \quad \text{изменение длины стыковой неровности}$$

$$\omega(L_{\text{н}}) := 2 \cdot \pi \cdot \frac{V_k}{L_{\text{н}}} \cdot \frac{1}{\tilde{n}}$$

$$P_{1\text{din}}(L_{\text{н}}) := 2 \cdot (M + m) \cdot h_{\text{н}} \cdot \omega(L_{\text{н}})^2 \quad \text{экипаж без рессорного подвешивания}$$

$$p_{1\text{н}}(L_{\text{н}}) := \frac{m \cdot h_{\text{н}} \cdot \omega(L_{\text{н}})^2}{2 \cdot \varepsilon} \quad p_{2\text{н}} := \frac{-h_{\text{н}}}{2}$$

$$p_{3\text{н}}(L_{\text{н}}) := \frac{k^2 \cdot h_{\text{н}}}{2 \cdot (k^2 - \omega(L_{\text{н}})^2)}$$

$$P_{2\text{din}}(L_{\text{н}}) := [\varepsilon \cdot (p_{1\text{н}}(L_{\text{н}}) + p_{2\text{н}} + p_{3\text{н}}(L_{\text{н}}))] \quad \text{экипаж с рессорным подвешиванием}$$

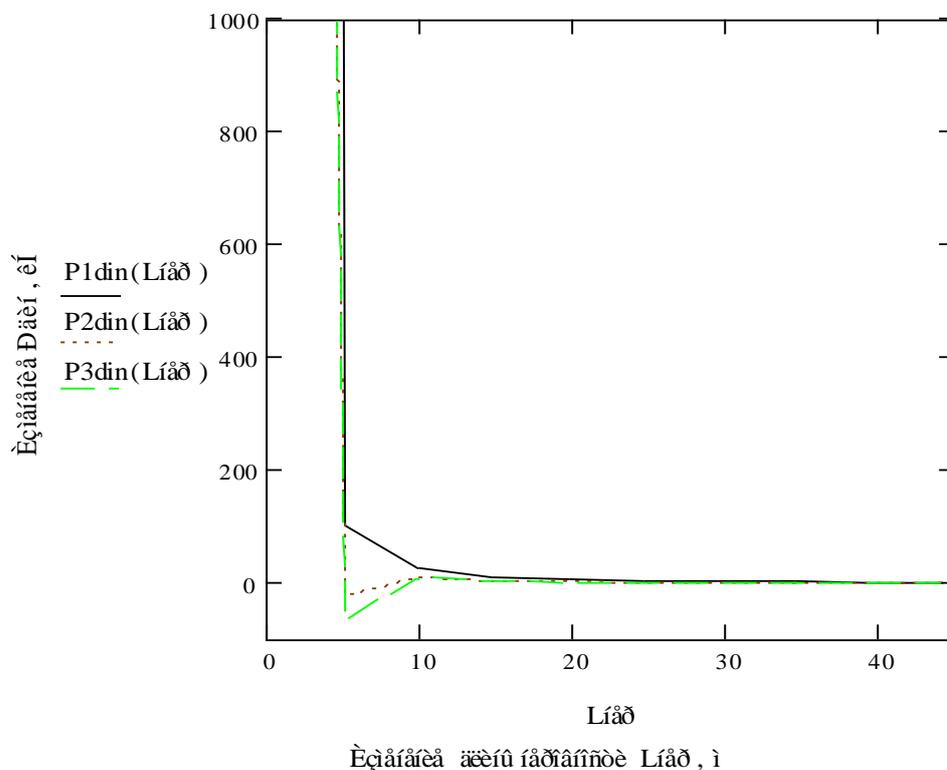
$$p_{11\text{н}}(L_{\text{н}}) := \frac{m \cdot h_{\text{н}} \cdot \omega(L_{\text{н}})^2}{2 \cdot \varepsilon_1} \quad p_{33\text{н}}(L_{\text{н}}) := \frac{k_1^2 \cdot h_{\text{н}}}{2 \cdot (k_1^2 - \omega(L_{\text{н}})^2)}$$

$$P_{3\text{din}}(L_{\text{н}}) := [\varepsilon_1 \cdot (p_{11\text{н}}(L_{\text{н}}) + p_{2\text{н}} + p_{33\text{н}}(L_{\text{н}}))]$$

