Заменен Гостом № 25571-82 с 01.01.84
ИУС 4-83, с. 16

УДК 658.3.043.4(083.74)

Группа Т58

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

Система стандартов безопасности труда ВИБРАЦИЯ. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВИБРОИЗОЛЯЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА ОПЕРАТОРОВ САМОХОДНЫХ МАШИН

Основные положения

Occupational safety standards system. Vibration. Calculation methods of vibroisolating working places of self — wheeled vehides. Basic provisions

ГОСТ 12.4.025—76

Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 22 января 1976 г. № 187 срок действия установлен

с 01.01 1978 г.
до 01.01 1983 г.

Срок действия продлен до 01.01.84 -ИУС 4-83, с. 19

1. Настоящий стандарт распространяется на вновь проектируемые тракторы, грузовые автомобили, самоходные и прицепные сельскохозяйственные, строительно-дорожные и другие аналогичные машины (далее — машины) и устанавливает основные положения методов расчета виброизоляции рабочих мест (сидений) операторов от вертикальных колебаний, воздействующих на оператора в эксплуатационных условиях в диапазоне низких частот.

2. Расчет выполняют на стадии проектирования машин в целях проверки параметров вибрации рабочих мест, оборудованных виброизоляцией, на соответствие требованиям действующих государственных стандартов и санитарных норм.

3. Термины, определения и обозначения, применяемые в настоящем стандарте, приведены в справочных приложениях 1 и 2.

4. Для проверки на соответствие действующим санитарным нормам и стандартам ССБТ расчет проводят по скорости, результаты расчета вибрации на рабочих местах представляют в среднеквадратических значениях скорости в октавных полосах частот или в их уровнях и сравнивают с допустимыми. Для других целей допускается проводить расчет и представлять результаты в любых кинематических величинах (перемещениях, скоростях, ускорениях).

5. Источником возбуждения колебаний рабочего места служат колебания основания сидения (кинематическое возбуждение).

Издание официальное **Перепечатка воспрещена**

★

Переиздание. Декабрь 1977 г.

gost.e-ecolog.ru

6. Исходными данными для расчета являются:
характеристика колебаний основания сиденья;
масса оператора, приходящаяся на сиденье;
масса подрессоренной части сиденья;
расчетная схема колебательной системы «оператор — сиденье»;
характеристики сил, возникающих в колебательной системе;
свободный ход сиденья.

6.1. Характеристика колебаний основания задается:
при гармонических колебаниях — амплитудой и частотой перемещения (скорости, ускорения) основания;
при полигармонических колебаниях — амплитудами и частотами гармонических составляющих перемещения (скорости, ускорения) основания;
при случайных стационарных колебаниях — спектральной плотностью перемещения (скорости, ускорения) основания.

6.1.1. Характеристики колебаний основания сиденья определяют экспериментально для машины конкретного вида при работе на характерном для нее режиме и устанавливают в отраслевых стандартах или в другой нормативно-технической документации, утвержденной в установленном порядке.

6.2. Часть массы оператора, приходящаяся на сиденье, составляет 5/7 всей его массы. Расчет ведут для трех вариантов массы оператора 60, 80, 120 кг.

6.3. Массой подрессоренной части сиденья является сумма масс элементов конструкции, перемещающихся в процессе работы относительно основания сиденья.

6.4. Расчетная схема колебательной системы «оператор — сиденье» определяется конструкцией виброизоляции сиденья и принимаемой динамической моделью тела человека — оператора, примеры которой приведены в справочном приложении 3.

6.5. Выбор динамической модели тела человека — оператора для конкретного вида машины устанавливают по экспериментальным данным в отраслевой нормативно-технической документации, утвержденной в установленном порядке.

6.6. Характеристиками сил, возникающих в колебательной системе, являются:

коэффициент жесткости — для восстанавливающей силы;

коэффициент сопротивления — для диссипативной силы вязкого трения;

абсолютная величина — для диссипативной силы сухого трения.

Значения вышеуказанных характеристик обуславливаются конструкцией системы виброизоляции сиденья и определяются экспериментально или расчетным путем. Примеры характеристик приведены в справочном приложении 4.

6.7. Свободный ход сиденья не должен быть более допустимого значения, устанавливаемого для машины конкретного вида в отраслевых стандартах или другой нормативно-технической документации, утвержденной в установленном порядке.

7. Методика расчета определяется:

расчетной схемой;

характеристиками восстанавливающей и диссипативной сил;

характером возбуждения.

7.1. Для случая расчетной схемы, соответствующей черт. 1*а* приложения 3, восстанавливающей и диссипативной сил с линейными характеристиками, при гармоническом, полигармоническом и случайном стационарном возбуждениях в диапазоне частот 0,7—22,4 Гц методика расчета приведена в рекомендуемом приложении 5.

7.2. Для случая расчетной схемы, учитывающей динамические свойства тела человека по черт. 2 приложения 3, восстанавливающей и диссипативной сил с линейными характеристиками, при гармоническом, полигармоническом и случайном стационарном возбуждениях в диапазоне частот 0,7—22,4 Гц методика расчета приведена в рекомендуемом приложении 6.

7.3. Для случая расчетной схемы, соответствующей черт 1*б* приложения 3, восстанавливающей силы с линейной характеристикой диссипативных сил вязкого и сухого трения, при гармоническом и случайном стационарном возбуждениях в диапазоне частот 0,7—22,4 Гц методика расчета приведена в рекомендуемом приложении 7.

7.4. Для случая расчетной схемы, соответствующей черт. 1*б* приложения 3, восстанавливающей силы с ломаной характеристикой, диссипативных сил вязкого и сухого трения, при гармоническом возбуждении в диапазоне частот 0,7—22,4 Гц методика расчета приведена в рекомендуемом приложении 8.

7.5. Для случая, когда расчетная схема и (или) характеристики восстанавливающих и диссипативных сил и (или) характер возбуждения не соответствуют указанным в пп. 7.1—7.4, расчет ведут по специально разрабатываемым методикам.

7.6. Методики расчета параметров гидропневматической и активной электрогидравлической систем виброизоляции приведены в справочных приложениях 9 и 10.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
Справочное

ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ

f — частота, Гц;
ω — угловая частота, $с^{-1}$;
g — ускорение свободного падения, м/с²; $g = 9{,}81$ м/с².

Характеристики возбуждения

y — перемещение основания сиденья относительно земли, м;
$\frac{dy}{dt}$ — скорость основания сиденья относительно земли, м/с;
$\frac{d^2y}{dt^2}$ — ускорение основания сиденья относительно земли, м/с²;
$y_0, \left(\frac{dy}{dt}\right)_0, \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0$ — амплитуды гармонических колебаний соответствующих функций;
$\widetilde{S}_y(\omega)$ — оценка спектральной плотности y, м² · с*;
$\widetilde{S}_{\dot{y}}(\omega)$ — оценка спектральной плотности $\frac{dy}{dt}$, м²/с;
$\widetilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)$ — оценка спектральной плотности $\frac{d^2y}{dt^2}$, м²/с³;
$\tau_к$ — интервал корреляции $\frac{d^2y}{dt^2}$, с.

Характеристики колебаний сиденья

x — перемещение сиденья относительно основания, м;
$\frac{dx}{dt}$ — относительная скорость сиденья, м/с;
$\frac{d^2x}{dt^2}$ — относительное ускорение сиденья, м/с²;
x_0 — амплитуда гармонического колебания x;
$\widetilde{S}_x(\omega)$ — оценка спектральной плотности x, м²·с;
σ_x — среднеквадратическое значение x, м;
z — перемещение сиденья относительно земли, м;
$\frac{dz}{dt}$ — абсолютная скорость сиденья, м/с;
$\frac{d^2z}{dt^2}$ — абсолютное ускорение сиденья, м/с²;

---

* Здесь и далее спектральная плотность определяется формулой

$S(\omega) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty k(\tau)\cos\omega\tau d\tau$, где $k(\tau)$ — корреляционная функция;

$z_0, \left(\frac{dz}{dt}\right)_0, \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0$ — амплитуды гармонических колебаний соответствующих функций;

$\widetilde{S}_z\cdot(\omega)$ — оценка спектральной плотности $\frac{dz}{dt}$, м²/с;

$\widetilde{S}_z\cdot\cdot(\omega)$ — оценка спектральной плотности $\frac{d^2z}{dt^2}$, м³/с²;

σ_v — среднеквадратическое значение $\frac{dz}{dt}$, м/с;

σ_a — среднеквадратическое значение $\frac{d^2z}{dt^2}$, м/с²;

L — логарифмический уровень σ_v в октавной полосе частот.

Параметры системы виброизоляции

m_c — масса подрессоренной части сиденья, кг;
$m_ч$ — масса оператора, приходящаяся на сиденье, кг;
m — масса подрессоренной части сиденья с сидящим оператором, кг;
P — масса подрессоренной части сиденья с сидящим оператором, Н;
c — коэффициент жесткости, Н/м;
ξ — коэффициент сопротивления, Нс/м;
d — свободный ход сиденья до упора, м;
f_0 — собственная частота системы виброизоляции, Гц;
ω_0 — собственная угловая частота системы виброизоляции, с$^{-1}$;
D — относительное демпфирование.

Силы, действующие в системе виброизоляции

$F_в$ — восстанавливающая сила, Н;
$F_д$ — диссипативная сила, вызванная вязким трением, Н;
F_c — диссипативная сила, вызванная сухим трением, Н;
F_0 — абсолютная величина сухого трения, Н.

Характеристики системы виброизоляции

$T_x(\omega)$ — относительный коэффициент передачи при виброизоляции в случае гармонического возбуждения, $T_x(\omega)=\frac{x_0}{y_0}$;

$T_z(\omega)$ — абсолютный коэффициент передачи при виброизоляции в случае гармонического возбуждения, $T_z(\omega)=\frac{z_0}{y_0}$;

$K_{эф}(\omega)$ — коэффициент эффективности виброзащиты, $K_{эф}(\omega)=\frac{1}{T_z(\omega)}$.

Гидропневматическая виброизоляция

$d_ц$ — диаметр цилиндра, см;
$d_{шт}$ — диаметр штока, см;
S_1, S_2 — площадь поршня основной ступени, ступени «противодавления», см²;
p_0 — избыточное давление воздуха в системе машины, Н/см²;

p_1, p_2 — абсолютное давление воздуха в основной ступени и ступени «противодавления» при статической нагрузке, Н/см^2;

c_0 — коэффициент жесткости виброизоляции сиденья при статической нагрузке, Н/м;

c_1, c_2 — коэффициенты жесткости основной ступени и ступени «противодавления» при статической нагрузке, Н/м;

n — показатель политропы сжатия;

V_1, V_2 — объем воздуха основной ступени и ступени «противодавления» при статической нагрузке, см^3;

u — перемещение поршня*, см;

$u_{сж}, u_{отб}$ — максимальное перемещение поршня при сжатии и при отбое, м.

Активная виброизоляция

$\varkappa$ — чувствительность датчика ускорений, мВ/g;

$U_{вх}$ — напряжение сигнала на входе, В;

$U_{вх.эмп}$ — минимальное напряжение срабатывания электромагнитного преобразователя, В;

$U_{вых}$ — напряжение сигнала на выходе, В;

$U_д$ — пороговая чувствительность измерительного усилителя, В;

$R_{вх.м.у}$ — входное сопротивление мощного усилителя блока управления, Ом;

K_x — коэффициент усиления обратной связи по относительному перемещению, с$^{-2}$;

K_v — коэффициент усиления обратной связи по относительной скорости, с$^{-1}$;

K_a — коэффициент усиления обратной связи по абсолютному ускорению;

$A(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы;

$\varphi(\omega)$ — фазо-частотная характеристика замкнутой системы;

$H(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы;

$\Theta(\omega)$ — фазо-частотная характеристика разомкнутой системы.

* При сжатии $u>0$, при отбое $u<0$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2
Справочное

Термины и определения, применяемые в настоящем стандарте

Термин	Определение
1. Вибрационная защита Виброзащита	Совокупность методов и средств для уменьшения вредного воздействия вибрации
2. Виброизоляция	Способ вибрационной защиты, заключающийся в уменьшении передачи вибрации от источника возбуждения защищаемому объекту при помощи устройств, помещаемых между ними
3. Виброизолятор	Устройство, осуществляющее виброизоляцию
4. Активная виброизоляция	Виброизоляция, использующая дополнительный источник энергии
5. Пассивная виброизоляция	Виброизоляция, не использующая дополнительный источник энергии
6. Коэффициент эффективности вибрационной защиты Коэффициент эффективности	Отношение значения перемещения (скорости, ускорения) защищаемого объекта до введения виброзащиты к значению этой же величины после ее введения
7. Коэффициент передачи при виброизоляции Коэффициент передачи	Отношение значения перемещения (скорости, ускорения) защищаемого объекта к значению этой же величины источника возбуждения
8. Кинематическое возбуждение колебаний Кинематическое возбуждение	Возбуждение колебаний системы сообщением каким-либо ее точкам заданного движения
9. Восстанавливающая сила	Сила, возникающая при отклонении системы от положения равновесия и направленная противоположно этому отклонению
10. Коэффициент жесткости	Взятая с противоположным знаком производная восстанавливающей силы по отклонению системы с одной степенью свободы от положения равновесия, когда восстанавливающая сила возникает вследствие деформации упругих элементов
11. Диссипативная сила	Сила, возникающая при движении механической системы и вызывающая рассеяние механической энергии
12. Коэффициент сопротивления	Отношение диссипативной силы к скорости, взятое с противоположным знаком (для случая диссипативной силы с линейной характеристикой)

Продолжение

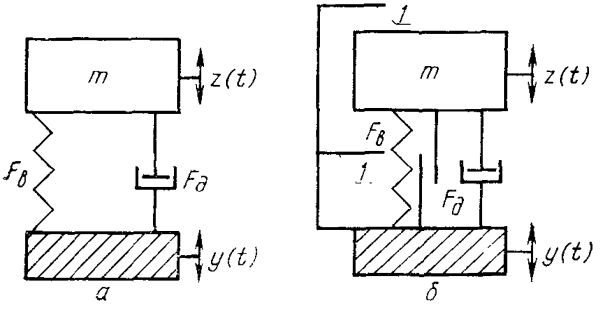
Термин	Определение
13. Относительное демпфирование системы	Отношение коэффициента сопротивления к значению этого коэффициента, при котором система перестает быть колебательной
14. Среднегеометрическая частота октавы Среднегеометрическая частота	Корень квадратный из произведения граничных частот октавы
15. Среднеквадратическое значение колеблющейся величины Среднеквадратическое значение	Корень квадратный из среднего значения квадрата колеблющейся величины за рассматриваемый промежуток времени. Примечание. Среднеквадратическое значение колеблющейся величины $w(t)$ в октавной полосе частот: для случайной величины $w(t)$ $$\sigma_w = \sqrt{\int_{\omega_н}^{\omega_в} \widetilde{S}_w(\omega)d\omega},$$ где $\widetilde{S}w(\omega)$ — оценка спектральной плотности $w(t)$; $\omega_н$, $\omega_в$ — нижняя и верхняя граничные частоты октавы, для $w(t)=w_0 \sin(\omega t+\varphi)$ $(\omega_н \leqslant \omega \leqslant \omega_в)$ $$\sigma_w = \frac{\omega_0}{1{,}41}.$$
16. Логарифмический уровень виброскорости в октавной полосе Уровень скорости	$$L = 20\lg \frac{\sigma_v}{5\cdot 10^{-8}\text{м/с}},$$ где σ_v — среднеквадратическое значение скорости в октавной полосе частот

ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Справочное

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

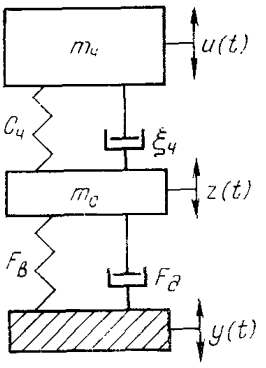
Модель, рассматривающая тело человека — оператора как твердое, а массу его и сиденья как единую массу (расчетная схема «оператор — сиденье» показана на черт. 1).

Модель, рассматривающая тело человека — оператора как линейную одномассовую колебательную систему, обладающую жесткостью и сопротивлением (расчетная схема «оператор — сиденье» показана на черт. 2).



1 — упоры

Черт. 1



Черт. 2

ПРИЛОЖЕНИЕ 4
Справочное

СИЛЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В СИСТЕМЕ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

При статическом нагружении системы виброизоляции относительное перемещение сиденья x зависит от величины приложенной силы F. Простейшие характеристики этой зависимости при нагрузке и разгрузке системы показаны на черт. 1. Для расчета системы виброизоляции указанную силу удобно представить в виде суммы восстанавливающей силы и силы сухого трения. Формулы для этих сил приведены ниже.

Случай 1 (черт. 1*а*). Характеристика силы F может быть представлена формулами:

при нагружении *1*

$$F=cx+F_0, -d<x<d,$$

при разгрузке *2*

$$F=cx-F_0, -d<x<d,$$

или в общем виде

$$F=F_в+F_с,$$

где

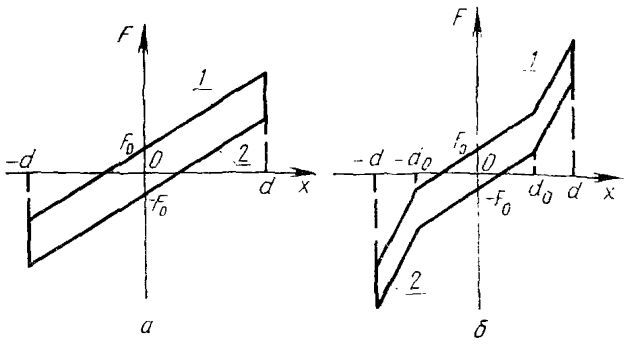
$$F_в=cx;$$
$$-d<x<d;$$
$$F_с=F_0\operatorname{sgn}\frac{dx}{dt}.$$

Графики $F_в$, $F_с$ показаны на черт. 2*а*.

Случай II (черт. 1*б*). Характеристика силы F может быть представлена формулами:

при нагружении *1*

$$F=F_1(x)+F_0,$$



1 — нагрузка; *2* — разгрузка

Черт. 1

при разгрузке *2*

$$F=F_1(x)-F_0,$$

где

$$F_1(x)=\begin{cases} -cd_0+c_0(x+d_0), & -d\leqslant x\leqslant -d_0; \\ cx, & -d_0\leqslant x\leqslant d_0; \\ cd_0+c_0(x-d_0), & d_0\leqslant x\leqslant d; \end{cases}$$

c — жесткость на участке $-d_0\leqslant x\leqslant d_0$,

c_0 — жесткость на участках $-d\leqslant x\leqslant -d_0, d_0\leqslant x\leqslant d$,

или в общем виде

$$F=F_в+F_с,$$

где

$$F_в=\begin{cases} -cd_0+c_0(x+d_0), & -d\leqslant x\leqslant -d_0; \\ cx, & -d_0\leqslant x\leqslant d_0; \\ cd_0+c_0(x-d_0), & d_0\leqslant x\leqslant d; \end{cases}$$

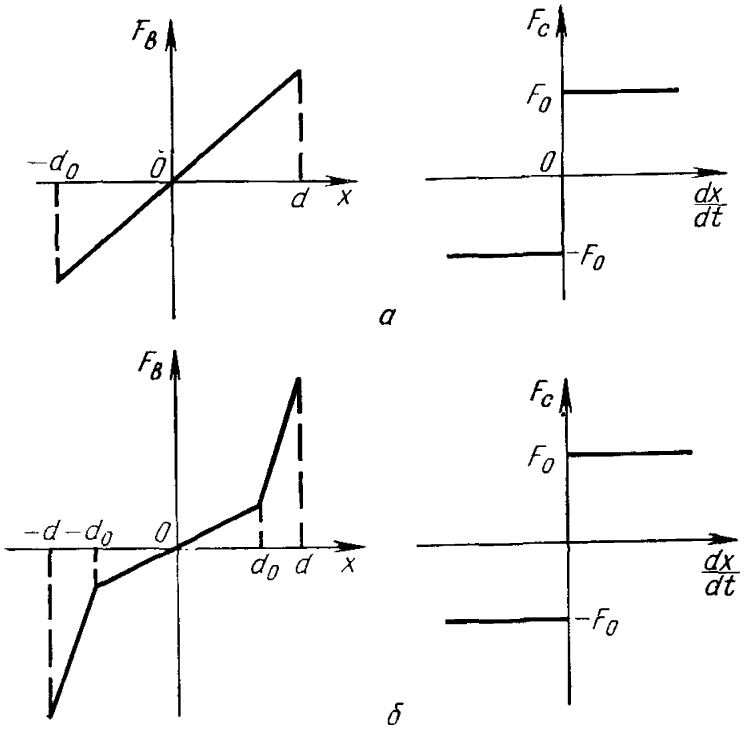
$$F_с=F_0\operatorname{sgn}\frac{dx}{dt}.$$

Обозначим

$$\frac{c_0}{c}=e.$$

При $e>1$ восстанавливающая сила имеет жесткую характеристику, при $e<1$ — мягкую

Графики $F_в$, $F_с$ показаны на черт. 2*б*.



Черт. 2

В системе виброизоляции, имеющей гидравлический демпфер, при колебаниях сиденья возникает диссипативная сила, зависящая от величины относительной скорости сиденья. В случае, когда характеристика демпфера мало отличается от линейной, указанная сила может быть заменена диссипативной силой с линейной характеристикой, то есть диссипативной силой вязкого трения $F_д$, коэффициент сопротивления которой равен среднеарифметическому значений этих коэффициентов на отдачу и на сжатие:

$$F_д = \xi \frac{dx}{dt}, \quad \xi = \frac{1}{2}(\xi_0 + \xi_с),$$

где ξ_0 — значение ξ на отдаче;
$\xi_с$ — значение ξ на сжатие.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5
Рекомендуемое

МЕТОДИКА ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА ПРОСТЕЙШЕЙ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Расчетная схема системы виброизоляции представлена на черт. 1*а* приложения 3.

Восстанавливающую и диссипативную силы определяют по формулам:

$$F_в = cx, \quad -d < x < d;$$

$$F_д = \xi \frac{dx}{dt} .$$

Расчет ведут для случая, когда известна одна из следующих кинематических характеристик движения основания:

перемещение;

скорость;

ускорение.

I. ГАРМОНИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Особенности линейной виброизоляции

1. Виброзащитными свойствами ($K_{эф} > 1$) система обладает, когда отношение частоты возбуждения (ω) к частоте собственных колебаний (ω_0) больше

$$1{,}41 \left(\frac{\omega}{\omega_0} > 1{,}41 \right) .$$

2. *При частоте возбуждения* $\omega = 1{,}41\ \omega_0$ *колебания передаются без изменения* ($K_{эф} = 1$).

3. Если отношение частоты возбуждения к собственной частоте меньше $1{,}41 \left(\frac{\omega}{\omega_0} < 1{,}41 \right)$, система увеличивает колебания ($K_{эф} < 1$).

4. Когда частота возбуждения близка собственной частоте ($\omega \approx \omega_0$), наблюдается наибольшие колебания (резонанс), при этом коэффициент эффективности принимает наименьшее значение.

5. В области виброизоляции $\left(\frac{\omega}{\omega_0} > 1{,}41 \right)$ коэффициент виброзащиты выше для системы с меньшим относительным демпфированием (D). В области, где система увеличивает колебания $\left(\frac{\omega}{\omega_0} < 1{,}41 \right)$, коэффициент эффективности виброзащиты меньше для систем с меньшим относительным демпфированием.

6. Возможность использования виброизоляции с линейной характеристикой восстанавливающей силы ограничивается значением статического прогиба ($x_{ст}$), который должен быть меньше свободного хода сиденья. Если необходимо для нижней границы области подавляемых частот ($f_н$) выполнить условие $K_{эф} = 1$*, то $x_{ст}$ определяют формулой

* Для всех остальных частот области $K_{эф} > 1$.

$$x_{ст}=\frac{4,9}{\pi^2 f_н^2}.$$

Численные значения $x_{ст}$ в зависимости от $f_н$ даны в табл. 1.

Таблица 1

$f_н$, Гц	0,7	1,0	1,4	2,0	2,8	4,0	5,6	8,0
$x_{ст}$, м	1,02	0,5	0,25	0,13	0,06	0,03	0,02	0,01

Цель расчета

Определение $K_{эф}$, x_0, $\left(\frac{dz}{dt}\right)_0$, $\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0$.

Сравнение среднеквадратического значения скорости (ускорения) с допустимым.

Исходные данные:

$m_с, m_ч, c, \xi$

Исходные данные по возбуждению для различных случаев кинематических характеристик движения основания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Способ определения движения основания	Закон, описывающий кинематическую характеристику	Исходные данные
1. Перемещением	$y = y_0 \sin 2\pi f t$	y_0, f
2. Скоростью	$\frac{dy}{dt} = \left(\frac{dy}{dt}\right)_0 \sin 2\pi f t$	$\left(\frac{dy}{dt}\right)_0$, f
3. Ускорением	$\frac{d^2y}{dt^2} = \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0 \sin 2\pi f t$	$\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0$, f

Вспомогательные величины

$$m=m_с+m_ч;\ \omega_0=\sqrt{\frac{c}{m}};\qquad D=\frac{\xi}{2\sqrt{cm}}$$

$$\omega=2\pi f;\ \frac{\omega}{\omega_0}.$$

Порядок расчета

1. Подсчитывают коэффициенты передачи при виброизоляции по формулам:

$$T_x=\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2+\left(2D\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}; \qquad (1)$$

$$T_z=\sqrt{\frac{1+\left(2D\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2+\left(2D\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}. \qquad (2)$$

Для $D=0$; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0 зависимости T_x и T_z от $\frac{\omega}{\omega_0}$ приведены на черт. 1 и 2.