Таблица 1.3. Таблица изменения динамических смещений экипажа от ударных воздействий при его движении во времени с различной неровностью рельсового пути (с учетом системы рессорного подвешивания и без нее, для условий лета и зимы)

$L_{\text{н}}$	$\omega(L_{\text{н}})$	$P_{1\text{din}}(L_{\text{н}})$	$P_{2\text{din}}(L_{\text{н}})$	$P_{3\text{din}}(L_{\text{н}})$
0.1	$1.571 \cdot 10^3$	$2.517 \cdot 10^5$	$9.858 \cdot 10^3$	$9.853 \cdot 10^3$
5	31.416	100.67	-23.208	-64.474
9.9	15.867	25.678	10.927	9.136
14.8	10.613	11.49	3.491	3.298
19.7	7.974	6.485	1.798	1.747
24.6	6.385	4.159	1.109	1.09
29.5	5.325	2.892	0.756	0.747
34.4	4.566	2.127	0.549	0.544
39.3	3.997	1.63	0.418	0.415
44.2	3.554	1.288	0.328	0.327

График изменения динамических смещений экипажа от ударных воздействий при его движении во времени с различной неровностью рельсового пути (с учетом системы рессорного подвешивания и без нее, для условий лета и зимы)



1.4. Расчет критической (резонансной) скорости

$Líãð := 10$ м согласно таблице 1

$$Vêðèð := 0.573Líãð \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{M}} \quad Vêðèð = 134.873 \quad \frac{ì}{c}$$

1.5. Расчет коэффициента сопротивления гидравлического гасителя колебаний

$H := \frac{híãð}{2}$ максимальное значение возмущающей силы, кН

$H = 11.912$ кН $k := \sqrt{\frac{\varepsilon}{M}}$ частота свободных колебаний

$kää := 0.3$ варьируется от 0.3 до 0.35 [1] $k = 23.538$ $\frac{1}{c}$

квд - коэффициент вертикальной динамики по амплитуде

$Z_{\text{н0}} := 0.11$ и статический прогиб рессорного подвешивания равен 110 мм (таблица 1)

$$z := k_{\text{аа}} \cdot Z_{\text{н0}} \quad z = 0.039 \quad \text{и} \quad k_1 := \sqrt{\frac{\text{а1}}{M}} \quad k_1 = 27.447$$

$\beta := \frac{H}{k \cdot z}$ коэффициент сопротивления гидравлического гасителя колебаний, кН*с/м

$$\beta = 13.145 \quad \frac{\text{е1} \cdot \text{н}}{\text{и}} \quad Z_1 := \frac{\text{н1а0}}{2} - k_{\text{аа}} \cdot Z_{\text{н0}}$$

$$\beta_{1\text{max}} := \frac{\text{а}}{k} \cdot \frac{k_{\text{аа}} \cdot Z_{\text{н0}} - \frac{\text{н1а0}}{2}}{k_{\text{аа}} \cdot Z_{\text{н0}}} \quad \frac{\text{е1} \cdot \text{н}}{\text{и}} \quad \beta_{1\text{max}} = 492.922 \quad \frac{\text{е1} \cdot \text{н}}{\text{и}}$$

$$\beta_{2\text{max}} := \frac{\text{а1}}{k_1} \cdot \frac{k_{\text{аа}} \cdot Z_{\text{н0}} - \frac{\text{н1а0}}{2}}{k_{\text{аа}} \cdot Z_{\text{н0}}} \quad \frac{\text{е1} \cdot \text{н}}{\text{и}} \quad \beta_{2\text{max}} = 574.78 \quad \frac{\text{е1} \cdot \text{н}}{\text{и}}$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot \frac{V}{L_{\text{а0}}} \quad V = 30.556 \quad \frac{\text{и}}{\text{н}} \quad \text{при скорости движения экипажа}$$