2. Определяют коэффициент эффективности виброзащиты по формуле

$$K_{эф}=\frac{1}{T_z}.$$

3. Определяют $\left(\frac{dz}{dt}\right)_0$, $\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0$, x_0. Формулы для их определения в зависимости от исходных данных, характеризующих кинематическое возбуждение, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные	Формулы для определения амплитуд		
	$\left(\frac{dz}{dt}\right)_0$	$\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0$	x_0
1. y_0, f	$T_z\omega y_0$	$T_z\omega^2 y_0$	$T_x y_0$
2. $\left(\frac{dy}{dt}\right)_0$, f	$T_z\left(\frac{dy}{dt}\right)_0$	$T_z\omega\left(\frac{dy}{dt}\right)_0$	$\frac{T_x}{\omega}\left(\frac{dy}{dt}\right)_0$
3. $\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0$, f	$\frac{T_z}{\omega}\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0$	$T_z\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0$	$\frac{T_x}{\omega^2}\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0$

4. Определяют среднеквадратические значения скорости (ускорения) и логарифмические уровни скорости по формулам:

$$\sigma_v=\frac{1}{1{,}41}\left(\frac{dz}{dt}\right)_0; \qquad \sigma_a=\frac{1}{1{,}41}\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0;$$

$$L=20\lg\frac{\sigma_v}{5\cdot10^{-8}\text{ м/с}}$$

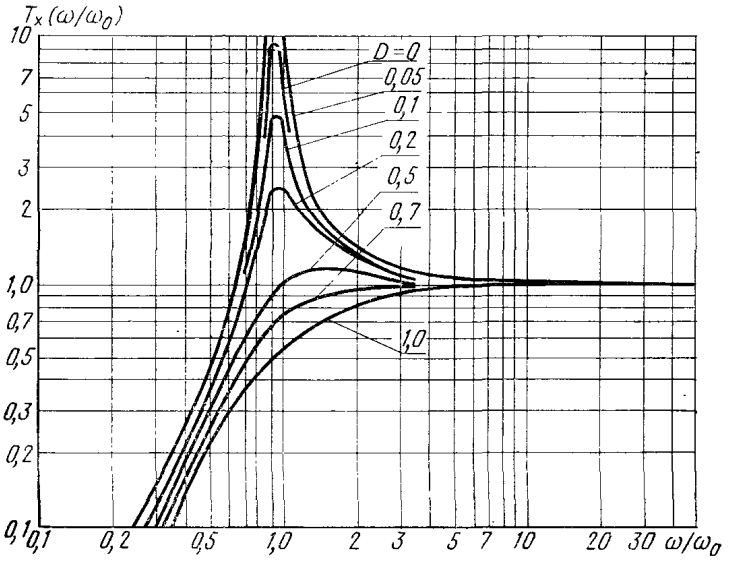
и сравнивают с допустимыми для данной октавной полосы частот.

Пример расчета

Исходные данные:

m_c=16,5 кг;

$m_ч$=80·5/7=57,0 кг;



Черт. 1

c=6520 Н/м;

ξ=700 Нс/м.

Характеристикой кинематического возбуждения служит скорость основания сиденья, изменяющаяся по гармоническому закону, с амплитудой

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_0 = 0{,}126 \text{ м/с}$$

и частотой f=4 Гц.

Вспомогательные величины

$$m = 16{,}5 + 57{,}0 = 73{,}5 \text{ кг}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{6520}{73{,}5}} = 9{,}42 \text{ с}^{-1};$$

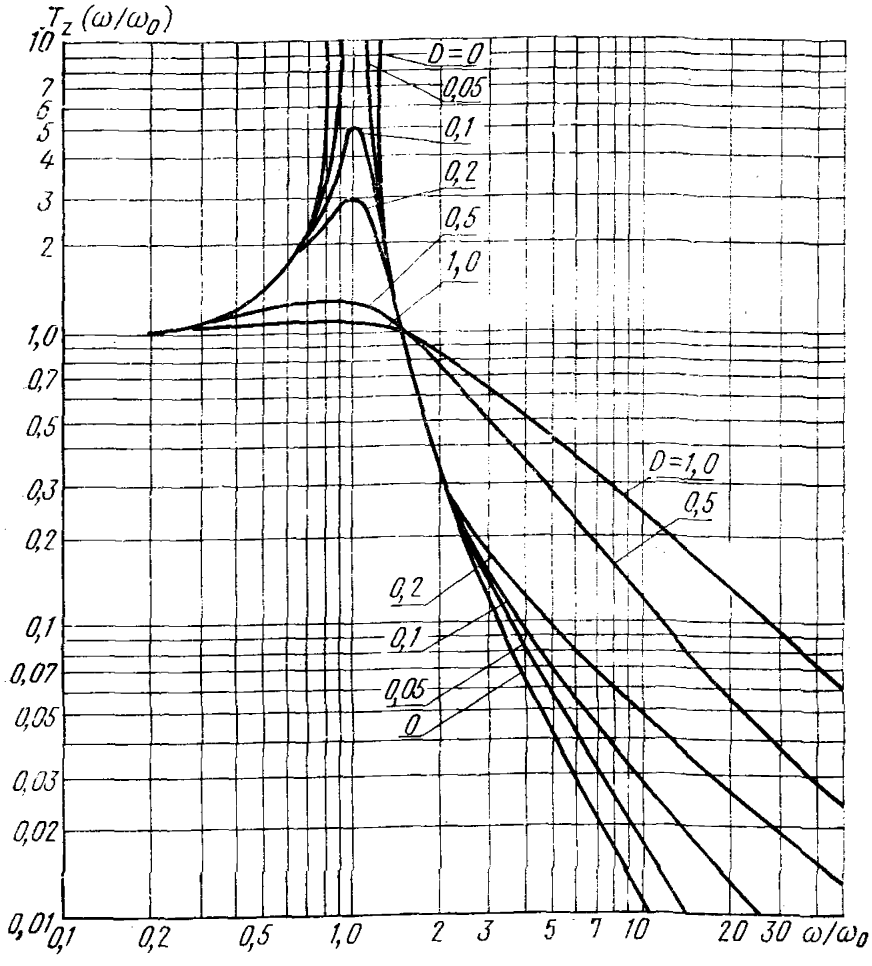
$$D = \frac{700}{2\sqrt{6520 \cdot 73{,}5}} = 0{,}5; \quad \omega = 2\pi \cdot 4 = 25{,}1 \text{ с}^{-1};$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{25{,}1}{9{,}42} = 2{,}67.$$

Порядок расчета

$$1.\ T_x = \frac{2{,}67^2}{\sqrt{(1-2{,}67^2)^2 + (2 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67)^2}} = 1{,}1;$$

$$T_z = \sqrt{\frac{1 + (2 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67)^2}{(1-2{,}67^2)^2 + (2 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67)^2}} = 0{,}5.$$



Черт. 2

$$2.\ K_{эф}=\frac{1}{0,5}=2.$$

Система виброизоляции дает снижение вибрации в два раза.

3. Поскольку исходные данные, описывающие возбуждение, соответствуют случаю 2 табл. 3, то

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_0=0,5\cdot 0,126=0,063\ \text{м/с};$$

$$\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0=0,5\cdot 0,126\cdot 25,1=1,6\ \text{м/с}^2;$$

$$x_0=1,1\cdot\frac{0,126}{25,1}=0,005\ \text{м}=0,5\ \text{см}.$$

4. Частота $f=4$ Гц находится в октавной полосе 4 Гц (среднегеометрическая частота полосы равна 4 Гц).

$$\sigma_v(4)=\frac{0,063}{1,41}=0,045\ \text{м/с};$$

$$L=20\lg\frac{0{,}045}{5\cdot10^{-8}}=119 \text{ дБ}.$$

II. ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Цель расчета

Определение $K_{эф}(\omega)$, x_{0k}, $\left(\frac{dz}{dt}\right)_{0k}$, $\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_{0k}$ для каждого из гармонических слагаемых полигармонического возбуждения*.

Определение среднеквадратических значений скоростей (ускорений) для каждой из октавных полос и сравнение их с допустимыми для этих октавных полос значениями.

Исходные данные:

$m_c, m_ч, c, \xi$

Исходные данные по возбуждению для различных случаев кинематических характеристик движения основания приведены в табл. 4.

Таблица 4

Способ определения движения основания	Закон, описывающий кинематическую характеристику	Исходные данные
1. Перемещением	$y=\sum_{k=1}^{n} y_{0k}\sin 2\pi f_k t$	y_{0k}, f_k, $k=1, 2...n$
2. Скоростью	$\frac{dy}{dt}=\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{dy}{dt}\right)_{0k}\sin 2\pi f_k t$	$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{0k}$, f_k, $k=1, 2...n$
3. Ускорением	$\frac{d^2y}{dt^2}=\sum_{k=1}^{n}\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_{0k}\sin 2\pi f_k t$	$\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_{0k}$, f_k, $k=1, 2...n$

Вспомогательные величины

$$m=m_c+m_ч;\ \omega_0=\sqrt{\frac{c}{m}};\quad D=\frac{\xi}{2\sqrt{cm}};$$

$$\omega_k=2\pi f_k;\ \frac{\omega_k}{\omega_0};\ k=1,2,...n$$

Порядок расчета

1. Для каждой из гармонических составляющих, входящих в полигармоническое возбуждение, ведут расчет по пп. 1—3 разд. I.

2. Определяют, в каких октавных полосах находятся частоты возбуждений. Для каждой из октавных полос подсчитывают среднеквадратическое значение скорости (ускорения) по формулам:

* Здесь и далее индекс k показывает, что соответствующая величина относится к k-ой гармонической составляющей полигармонического возбуждения.

$$\sigma_v=\sqrt{\frac{1}{2}\sum\left(\frac{dz}{dt}\right)_0^2}\;; \qquad \sigma_a=\sqrt{\frac{1}{2}\sum\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0}\;,$$

где суммируют все амплитуды скорости (ускорения), соответствующие частотам, относящимся к данной октавной полосе. Для каждой из октавных полос подсчитанные значения сравнивают с допустимыми.

Пример расчета

Исходные данные

$$m_c=16{,}5 \text{ кг}; \qquad m_ч=5/7\cdot 80=57 \text{ кг};$$
$$c=6520 \text{ Н/м}; \qquad \xi=700 \text{ Нс/м}.$$

Характеристикой кинематического возбуждения служит скорость основания, изменяющаяся по полигармоническому закону (из трех гармонических составляющих), причем

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{01}=0{,}125 \text{ м/с}; \; f_1=1 \text{ Гц}; \left(\frac{dy}{dt}\right)_{02}=0{,}063 \text{ м/с};$$

$$f_2=4 \text{ Гц}; \left(\frac{dy}{dt}\right)_{03}=0{,}02 \text{ м/с}; \; f_3=5 \text{ Гц}$$

Вспомогательные величины

$$m=16{,}5+57{,}0=73{,}5 \text{ кг}; \; \omega_0=\sqrt{\frac{6520}{73{,}5}}=9{,}42 \text{ с}^{-1};$$

$$D=\frac{700}{2\sqrt{6520\cdot 73{,}5}}=0{,}5;$$

$$\omega_1=2\pi\cdot 1=6{,}28 \text{ с}^{-1}; \qquad \frac{\omega_1}{\omega_0}=\frac{6{,}28}{9{,}42}=0{,}70;$$

$$\omega_2=2\pi\cdot 4=25{,}1 \text{ с}^{-1}; \qquad \frac{\omega_2}{\omega_0}=\frac{25{,}1}{9{,}42}=2{,}67;$$

$$\omega_3=2\pi\cdot 5=31{,}4 \text{ с}^{-1}; \qquad \frac{\omega_3}{\omega_0}=\frac{31{,}4}{9{,}42}=3{,}33.$$

Порядок расчета

1. Из формул (1), (2) найдем значения T_x, T_z при $D=0{,}5$

для $\frac{\omega_1}{\omega_0}=0{,}70 \; T_x=0{,}6; \; T_z=1{,}4;$

для $\frac{\omega_2}{\omega_0}=2{,}67 \; T_x=1{,}1; \; T_z=0{,}5;$

для $\frac{\omega_2}{\omega_0}=3{,}33 \; T_x=1{,}0; \; T_z=0{,}33.$

2. Для $\frac{\omega_1}{\omega_0}=0{,}70 \; K_{эф}=\frac{1}{1{,}4}=0{,}7$

Системы виброизоляции на частоте 1 Гц не уменьшает, а увеличивает вибрацию в 1,4 раза.

Для $\frac{\omega_2}{\omega_0}=2{,}67$; $K_{эф}=\frac{1}{0{,}5}=2{,}0$.

Система виброизоляции на частоте 4 Гц снижает вибрацию в два раза.

Для $\frac{\omega_3}{\omega_0}=3{,}33$; $K_{эф}=\frac{1}{0{,}33}=3{,}0$.

Система виброизоляции на частоте 5 Гц снижает вибрацию в 3 раза.

3. Поскольку исходные данные, описывающие кинематическое возбуждение, соответствуют случаю 2 табл. 3, то

для $f_1=1$ Гц

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_{01}=1{,}4\cdot 0{,}125=0{,}175 \text{ м/с};$$

$$\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_{01}=1{,}4\cdot 0{,}125\cdot 6{,}28=1{,}1 \text{ м/с}^2;$$

$$x_{01}=0{,}6\cdot\frac{0{,}125}{6{,}28}=0{,}012 \text{ м},$$

для $f_2=4$ Гц

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_{02}=0{,}5\cdot 0{,}063=0{,}032 \text{ м/с};$$

$$\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_{02}=0{,}5\cdot 0{,}063\cdot 25{,}1=0{,}79 \text{ м/с}^2;$$

$$x_{02}=1{,}1\cdot\frac{0{,}063}{25{,}1}=0{,}003 \text{ м};$$

для $f_3=5$ Гц

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_{03}=0{,}33\cdot 0{,}02=0{,}007 \text{ м/с};$$

$$\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_{03}=0{,}33\cdot 0{,}02\cdot 31{,}4=0{,}21 \text{ м/с}^2;$$

$$x_{03}=1\cdot\frac{0{,}02}{31{,}4}=0 \text{ м}.$$

4. Частота $f_1=1$ Гц находится в октавной полосе 1 Гц (среднегеометрическая частота полосы равна 1 Гц)

$$\sigma_v(1)=\frac{0{,}175}{1{,}41}=0{,}124 \text{ м/с}.$$

5. Частоты $f_2=4$ Гц и $f_3=5$ Гц приходятся на октавную полосу 4 Гц (среднегеометрическая частота полосы равна 4 Гц)

$$\sigma_v(4)=\sqrt{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{dz}{dt}\right)^2_{02}+\left(\frac{dz}{dt}\right)^2_{03}\right]}=\sqrt{\frac{1}{2}(0{,}032^2+0{,}007^2)}=0{,}023 \text{ м/с}$$

III. СЛУЧАЙНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Цель расчета

Определение среднеквадратических значений скоростей (ускорений) для каждой из октавных полос и сравнение их с допустимыми.

Определение σ_x и сравнение его с d. Определение вероятности удара об упор

Исходные данные:

m_c, $m_ч$, c, ξ, d.

Исходные данные по возбуждению для различных случаев кинематических характеристик случайного стационарного движения основания приведены в табл. 5.

Таблица 5

Способ определения движения основания	Исходные данные
1. Перемещением	$\widetilde{S}_y(\omega)$
2. Скоростью	$\widetilde{S}_{\dot{y}}(\omega)$
3. Ускорением	$\widetilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)$

Если при случайных стационарных колебаниях основания неизвестна его спектральная плотность, допускается приближенно проводить расчет по среднеквадратическим значениям в треть октавных полосах. Расчет проводят как для полигармонического возбуждения с частотами, равными среднегеометрическим значениям треть октавных полос, и с амплитудами, равными соответствующим среднеквадратическим значениям, умноженным на $\sqrt{2}$.

Вспомогательные величины

$$m=m_c+m_ч;\ \omega_0=\sqrt{\frac{c}{m}};\qquad D=\frac{\xi}{2\sqrt{cm}}.$$

Порядок расчета

1. Подсчитывают $\widetilde{S}_{\dot{z}}(\omega)$, $\widetilde{S}_{\ddot{z}}(\omega)$, $\widetilde{S}_x(\omega)$ для значений ω, охватывающих октавные полосы. Формулы для определения этих величин в зависимости от исходных характеристик случайного движения основания даны в табл. 6.

Таблица 6

Способ определения движения основания	Формулы для определения оценок спектральных плотностей		
	$\widetilde{S}_{\dot{z}}(\omega)$	$\widetilde{S}_{\ddot{z}}(\omega)$	$\widetilde{S}_x(\omega)$
1. Перемещением	$\omega^2 T_z^2(\omega)\widetilde{S}_y(\omega)$	$\omega^4 T_z^2(\omega)\widetilde{S}_y(\omega)$	$T_x^2(\omega)\widetilde{S}_y(\omega)$
2. Скоростью	$T_z^2(\omega)\widetilde{S}_{\dot{y}}(\omega)$	$\omega^2 T_z^2(\omega)\widetilde{S}_{\dot{y}}(\omega)$	$\frac{1}{\omega^2}T_x^2(\omega)\widetilde{S}_{\dot{y}}(\omega)$
3. Ускорением	$\frac{1}{\omega^2}T_z^2(\omega)\widetilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)$	$T_z^2(\omega)\widetilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)$	$\frac{1}{\omega^4}T_x^2(\omega)\widetilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)$

Формулы $T_x(\omega)$, $T_z(\omega)$ даны в разд. I настоящего приложения.

2. Подсчитывают среднеквадратические значения скорости (ускорения) для каждой из октавных полос по формулам:

$$\sigma_v=\sqrt{\int_{\omega_н}^{\omega_в}\tilde{S}_z(\omega)d\omega}\,; \qquad \sigma_a=\sqrt{\int_{\omega_н}^{\omega_в}\tilde{S}_{\ddot{z}}(\omega)d\omega},$$

где $\omega_н, \omega_в$ — нижняя и верхняя граничные угловые частоты. Полученные значения сравнивают с допустимыми.

3. Подсчитывают σ_x по формуле

$$\sigma_x=\sqrt{\int_0^{\infty}\tilde{S}_x(\omega)d\omega}.$$

4. Подсчитывают $u=\frac{d}{\sigma_x}$ и определяют вероятность удара об упор (p) по табл. 7.

Пример расчета

Исходные данные:

$m_c=16{,}5$ кг; $c=6520$ Н/м; $m_ч=57{,}0$ кг; $\xi=700$ Нс/м; $d=0{,}06$ м.

Характеристикой случайного стационарного кинематического возбуждения служит ускорение основания.

Рассматриваются два варианта:

а) оценка спектральной плотности аппроксимируется аналитической функцией

$$\tilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)=\frac{2\alpha\sigma_0^2}{\pi}\,\frac{\omega^2+\alpha^2+\beta^2}{[\omega^2-(\alpha^2+\beta^2)]^2+4\alpha^2\omega^2},$$

$$\alpha=1{,}9\ \text{с}^{-1};\ \beta=18\ \text{с}^{-1};\ \sigma_0=2{,}7\ \text{м/с}^2;$$

σ_0 — среднеквадратическое значение ускорения основания, тогда

$$\tilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)=8{,}76\frac{\omega^2+327{,}6}{(\omega^2-327{,}6)^2+14{,}4\omega^2};$$

б) оценка спектральной плотности задана таблично.

Вспомогательные величины

$$m=16{,}5+57{,}0=73{,}5\ \text{кг};\ \omega_0=\sqrt{\frac{6520}{73{,}5}}=9{,}42\ \text{с}^{-1};$$

$$\omega_0^2=88{,}7\ \text{с}^{-2};\ D=\frac{700}{2\sqrt{6520\cdot73{,}5}}=0{,}5$$

Порядок расчета

1. Подсчитывают $\tilde{S}_z(\omega)$, $\tilde{S}_{\ddot{x}}(\omega)$ по формулам табл. 6 для случая 3. Расчет ведут для значений ω от $\omega=4{,}39\ \text{с}^{-1}$* до ω, при котором подсчитываемые функции практически равно нулю.

---

* $\omega=4{,}39\ \text{с}^{-1}$ соответствует $f=0{,}7$ Гц, что является нижней границей первой октавной полосы.

Таблица 7

u	p	u	p
0,05	0,960	1,20	0,230
0,10	0,920	1,25	0,211
0,15	0,881	1,30	0,194
0,20	0,841	1,35	0,177
0,25	0,803	1,40	0,161
0,30	0,764	1,45	0,147
0,35	0,726	1,50	0,134
0,40	0,689	1,55	0,121
0,45	0,653	1,60	0,110
0,50	0,617	1,65	0,099
0,55	0,582	1,70	0,089
0,60	0,548	1,75	0,080
0,65	0,516	1,80	0,072
0,70	0,484	1,85	0,064
0,75	0,453	1,90	0,057
0,80	0,424	1,95	0,051
0,85	0,395	2,00	0,045
0,90	0,368	2,25	0,024
0,95	0,342	2,50	0,022
1,00	0,317	2,75	0,006
1,05	0,294	3,00	0,003
1,10	0,271	3,50*	0
1,15	0,250		

* При $u>3{,}50$, $p=0$.

Вариант а

$$\widetilde{S}_z(\omega)=\frac{3{,}28}{\omega^2}\,\frac{\omega^2+327{,}6}{(\omega^2-327{,}6)^2+14{,}4\omega^2}\,\frac{1+\frac{\omega^2}{88{,}7}}{\left(1-\frac{\omega^2}{88{,}7}\right)^2+\frac{\omega^2}{88{,}7}};$$

$$\widetilde{S}_x(\omega)=\frac{3{,}28}{88{,}7}\,\frac{\omega^2+327{,}6}{(\omega^2-327{,}6)^2+14{,}4\omega^2}\,\frac{1}{\left(1-\frac{\omega^2}{88{,}7}\right)^2+\frac{\omega^2}{88{,}7}}.$$

Вариант б

Предварительно подсчитывают

$$\frac{1}{\omega^2}T_z^2(\omega)=\frac{1}{\omega^2}\,\frac{1+\frac{\omega^2}{88{,}7}}{\left(1-\frac{\omega^2}{88{,}7}\right)^2+\frac{\omega^2}{88{,}7}};$$

$$\frac{1}{\omega^4}T_x^2(\omega)=\frac{\frac{1}{88{,}7}}{\left(1-\frac{\omega^2}{88{,}7}\right)^2+\frac{\omega^2}{88{,}7}}$$

2. Подсчитывают*

$$\sigma_v(1)=\sqrt{\int_{4,39}^{8,72}\tilde{S}_z(\omega)d\omega}\,;\qquad \sigma_v(2)=\sqrt{\int_{8,72}^{17,6}\tilde{S}_z(\omega)d\omega};$$

$$\sigma_v(4)=\sqrt{\int_{17,6}^{35,2}\tilde{S}_z(\omega)d\omega};\qquad \sigma_v(8)=\sqrt{\int_{35,2}^{70,4}\tilde{S}_z(\omega)d\omega};$$

$$\sigma_v(16)=\sqrt{\int_{70,3}^{141}\tilde{S}_z(\omega)d\omega}.$$

Значения этих величин, приведенные в табл. 8, сравнивают с допустимыми.

Таблица 8

Среднегеометрическая частота октавы, Гц	1	2	4	8	16
σ_v, м/с	0,091	0,104	0,059	0,003	0

3. Подсчитывают σ_x

$$\sigma_x=\sqrt{\int_0^{\infty}\tilde{S}_x(\omega)d\omega}=\sqrt{0,00015}=0,012\text{ м}.$$

4. Подсчитывают

$$u=\frac{0,060}{0,012}=5.$$

По табл. 7 получим

$$p=0.$$

Вероятность удара об упор равна нулю.

* $\sigma_v(n)$ — значение σ_v для октавной полосы со среднегеометрической частотой n Гц.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6
Рекомендуемое

МЕТОДИКА ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

Тело сидящего человека рассматривают как линейную одномассовую колебательную систему. Расчетная схема системы виброизоляции с учетом динамических свойств тела человека представлена на черт. 2 приложения 3.

Методика расчетов при гармоническом, полигармоническом и случайном возбуждениях аналогична изложенной в приложении 5, только в исходные данные и вспомогательные величины добавляют величины, характеризующие динамические свойства тела человека, и T_x, T_z определяют по формулам (1) и (2) настоящего приложения.