$$\omega = 19.199 \quad \frac{1}{\text{н}} \quad \text{круговая частота вынужденных колебаний, 1/с}$$

$$P_{\text{dinmax1}} := \sqrt{\left[\text{а} \cdot \left(k_{\text{аа}} \cdot Z_{\text{н0}} - \frac{\text{н1а0}}{2} \right) + m \cdot \omega^2 \cdot \frac{\text{н1а0}}{2} \right]^2 + \beta_{1\text{max}} \cdot \omega \cdot Z_1^2} \quad \text{е1}$$

$$P_{\text{dinmax1}} = 448.18 \quad \text{е1} \quad \text{и0е} \quad Z_1 = -0.038 \quad \text{и} \quad \text{еа0н}$$

$$P_{\text{dinmax2}} := \sqrt{\left[\text{а1} \cdot \left(k_{\text{аа}} \cdot Z_{\text{н0}} - \frac{\text{н1а0}}{2} \right) + m \cdot \omega^2 \cdot \frac{\text{н1а0}}{2} \right]^2 + \beta_{2\text{max}} \cdot \omega \cdot Z_1^2} \quad \text{е1}$$

$$P_{\text{dinmax2}} = 608.859 \quad \text{е1} \quad \text{и0е} \quad Z_1 = -0.038 \quad \text{и} \quad \text{е0и0е}$$

1.6. Определение силы динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при его движении в РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ ПРИ $V_{\text{крит}}$.

$V_{\text{е0е0}} = 134.873$ $\frac{\text{и}}{\text{н}}$ критическая (резонансная) скорость движения экипажа

$\nu := 0.1, 0.2.. 20$ 0аа циклическая частота колебаний, рад

$$\omega_{\text{е0е0}} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{V_{\text{е0е0}}}{L_{\text{а0}}} \quad \frac{1}{\text{н}} \quad L_{\text{а0}} = 10 \quad \text{и} \quad t(\nu) := \frac{\nu}{\omega_{\text{е0е0}}}$$

$$P1dinmax(v) := \frac{2}{9.81} \cdot (M + m) \cdot h \cdot \omega^2 \cdot \left(\frac{v}{t(v)} \right)^2 \cdot \sin$$