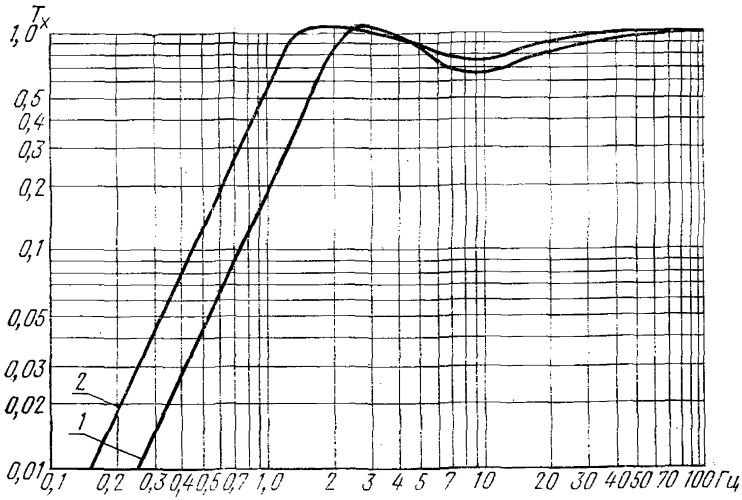
Дополнительные исходные данные

$c_ч$ — коэффициент жесткости тела человека, Н/м.
$\xi_ч$ — коэффициент сопротивления тела человека, Нс/м.

Дополнительные вспомогательные величины

$\omega_ч$ — собственная частота тела человека, $с^{-1}$;
$D_ч$ — относительное демпфирование тела человека

$$\omega_ч = \sqrt{\frac{c_ч}{m_ч}}\ ; \qquad D_ч = \frac{\xi_ч}{2\sqrt{c_ч m_ч}}\ ; \qquad \frac{\omega_ч}{\omega_0}\ .$$



1—график T_x при $\frac{\omega_ч}{\omega_0}$=3,33; D=0,5; *2*—график T_x при $\frac{\omega_ч}{\omega_0}$=2, D=0,5

Черт. 1

Формулы для определения T_x, T_z

$$T_x=\frac{\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\sqrt{\left[\frac{m_c\omega^2}{m\omega_0}-\frac{\omega_ч^2}{\omega_0^2}\right]^2+\left[\frac{\omega_ч^2}{\omega_0^2}-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left(-\frac{m_c\omega^2}{m\omega_0^2}+\frac{\omega_ч^2}{\omega_0^2}+4DD_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}+1\right)\right]^2+4\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left[\frac{\omega_ч}{\omega}\left(D_ч+D\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left(D+D_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)\right]^2+\left(2\frac{\omega}{\omega_0}\cdot\frac{\omega_ч}{\omega_0}D_ч\right)^2}}{\sqrt{\left[\frac{\omega_ч^2}{\omega_0^2}-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left(-\frac{m_c\omega^2}{m\omega_0^2}+\frac{\omega_ч^2}{\omega_0^2}+4DD_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}+1\right)\right]^2+4\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left[\frac{\omega_ч}{\omega_0}\left(D_ч+D\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left(D+D_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)\right]^2}}; \quad (1)$$

$$T_z=\frac{\sqrt{\left[\frac{\omega_ч^2}{\omega_0^2}-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left(1+4DD_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)\right]^2+4\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left[\frac{\omega_ч}{\omega_0}\left(D_ч+D\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)-D\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right]^2}}{\sqrt{\left[\frac{\omega_ч^2}{\omega_0^2}-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left(-\frac{m_c\omega^2}{m\omega_0^2}+\frac{\omega_ч^2}{\omega_0^2}+4DD_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}+1\right)\right]^2+4\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\left[\frac{\omega}{\omega_0}\left((D_ч+D\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)-D\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right]^2}} \quad (2)$$

Графики $T_x(\omega)$, $T_z(\omega)$ для $\frac{m_c}{m}=0,272$; $D_ч=0,315$;

$\frac{\omega_ч}{\omega_0}=3,33$; 2,00; $D=0,7$; 0,5; 0,2; показано на черт. 1—3*.

Пример расчета

Исходные данные:

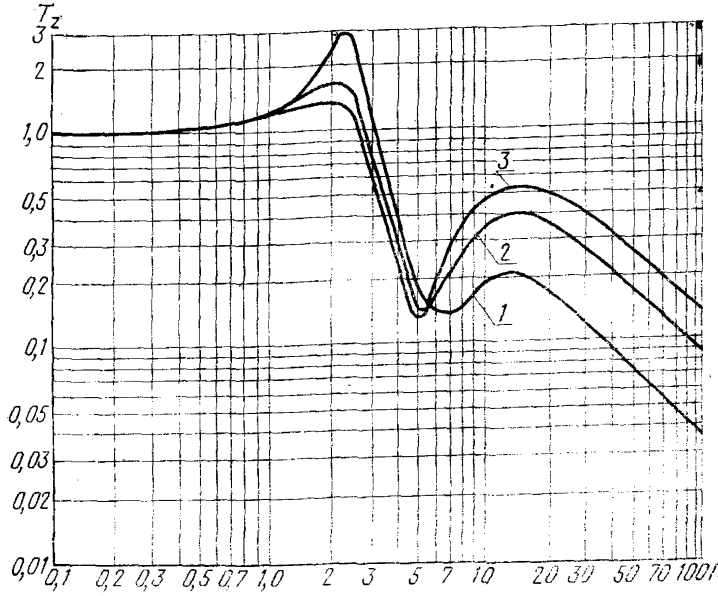
$m_c=16,5$ кг; $\xi=700$ Нс/м;

$m_ч=57,0$ кг; $c_ч=52700$ Н/м;

$c=6520$ Н/м; $\xi_ч=1070$ Нс/м.

---

* Исходные данные для графиков см. в примере расчета.



1—график T_z при $\frac{\omega_ч}{\omega_0}=2$, $D=0{,}2$; *2*—график T_z при $\frac{\omega_ч}{\omega_0}=2$, $D=0{,}5$; *3*—график T_z при $\frac{\omega_ч}{\omega_0}=2$, $D=0{,}7$

Черт. 2

Характеристикой кинематического возбуждения служит скорость основания сиденья, изменяющаяся по гармоническому закону с амплитудой и частотой

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_0=0{,}12 \text{ м/с}; \quad f=3 \text{ Гц}.$$

Вспомогательные величины

$$m=16{,}5+57=73{,}5 \text{ кг}; \qquad \frac{m_c}{m}=\frac{16{,}5}{73{,}5}=0{,}225;$$

$$\omega_0=\sqrt{\frac{6520}{73{,}5}}=9{,}42 \text{ с}^{-1}; \qquad \omega_ч=\sqrt{\frac{52700}{53{,}5}}=31{,}4 \text{ с}^{-1};$$

$$D=\frac{700}{2\cdot\sqrt{6520\cdot 73{,}5}}=0{,}5; \qquad \frac{\omega_ч}{\omega_0}=\frac{31{,}4}{9{,}42}=3{,}33;$$

$$D_ч=\frac{1070}{2\sqrt{527000\cdot 53{,}5}}=0{,}32;$$

$$\omega=2\pi\cdot 3=18{,}8 \text{ с}^{-1}; \qquad \frac{\omega}{\omega_0}=\frac{18{,}8}{9{,}42}=2.$$

Порядок расчета

1. Для формул (1) и (2) подсчитываем

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\sqrt{\left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\frac{m_c}{m}-\left(\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)^2\right]^2+\left(2\frac{\omega}{\omega_0}\frac{\omega_ч}{\omega_0}D_ч\right)^2}=$$

$$=2^2\sqrt{(2^2\cdot0{,}225-3{,}33^2)^2+(2\cdot2\cdot3{,}33\cdot0{,}32)^2}=47{,}2;$$

$$\left\{\left(\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)^2-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\left[-\frac{m_c}{m}\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2+\left(\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)^2+4DD_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}+1\right]\right\}^2=[3{,}33^2-2^2(-$$

$$-0{,}225\cdot2^2+3{,}33^2+4\cdot0{,}5\cdot0{,}32\cdot3{,}33+1)]^2=1779;$$

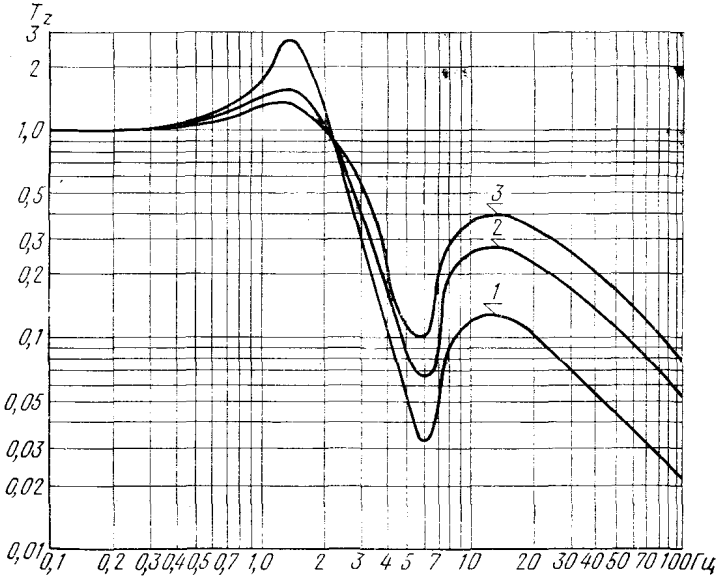
$$4\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\left[\left(D_ч+D\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)\frac{\omega_ч}{\omega_0}-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\left(D+D_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)\right]^2=4\cdot2^2[(0{,}32+$$

$$+0{,}5\cdot3{,}33)3{,}33-2^2(0{,}5+0{,}32\cdot3{,}33)]^2=2{,}0;$$

$$\left[\left(\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)^2-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\left(1+4DD_ч\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)\right]^2+4\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\left[\frac{\omega_ч}{\omega_0}\left(D_ч+D\frac{\omega_ч}{\omega_0}\right)-D\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2=$$

$$=[3{,}33^2-2^2(1+4\cdot0{,}5\cdot0{,}32\cdot3{,}33)]^2+4\cdot2^2[3{,}33(0{,}32+0{,}5\cdot3{,}33)-$$

$$-0{,}5\cdot2^2]^2=331.$$



1—график T_z при $\frac{\omega_ч}{\omega_0}=3{,}33$, $D=0{,}2$; *2*—график T_z при $\frac{\omega_ч}{\omega_0}=3{,}33$, $D=0{,}5$;

3—график T_z при $\frac{\omega_ч}{\omega_0}=3{,}33$, $D=0{,}7$

Черт. 3

Тогда

$$T_x = \frac{47,2}{\sqrt{1779+2}} = 1,14;$$

$$T_z = \frac{\sqrt{331}}{\sqrt{1779+2}} = 0,43.$$

2. $K_{эф} = \frac{1}{0,43} = 2,3.$

Система виброизоляции дает снижение вибрации в 2,3 раза.

3. Подсчитывают $\left(\frac{dz}{dt}\right)_0$; $\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0$; x_0 по формулам табл. 3 приложения 5.

$$\left(\frac{dz}{dt}\right)_0 = 0,43 \cdot 0,12 = 0,052 \text{ м/с};$$

$$\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0 = 0,43 \cdot 0,12 \cdot 18,8 = 1,0 \text{ м/с}^2;$$

$$x_0 = 1,14 \cdot \frac{0,12}{18,8} = 0,007 \text{ м}$$

4. Частота $f = 3$ Гц находится в октавной полосе 4 Гц.

$$\sigma_v = \frac{0,052}{1,41} = 0,04 \text{ м/с};$$

$$\sigma_a = \frac{1,0}{1,41} = 0,7 \text{ м/с}^2$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 7
Рекомендуемое

МЕТОДИКА ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ПРИ ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ СИЛЫ

Расчетная схема системы виброизоляции представлена на черт. 1*б* приложения 3. Система оборудования симметричными упорами, ограничивающими перемещение сиденья при работе на сжатии и на отдаче. Возникающие в системе виброизоляции восстанавливающая сила и сила сухого трения соответствуют случаю 1 приложения 4. Наличие сухого трения и упоров делают систему нелинейной.

Расчет можно проводить для случая, когда известна одна из следующих кинематических характеристик движения основания:

перемещение;

скорость;

ускорение.

I. ГАРМОНИЧЕСКОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Некоторые особенности характера движения нелинейной системы виброизоляции

1. Сухое трение, имеющееся в системе, может вызвать заклинивание сиденья (сиденье не перемещается относительно основания). Заклинивание происходит, когда сила инерции меньше силы сухого трения, то есть при сравнительно малых амплитудах и частотах.

2. Ограниченность свободного хода при сравнительно больших амплитудах возбуждения может вызвать удар об упор. При жестких упорах это может привести к «стуку на упорах».

3. Существуют такие возбуждения, при которых возможно несколько режимов колебания. В случае линейной характеристики восстанавливающей силы, рассматриваемой в данном приложении, возможны два режима колебаний, один из которых удар об упор.

Цель расчета

Определение характера движения (проверка на заклинивание и на возможность возникновения удара об упор).

Определение x_0, $K_{эф}$, $\left(\frac{dz}{dt}\right)_0$, $\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0$.

Определение среднеквадратического значения скорости (ускорения) и сравнение с допустимым для соответствующей октавы значением.

Метод расчета

Излагаемая ниже методика приближенного расчета основана на применении метода гармонической линеаризации.

Исходные данные:

m_c, $m_ч$, c, ξ d, F_0.

Исходные данные по возбуждению для различных случаев кинематических характеристик движения основания указаны в табл. 2 приложения 5.

Вспомогательные величины:

$$m=m_c+m_ч;\quad \omega^*=\sqrt{\frac{c}{m}};\quad D=\frac{\xi}{2\sqrt{cm}};$$

$$Q=\frac{4F_0}{\pi cd};\quad \omega=2\pi f;\quad \vartheta=\frac{\omega}{\omega^*}.$$

Вспомогательная безразмерная величина b определяется по формулам, приведенным в табл. 1 для различных случаев кинематических характеристик движения основания.

Таблица 1

Способ определения движения основания	Формулы для определения b
1. Перемещением	$\frac{y_0}{d}$
2. Скоростью	$\frac{1}{\omega d}\left(\frac{dy}{dt}\right)_0$
3. Ускорением	$\frac{1}{\omega^2 d}\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0$

$$a_1=\frac{b\vartheta^2-Q}{2D\vartheta};\quad \lambda_2=\sqrt{\vartheta^2+0{,}924\sqrt{\vartheta^4b^2-(Q+1{,}85D\vartheta)^2}}$$

Определение характера движения

Характер движения определяют в зависимости от значений a_1 и λ_2 по табл. 2.

Расчет численных характеристик

Порядок расчета

1. Для $a_1\leqslant 0$ $x_0=0$.

Для $a_1>0$ x_0 определяют по формуле

$$x_0=\frac{-B+\sqrt{B^2+AC}}{A}d,$$

где

$$A=(1-\vartheta)^2+(2D\vartheta)^2;$$
$$B=2D\vartheta Q;$$
$$C=b^2\vartheta^4-Q^2.$$

x_0 должно удовлетворять условию

$$0<x_0<1{,}08d$$

Если x_0 не удовлетворяет указанному условию, то режима колебания с этим значением x_0 не существует.

2. Определяют T_x, T_z, $K_{эф}$ по формулам:

$$T_x=\frac{x_0}{bd};\quad T_z=\sqrt{T_x^2\left(\frac{2}{\vartheta^2}-1\right)+1};\quad K_{эф}=\frac{1}{T_z}.$$

Таблица 2

Значения параметров			Характер движения	
a_1	ϑ	λ_2	Заклинивание сухим трением	Удар об упор
$a_1 \leqslant 0$	—	—	Есть	Нет
$0 < a_1 < 1{,}08$	—	—	Нет	Нет
$a_1 = 1{,}08$	$\vartheta < 1$	—	Нет	Нет
	$\vartheta \geqslant 1$	—	Нет	Возможен
$a_1 > 1{,}08$	$\vartheta < 1$	$\lambda_2 < 1$	Нет	Нет
		$\lambda_2 \geqslant 1$	Нет	Возможен
	$\vartheta \geqslant 1$	—	Нет	Возможен

3. Далее расчет ведут по пп. 3 и 4 разд. I приложения 5.

Примеры расчета

Пример 1

Исходные данные:

$m_c = 16{,}5$ кг; $m_ч = 57{,}0$ кг; $c = 6520$ Н/м;
$\xi = 700$ Н · с/м; $d = 0{,}06$ м; $F_0 = 100$ Н.

Характеристикой кинематического возбуждения служит скорость основания сиденья, изменяющаяся по гармоническому закону, причем

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_0 = 0{,}126 \text{ м/с}; \quad f = 4 \text{ Гц}.$$

Вспомогательные величины

$$m = 16{,}5 + 57{,}0 = 73{,}5 \text{ кг};$$

$$\omega^* = \sqrt{\frac{6520}{73{,}5}} = 9{,}42 \text{ с}^{-1};$$

$$D = \frac{700}{2\sqrt{6520 \cdot 73{,}5}} = 0{,}5;$$

$$Q = \frac{4 \cdot 100}{\pi 6520 \cdot 0{,}06} = 0{,}32;$$

$$\omega = 2\pi \cdot 4 = 25{,}1 \ \text{с}^{-1};$$

$$\vartheta = \frac{25{,}1}{9{,}42} = 2{,}67;$$

$$b = \frac{0{,}126}{0{,}06 \cdot 25{,}1} = 0{,}084;$$

$$a_1 = \frac{0.084 \cdot 2{,}67^2 - 0{,}32}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67} = 0{,}103;$$

$$\lambda_2 = \sqrt{2{,}67^2 + 0{,}924\sqrt{2{,}67^4 \cdot 0{,}084^2 - (0{,}32 + 1{,}85 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67)^2}} =$$

$$= \sqrt{7{,}13 + 2{,}67i} \ \text{— мнимое число.}$$

Определение характера движения

По табл. 2 рассматриваемый случай ($a_1 = 0{,}103$) принадлежит строке, где $0 < a_1 < 1{,}08$. Как видно из табл. 2, в системе не происходит заклинивания сухим трением и невозможен удар об упор.

Расчет численных характеристик

Порядок расчета

1. Поскольку $a_1 = 0{,}103 > 0$, то подсчитываем

$$A = (1 - 2{,}67^2)^2 + (2 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67)^2 = 44{,}5;$$

$$B = 2 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67 \cdot 0{,}32 = 0{,}852;$$

$$C = 0{,}084^2 \cdot 2{,}67^4 - 0{,}32^2 = 0{,}257;$$

$$x_0 = \frac{-0{,}852 + \sqrt{0{,}852^2 + 44{,}5 \cdot 0{,}257}}{44{,}5} \cdot 0{,}06 = 0{,}0035 \ \text{м};$$

$$1{,}08d = 1{,}08 \cdot 0{,}06 = 0{,}065 \ \text{м};$$

x_0 удовлетворяет условию $0 < x_0 < 1{,}08d$.

Поскольку в рассматриваемом примере невозможен удар об упор, то система будет совершать гармонические колебания с амплитудой

$$x_0 = 0{,}0035 \ \text{м}.$$

2. Подсчитываем

$$T_x = \frac{0{,}0035}{0{,}084 \cdot 0{,}06} = 0{,}7;$$

$$T_z = \sqrt{0{,}7^2\left(\frac{2}{2{,}67^2} - 1\right) + 1} = 0{,}8;$$

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{0{,}8} = 1{,}25.$$

3. Далее расчет ведут по пп. 3 и 4 разд. 1 приложения 5.

Пример 2

Исходные данные:

$$m_{\text{с}} = 16{,}5 \ \text{кг}; \ m_{\text{ч}} = 57{,}0 \ \text{кг}; \ c = 6520 \ \text{Н/м};$$

$$\xi = 700 \ \text{Н} \cdot \text{с/м}; \ d = 0{,}06 \ \text{м}; \ F_0 = 100 \ \text{Н}.$$

Характеристикой кинематического возбуждения служит скорость основания сиденья, изменяющаяся по гармоническому закону, причем

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_0 = 0{,}03 \text{ м/с}; f = 4 \text{ Гц}.$$

Вспомогательные величины

Значения величин m, ω *, D, ϑ, ω , Q те же, что и в примере 1.

$$b = \frac{0{,}03}{0{,}06 \cdot 25{,}1} = 0{,}02;$$

$$a_1 = \frac{0{,}02 \cdot 2{,}67^2 - 0{,}32}{2 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67} = -0{,}07;$$

$$\lambda_2 = \sqrt{2{,}67^2 + 0{,}924\sqrt{2{,}67^4 \cdot 0{,}02^2 - (0{,}32 + 1{,}85 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}67)^2}}$$

— мнимое число.

Определение характера движения

По табл. 2 рассматриваемый случай ($a_1 = -0{,}07$) принадлежит строке, где $a_1 \leqslant 0$. Как видно из таблицы, происходит заклинивание сиденья сухим трением, удар об упор невозможен.

Расчет численных характеристик

Порядок расчета

1. Поскольку $a_1 = -0{,}07 < 0$, то $x_0 = 0$.
2. Подсчитываем

$$T_x = \frac{0}{0{,}02 \cdot 0{,}06} = 0;$$

$$T_z = \sqrt{0\left(\frac{2}{2{,}67^2} - 1\right) + 1} = 1$$

$$K_{эф} = \frac{1}{1} = 1;$$

3. Далее расчет ведут по пп. 3 и 4 и разд. I приложения 5.

Пример 3

Исходные данные:

$m_c = 16{,}5$ кг; $m_ч = 57{,}0$ кг; $c = 6520$ Н/м;
$\xi = 700$ Н · с/м; $d = 0{,}06$ м; $F_0 = 100$ Н.

Характеристикой кинематического возбуждения служит ускорение основания сиденья, изменяющееся по гармоническому закону, причем

$$\left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)_0 = 8 \text{ м/с}^2; f = 1 \text{ Гц}.$$

Вспомогательные величины

Значения величин m, ω *, D, Q те же, что и в примере 1

$$\omega = 2\pi \cdot 1 = 6{,}28 \text{ с}^{-1};$$

$$\vartheta = \frac{6,28}{9,42} = 0,667;$$

$$b = \frac{8}{6,28^2 \cdot 0,06} = 3,39;$$

$$a_1 = \frac{3,39 \cdot 0,667^2 - 0,32}{2 \cdot 0,5 \cdot 0,667} = 1,78;$$

$$\lambda_2 = \sqrt{0,667^2 + 0,924\sqrt{0,667^4 \cdot 3,39^2 - (0,32 + 1,85 \cdot 0,5 \cdot 0,667)^2}} = 1,24.$$

Определение характера движения

По табл. 2 рассматриваемый случай ($a_1 = 1,78$) принадлежит строке, где $a_1 > 1,08$. Как видно из таблицы, в рассматриваемом примере сиденье не заклинивается сухим трением. Для определения возможности удара об упор следует обратиться к значению ϑ. В нашем случае $\vartheta = 0,667 < 1$, поэтому смотрим на значение λ_2. Поскольку $\lambda_2 = 1,24 > 1$, то согласно табл. 2 возможен удар об упор.

Расчет численных характеристик

Порядок расчета

1. Поскольку $a_1 = 1,78 > 0$, то подсчитываем

$$A = (1 - 0,667^2)^2 + (2 \cdot 0,5 \cdot 0,667)^2 = 0,753;$$

$$B = 2 \cdot 0,5 \cdot 0,667 \cdot 0,32 = 0,214;$$

$$C = 3,39^2 \cdot 0,667^4 - 0,32^2 = 2,15;$$

$$x_0 = \frac{-0,214 + \sqrt{0,214^2 + 0,753 \cdot 2,15}}{0,753} \cdot 0,06 = 0,085 \text{ м};$$

$$1,08d = 1,08 \cdot 0,06 = 0,065 \text{ м};$$

x_0 не удовлетворяет условию

$$0 < x_0 < 1,08d.$$

Следовательно, не существует режима гармонических колебаний с амплитудой $x_0 = 0,085$ м, будет наблюдаться удар об упор, возможность которого была показана выше.

II. СЛУЧАЙНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ

Цель расчета

Определение среднеквадратических значений скоростей (ускорений) для каждой из октавных полос и сравнение их с допустимыми.

Определение σ_x и сравнение его с d. Определение вероятности удара об упор.

Метод расчета

Излагаемая ниже методика приближенного расчета основана на применении метода статистической линеаризации.

Исходные данные:

m_c, $m_т$, c, ξ, d, F_0.

Кинематическим возбуждением является случайное стационарное движение основания. Характеристикой его служит ускорение основания. Для упрощения расчета оценку спектральной плотности аппроксимируем аналитической функцией вида

$$\tilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)=\frac{2\alpha\sigma_0^2}{\pi}\cdot\frac{\omega^2+d^2+\beta^2}{[\omega^2-(\alpha^2+\beta^2)]^2+4\alpha^2\omega^2},$$

где a, β, σ_0 — параметры;

σ_0 — среднеквадратическое значение ускорения основания.