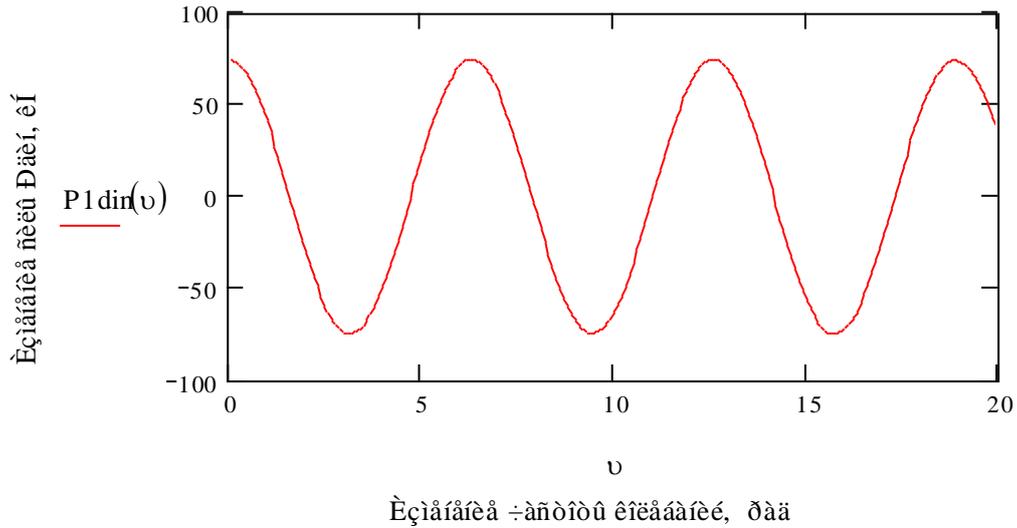
$$\omega^2 = 84.743$$

$$P1din(v) := P1dinmax(v) \cdot \cos(v) \cdot \sin$$

Таблица 1.4. Изменение силы динамического вертикального воздействия одноосного экипажа при его движении в РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ ПРИ V крит.

15v =	t(15v) =	P1dinmax(v)	P1din(15v) =
1.5	0.018	74.669	5.282
3	0.035	74.669	-73.921
4.5	0.053	74.669	-15.74
6	0.071	74.669	71.695
7.5	0.089	74.669	25.883
9	0.106	74.669	-68.033
10.5	0.124	74.669	-35.508
12	0.142	74.669	63.009
13.5	0.159	74.669	44.422
15	0.177	74.669	-56.725
16.5	0.195	74.669	-52.447
18	0.212	74.669	49.305
19.5	0.23	74.669	59.422
21	0.248	74.669	-40.898
22.5	0.266	74.669	-65.208
24	0.283	74.669	31.673

График изменения силы динамического вертикального воздействия одноосного экипажа (без рессорного подвешивания) при его движении в РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ при V крит.



Приложение 2.

Таблица 1 исходных данных по вариантам

Максимальная скорость движения V_{max} , км/ч									90	95	100	105	110	120	160	130	140	150
Коэффициент вертикальной динамики $K_{ВД}$									0,3	0,31	0,32	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35
Коэффициент разгрузки K_p									1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
Высота центра тяжести h_c , м									0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,0	1,5	1,6	1,5	1,7
R , M	h_B , M	m, T	M , T	n	B, m	$L_{нер}$, M	$h_{нер}$, M	H , M	Номера вариантов									
150	0,1	3,0	22,0	2	2,8	12,5	0,01	5,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
150	0,1	3,2	22,0	2	2,85	12,5	0,02	6,0	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
200	0,1	3,5	22,5	2	2,8	12,5	0,03	6,5	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
200	0,12	3,5	22,5	2	2,85	10,0	0,01	7,0	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
250	0,12	4,0	21,5	2	2,6	10,0	0,02	5,5	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
300	0,12	4,5	21,5	3	3,0	10,0	0,03	6,0	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
400	0,15	5,0	21,0	3	3,0	6,0	0,04	6,5	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
500	0,15	5,0	20,5	3	3,0	6,0	0,01	7,0	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
600	0,15	6,0	14,0	3	3,2	25,0	0,05	5,5	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	4
1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕССОРНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ ДИНАМИКУ ЭКИПАЖА.....	4
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ НАЧАЛА ОПРОКИДЫВАНИЯ ЭКИПАЖА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ В КРИВОЙ.....	11
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СХОДА ЭКИПАЖА С РЕЛЬСОВ ИЗ-ЗА БОКОВОГО ОТЖАТИЯ ВНЕШНЕГО РЕЛЬСА.....	16
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СХОДА ЭКИПАЖА С РЕЛЬСОВ ВСЛЕДСТВИЕ ВЫПОЛЗАНИЯ ГРЕБНЯ БАНЖАДА НАБЕГАЮЩЕГО КОЛЕСА НА ПОВЕРХНОСТЬ ГОЛОВКИ ВНЕШНЕГО РЕЛЬСА.....	20
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ НАЧАЛА ХОРДОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭКИПАЖА В КРИВОЙ.....	25
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	41

Редактор Уморзаева Т. М.

Подписано в печать

Объем

Формат бумаги 60x 84 1/16

Тираж

Заказ№

Типография ТашИИТ

Ташкент Адылходжаев 1