Вспомогательные величины

$$m=m_c+m_ч;\quad \omega^*=\sqrt{\frac{c}{m}};\quad D=\frac{\xi}{2\sqrt{cm}};\quad \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_0 m}{F_0}\right)^2;$$

$$\frac{\alpha^2+\beta^2}{\omega^{*2}};\quad \frac{\alpha}{\omega^*}.$$

Порядок расчета

В координатной плоскости $D_{пр}\,w$ для $D\leqslant D_{пр}<1$ строим кривые

$$w_1(D_{пр})=\left(1-\frac{\alpha^2+\beta^2}{\omega^{*2}}\right)^2+4\left(D_{пр}+\frac{\alpha}{\omega^*}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega^*}+D_{пр}\frac{\alpha^2+\beta^2}{\omega^{*2}}\right);$$

$$w^2(D_{пр})=\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_0 m}{F_0}\right)^2\cdot\frac{(D_{пр}-D)^2}{D_{пр}}\cdot\left[\frac{\alpha}{\omega^*}+\left(2D_{пр}+\frac{\alpha}{\omega^*}\right)\frac{\alpha^2+\beta^2}{\omega^{*2}}\right]$$

Абсцисса точки пересечения кривых w_1, w_2 дает значение $D_{пр}$. Дальнейший расчет проводят по разд. III приложения 5. При расчете принимаем $D=D_{пр}$, $\omega_0=\omega^*$.

Пример расчета

Исходные данные:

$m_c=16{,}5$ кг; $\xi=420$ кг/с;

$m_ч=57{,}0$ кг; $d=0{,}06$ м;

$c=6520$ кг/с^2; $F_0=50$ Н.

Характеристикой случайного стационарного возбуждения служит ускорение основания. Оценка спектральной плотности аппроксимирована аналитической функцией

$$\tilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)=\frac{2\alpha\sigma_0^2}{\pi}\cdot\frac{\omega^2+\alpha^2+\beta^2}{[\omega^2-(\alpha^2+\beta^2)]^2+4\alpha^2\omega^2},$$

где $\alpha=1{,}9$ с$^{-1}$; $\beta=18$ с$^{-1}$; $\sigma_0=2{,}7$ м/с^2.

Вспомогательные величины

$$m=16{,}5+57{,}0=73{,}5 \text{ кг};$$

$$\omega^*=\sqrt{\frac{6520}{73{,}5}}=9{,}42 \text{ с}^{-1};$$

$$D=\frac{420}{2\sqrt{6520\cdot 73{,}5}}=0{,}3;$$

$$\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_0 m}{F_0}\right)^2=\frac{1}{2}\left(\frac{2{,}7\cdot 73{,}5}{50}\right)^2=8;$$

$$\frac{\alpha^2+\beta^2}{\omega^{*2}}=\frac{1,9^2+18^2}{9,42^2}=3,71;$$

$$\frac{\alpha}{\omega^*}=\frac{1,9}{9,42}=0,2.$$

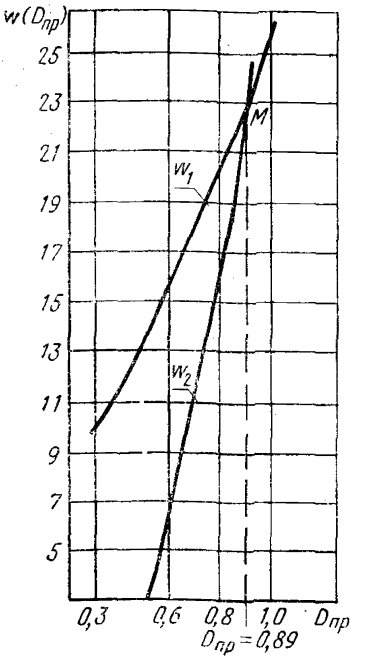
Порядок расчета

В координатной плоскости $D_{пр}$, w для $0,3\leqslant D_{пр}<1$ строим кривые

$$w_1(D_{пр})=(1-3,71)^2+4(D_{пр}+0,2)\cdot(0,2+3,71D_{пр})=14,8D_{пр}^2+$$
$$+3,76D_{пр}+7,5;$$

$$w_2(D_{пр})=8\frac{(D_{пр}-0,3)^2}{D_{пр}}[0,2+(2D_{пр}+0,2)\cdot 3,71]=$$
$$=\frac{(D_{пр}-0,3)^2}{D_{пр}}(59,4D_{пр}+7,53).$$

Графики кривых w_1, w_2 показаны на чертеже. Кривые w_1, w_2 пересекаются в точке M, абсцисса которой $D_{пр}=0,89$. Дальнейший расчет проводят по разд. III приложения 5, где полагаем $D=0,89$; $\omega_0=9,42$ с$^{-1}$.



ПРИЛОЖЕНИЕ 8
Рекомендуемое

МЕТОДИКА ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ СИЛЫ

Расчетная схема системы виброизоляции представлена на черт. 1*б* приложения 3. Система оборудована симметричными упорами, ограничивающими перемещение сиденья при работе на сжатии и на отдаче.

Возникающие в системе восстанавливающая сила и сила сухого трения соответствуют случаю 2 приложения 4, где приведены формулы для этих сил, причем $d_0 \geqslant 0{,}42d$.

Наличие сухого трения, упоров и восстанавливающей силы с нелинейной характеристикой делают систему виброизоляции нелинейной.

Расчет можно вести для случая, когда известна одна из следующих кинематических характеристик движения основания:

перемещение;

скорость;

ускорение.

Гармоническое возбуждение

Особенность характера движения нелинейной системы виброизоляции

Рассматриваемая система виброизоляции обладает особенностями, перечисленными в разд. I приложения 7. Но в случае нелинейной характеристики восстанавливающей силы режимов колебаний может быть больше, чем указано в п. 3. Существуют такие возбуждения, когда кроме удара об упор может быть до трех режимов колебаний.

Цель расчета

Определение характера движения (проверить на заклинивание и на возможность возникновения удара об упор. Проверить, работает ли система на линейном участке характеристики $F_в$).

Определение x_0, $K_{эф}$, $\left(\frac{dz}{dt}\right)_0$, $\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_0$.

Сравнение среднеквадратического значения скорости (ускорения) с допустимым для соответствующей октавы значением.

Метод расчета

Излагаемая ниже методика приближенного расчета основана на применении метода гармонической линеаризации.

Исходные данные:

$m_с$, $m_ч$, c, c_0, d, d_0, ξ, F_0.

Исходные данные по возбуждению для различных случаев кинематических характеристик движения основания указаны в табл. 1 приложения 5.

Вспомогательные величины:

$$m=m_c+m_ч;\ n=\frac{d_0}{d};\ 1{,}08n;\quad e=\frac{c_0}{c};\quad \omega^*=\sqrt{\frac{c}{m}};$$

$$D=\frac{\xi}{2\sqrt{cm}};\quad Q=\frac{4F_0}{\pi cd};\quad \omega=2\pi f;\ \vartheta=\frac{\omega}{\omega^*}\ .$$

Вспомогательную безразмерную величину b определяют по формулам, приведенным в таблице приложения 7 для различных случаев кинематических характеристик движения основания

$$a_1=\frac{b\vartheta^2-Q}{2D\vartheta},\qquad \lambda_1=\sqrt{1+0{,}854(e-1)(1-n)}\ ;$$

$$\lambda_2=\sqrt{\vartheta^2+0{,}924\sqrt{\vartheta^4b^2-(Q+1{,}85D\vartheta)^2}}.$$

Определение характера движения

Характер движения определяют в зависимости от значений a_1, ϑ, λ_1 и λ_2 по таблице. При $0<a_1\leqslant 1{,}08n$ система работает на линейном участке характеристики восстанавливающей силы.

Расчет численных характеристик

при $a_1\leqslant 1{,}08n$ расчет проводят по пп. 1—3 разд. I приложения 7.

Порядок расчета

1. Для $a_1>1{,}08n$ $x_0^{(1)}$, $x_0^{(2)}$, $x_0^{(3)}$ определяют по формулам[1]:

Значения параметров			Характер движения	
a_1	ϑ	λ_3	Заклинивание сухим трением	Удар об упор
$a_1\leqslant 0$	—	—	Есть	Нет
$0<a_1<1{,}08$	—	—	Нет	Нет
$a_1=1{,}08$	$\vartheta<\lambda_1$	—	Нет	Нет
	$\vartheta\geqslant\lambda_1$	—	Нет	Возможен
$a_1>1{,}08$	$\vartheta<\lambda_1$	$\lambda_2<\lambda_1$	Нет	Нет
		$\lambda_2\geqslant\lambda_1$	Нет	Возможен
	$\vartheta\geqslant\lambda_1$	—	Нет	Возможен

[1] Здесь и далее индексы в скобках вверху указывают на соответствующий режим колебаний.

$$x_0^{(1)}=\frac{-B_1+\sqrt{B_1^2+A_1C_1}}{A_1};\qquad x_0^{(2)}=\frac{-B_2+\sqrt{B_2^2+A_2C_2}}{A_2};$$

$$x_0^{(3)}=\frac{-B_2-\sqrt{B_2^2+A_2C_2}}{A_2},$$

где

$$A_1=(1-\vartheta^2)^2+(2D\vartheta)^2;$$
$$B_1=2D\vartheta Q;$$
$$C_1=b^2\vartheta^4-Q^2;$$
$$A_2=[0{,}854(e-1)+1-\vartheta^2]^2+(2D\vartheta)^2;$$
$$B_2=2D\vartheta Q-0{,}924(e-1)n[0{,}854(e-1)+1-\vartheta^2];$$
$$C_2=b^2\vartheta^4-Q^2-0{,}854(e-1)^2n^2;$$

$x_0^{(1)}$, $x_0^{(2)}$, $x_0^{(3)}$ должны удовлетворять условиям:

$$0<x_0^{(1)}\leqslant 1{,}08d_0;$$
$$1{,}08d_0\leqslant x_0^{(2)}\leqslant 1{,}08d;\qquad 1{,}08d_0\leqslant x_0^{(3)}\leqslant 1{,}08d.$$

Если какое-нибудь из указанных условий не выполняется, то режим колебаний с соответствующим значением x_0 не существует.

2. Для каждого значения x_0 вспомогательную величину λ определяют по формулам

для $x_0^{(1)}$ $\lambda=\omega^*$;

для $x^{(2)}$, $x_0^{(3)}$

$$\lambda=\omega^*\sqrt{0{,}854(e-1)+1-0{,}924(e-1)\frac{d_0}{x_0}}$$

3. Для каждой пары значений x_0, λ определяют T_x, T_z, $K_{эф}$ по формулам:

$$T_x=\frac{x_0}{bd};\qquad T_z=\sqrt{T_x^2\left[\frac{2}{\left(\frac{\omega}{\lambda}\right)^2}-1\right]+1};$$

$$K_{эф}=\frac{1}{T_z}.$$

4. Далее расчет ведут по пп. 3 и 4 разд. I приложения 5.

Пример расчета

Исходные данные:

$m_c=23$ кг; $\xi=140$ Н·с/м;
$m_q=57$ кг; $d_0=0{,}012$ м;
$c=1400$ Н/м; $d=0{,}02$ м;
$c_0=8400$ Н/м; $F_0=6{,}5$ Н.

Характеристикой кинематического возбуждения служит перемещение основания сиденья, изменяющееся по гармоническому закону, причем

$$y_0=0{,}01\text{м};\ f=2\ \text{Гц}.$$

Вспомогательные величины:

$$m=23+57=80 \text{ кг};$$

$$n=\frac{0,012}{0,020}=0,6; \quad 1,08n=1,08\cdot 0,6=0,648;$$

$$e=\frac{8400}{1400}=6;$$

$$\omega^*=\sqrt{\frac{1400}{80}}=4,18;$$

$$D=\frac{140}{2\sqrt{1400\cdot 80}}=0,2;$$

$$Q=\frac{4\cdot 6,5}{\pi\cdot 1400\cdot 0,02}=0,3;$$

$$\omega=2\pi\cdot 2=12,56 \text{ с}^{-1};$$

$$\vartheta=\frac{12,56}{4,18}=3;$$

$$b=\frac{0,01}{0,02}=0,5;$$

$$a_1=\frac{0,5\cdot 3^2-0,3}{2\cdot 0,2\cdot 3}=3,5$$

$$\lambda_1=\sqrt{1+0,854(6-1)(1-0,6)}=1,65;$$

$$\lambda_2=\sqrt{3^2+0,924\sqrt{3^4\cdot 0,5^2-(0,3+1,85\cdot 0,2\cdot 3)^2}}=3,6;$$

Определение характера движения

По таблице рассматриваемый случай ($a_1=3,5$) принадлежит строке, где $a_1>1,08$. Как видно из таблицы, система не заклинивается сухим трением. Для определения возможности удара об упор сравниваем значения ϑ и λ. В нашем примере $\vartheta=3$, $\lambda_1=1,65$, то есть случай $\vartheta>\lambda_1$, при котором возможен удар об упор.

Расчет численных характеристик

Порядок расчета

1. Поскольку $a_1=3,5$; $1,08\ n=0,648$, то $a_1=1,08n$, поэтому подсчитываем:

$$A_1=(1-3^2)^2+(2\cdot 0,2\cdot 3)^2=65,4$$

$$B_1=2\cdot 0,2\cdot 3\cdot 0,3=0,36;$$

$$C_1=0,5^2\cdot 3^4-0,3^2=20,4;$$

$$A_2=[0,854(6-1)+1-3^2]^2+(2\cdot 0,2\cdot 3)^2=15,35;$$

$$B_2=2\cdot 0,2\cdot 3\cdot 0,3-0,924(6-1)\cdot 0,6\cdot[0,854\cdot(6-1)+1-3^2]=10,66;$$

$$C_2=0,5^2\cdot 3^4-0,3^2-0,854\cdot(6-1)^20,6^2=12,4;$$

$$\sqrt{B_2^2+A_2C_2}=\sqrt{10,66^2+15,35\cdot 12,4}=17,46;$$

$$x_0^{(1)}=\frac{-0,36+\sqrt{0,36^2+65,4\cdot 20,4}}{65,4}\cdot 0,02=0,011 \text{ м}.$$

Поскольку $1,08d_0=1,08\cdot 0,012=0,013$ м, то $x_0^{(1)}=0,011$ м удовлетворяет условию $0<x_0^{(1)}\leqslant 1,08d_0$. Следовательно, возможен режим гармонических колебаний с амплитудой $x_0^{(1)}=0,011$ м

$$x_0^{(2)}=\frac{-10,66+17,46}{15,35}\cdot 0,02=0,009 \text{ м};$$

$$x_0^{(3)}=\frac{-10,66-17,46}{15,35}\cdot 0,02=-0,037 \text{ м}.$$

Поскольку $1,08d=1,08\cdot 0,02=0,0216$ м, то $x_0^{(2)}$, $x_0^{(3)}$ не удовлетворяют условию

$$1,08d_0\leqslant x_0\leqslant 1,08d,$$

поэтому режимы колебаний с амплитудами $x_0^{(2)}$, $x_0^{(3)}$ невозможны.

2. Для $x_0^{(1)}=0,011$ м; $\lambda=\omega^*=4,18$ с$^{-1}$.

3. Подсчитываем

$$T_x=\frac{0,011}{0,5\cdot 0,02}=1,1;$$

$$T_z=\sqrt{1,1^2\left[\frac{2}{\left(\frac{12,56}{4,18}\right)^2}-1\right]+1}=0,24;$$

$$K_{эф}=\frac{1}{0,24}\approx 4.$$

Система виброизоляции снижает вибрацию в четыре раза.

4. Далее расчет ведут по пп. 3 и 4 разд. I приложения 5.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9
Обязательное

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНОЙ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПАССИВНОЙ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ

Принципиальная схема гидропневматической виброизоляции сиденья приведена на чертеже. Направляющий механизм телескопического типа состоит из корпуса *1* и трубчатой направляющей *8*. Внутри направляющей установлен цилиндр *2*, закрытый снизу крышкой корпуса и сверху сквозной крышкой цилиндра *3*. В цилиндре может перемещаться шток *4* с поршнем *5*, разделяющим цилиндр на две полости: ступень основного давления *А*, заполненную смесью трансформаторного и веретенного масла, ступень «противодавления» *Б*, заполненную частично воздухом и частично жидкой смесью. Ступень основного давления сообщается с кольцевой камерой *6*, заполненной воздухом под определенным давлением. Сжатый воздух в камере *6* отделен от жидкости посредством гибкой резиновой диафрагмы *7*. Ступень «противодавления» сообщается с камерой в штоке через калиброванные отверстия.

Благодаря наличию ступени «противодавления» восстанавливающая сила создается как при ходе сжатия, так и при ходе отбоя. Диссипативная сила возникает при перемещениях поршня со штоком в цилиндре за счет перетекания жидкости из ступени основного давления в кольцевую камеру через калиброванные отверстия *9* и из ступени «противодавления» в камеру штока через калиброванные отверстия последнего.

Исходные данные:

m_c[1], $m_ч$, n, p_0, u

Вспомогательные величины:

$m = m_c + m$, $P = mg$

Порядок расчета

1. Выбираем $d_ц$. Для автономной системы подпитки подвески воздухом предпочтительным является значение от 3,0 до 6,0 см. При подпитке от воздушной системы машины $d_ц \approx \sqrt{\frac{4P}{\pi p_0}}$.

2. Выбираем $d_{шт}$ в зависимости от конструктивной схемы и диаметра цилиндра.

3. Рассчитываем

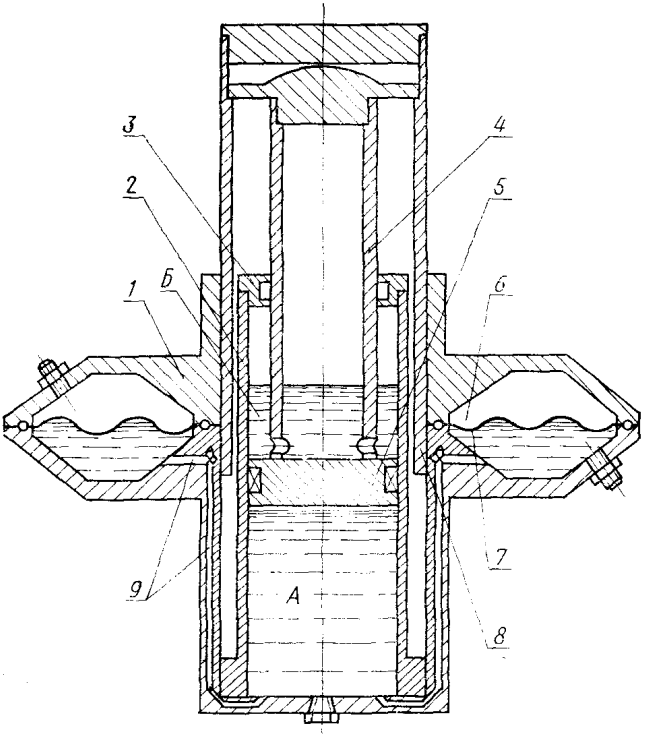
$$S_1 = \frac{\pi d_ц^2}{4}; \qquad S_2 = S_1 - \frac{\pi d_{шт}^2}{4}.$$

4. Выбираем p_1, p_2 в зависимости от подпитки системы «противодавления» и из условий

$$\frac{S_2 p_2}{S_1 p_1} \text{ от } 0{,}05 \text{ до } 0{,}20$$

$$P = S_1 p_1 - S_2 p_2.$$

[1] Величина m_c зависит от конструктивной схемы подвески и сидения в целом, но не более 12 кг.



5. Принимаем f от 1,3 до 1,5 Гц.
6. Подсчитываем

$$c_0 = f^2 4\pi^2 m.$$

7. Выбираем c_1, c_2 из условий

$$c_1 + c_2 = c_0, \quad \frac{c_2}{c_1} \text{ от } 1/4 \text{ до } 1/8.$$

8. Подсчитываем

$$V_1 = \frac{S_1^2 n p_1}{c_1}; \qquad V_2 = \frac{S_2^2 n p_2}{c_2}$$

9. Выбираем $u_{сж}$ и $u_{отб}$ из условий

$$u_{сж} + u_{отб} = u; \quad \frac{u_{отб}}{u_{сж}} \text{ от } 0{,}8 \text{ до } 1{,}0.$$

10. Рассчитываем характеристику восстанавливающей силы

$$F_в = p_1 S_1 \left(\frac{V_1}{V_1 - S_1 u}\right)^n - p_2 S_2 \left(\frac{V_2}{V_2 + S_2 u}\right)^n.$$

Если перемещение подрессоренной части сиденья равно перемещению поршня в цилиндре $u = x$, то

$$F_в = p_1 S_1 \left(\frac{V_1}{V_1 - S_1 x}\right)^n - p_2 S_2 \left(\frac{V_2}{V_2 + S_2 x}\right)^n.$$

Если это условие не выполняется, то при переходе от u к x необходимо учитывать передаточное отношение направляющего механизма подвески.

Пример расчета

Исходные данные:

$m_c=10$ кг; $m_ч=5/7\cdot 80=57$ кг; $n=1,25$; $p_0=65$ Н/см²; $a=12$ см.

Вспомогательные величины:

$$m=10+57=67 \text{ кг}; \quad P=67\cdot 9,8=670 \text{ Н}.$$

Порядок расчета

1. Подпитка подвески производится от воздушной системы машины, поэтому

$$d_ц \approx \sqrt{\frac{4\cdot 670}{\pi\cdot 65}}=3,6 \text{ см}$$

Принимаем $d_ц=3,5$ см.

2. Принимаем $d_{шт}=2,7$ см.

3. Подсчитываем

$$S_1=\frac{\pi\cdot 3,5^2}{4}=9,6 \text{ см}^2;$$

$$S_2=9,6-\frac{\pi\cdot 2,7^2}{4}=3,9 \text{ см}^2;$$

4. Поскольку ступень «противодавления» не подсчитывается, то $p_2=10$ Н/см².

Выбираем p_1 из условия

$$670=9,6p_1=3,9p_2;$$

$$p_1=\frac{670+3,9\cdot 10}{9,6}=74 \text{ Н/см}^2.$$

Проверяем

$$\frac{S_2p_2}{S_1p_1}=\frac{3,9\cdot 10}{9,6\cdot 74}=0,055.$$

5. Принимаем $f=1,5$ Гц.

6. Подсчитываем

$$c_0=1,5^2\cdot 4\pi^2\cdot 67=6150 \text{ Н/м}=61,5 \text{ Н/см}$$

7. Выбираем c_1, c_2.

Принимаем $c_2=8$Н/см, тогда

$$c_1=61,5-8=53,5 \text{ Н/см}.$$

Проверяем

$$\frac{c_1}{c_2}=\frac{8}{53,5}=1/7.$$

8. Подсчитываем

$$V_1=\frac{9,6^2\cdot 1,25\cdot 74}{53,5}=163 \text{ см}^3;$$

$$V_2=\frac{3,9^2\cdot 1,25\cdot 10}{8,0}=23,6 \text{ см}^3.$$

Принимаем $V_1=165$ см³; $V_2=24$ см³.

9. Выбираем $u_{сж}=6{,}5$ см; $u_{отб}=5{,}5$ см, тогда $u=6{,}5+5{,}5=12$ см;

$$\frac{u_{отб}}{u_{сж}}=\frac{5{,}5}{6{,}5}=0{,}85.$$

10. Подсчитываем

$$p_1S_1=74\cdot 9{,}6=710;\quad p_2S_2=10\cdot 3{,}9=39;$$

$$F_в=710\left(\frac{165}{165-9{,}6x}\right)^{1{,}25}-39\left(\frac{24}{24+3{,}9x}\right)^{1{,}25}.$$

Результаты расчета сводим в таблицу

x, см	−5,5	−5,0	−4,0	−3,0	−2,0	−1,0	0
$F_в$, Н	0	209	405	491	558	616	671

Продолжение

x, см	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
$F_в$, Н	729	796	874	963	1072	1200	1280

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

МЕТОДИКА РАСЧЕТА АКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ (ЭГВЗС)

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭГВЗС

ЭГВЗС предназначена для гашения параметров колебаний (ускорения, скорости, перемещения) в диапазоне частот 0,8÷16 Гц до уровня, удовлетворяющего требованиям действующих государственных стандартов или санитарных норм.

ЭГВЗС представляет собой многоконтурную систему автоматического регулирования с обратными связями по параметрам колебательного процесса объекта защиты.

Система (черт. 1) состоит из:

датчика абсолютного ускорения (*ДУ*) объекта защиты;

датчика перемещения (*ДП*) объекта защиты относительно основания;

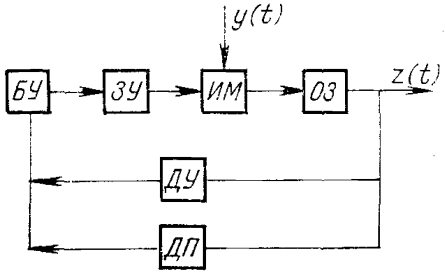
блока управления (*БУ*);

исполнительного механизма (*ИМ*);

объекта защиты (*ОЗ*);

золотникового управляющего устройства (*ЗУ*).

Сигналы обратной связи по абсолютному ускорению, относительной скорости и перемещению *ОЗ* поступают в *БУ*, выходной сигнал которого управляет золотниковым управляющим устройством *ИМ*. С выхода электромагнитного преобразователя ЗУ сигнал поступает на гидроусилитель. Перемещение платформы *ОЗ* (сиденья оператора) осуществляется штоком силового гидроцилиндра. При перемещении основания вверх (вниз) сигналы от датчиков, пройдя *БУ*, поступают на *ЗУ*. Золотник перепускает рабочую жидкость в верхнюю (нижнюю) полость гидроцилиндра, что вызывает перемещение штока вниз (вверх).



Черт. 1

Исходные данные:

$\widetilde{S}_{\ddot{y}}$, τ — выбирают по экспериментальным данным;

f_c — частота среза, принимаемая равной значению верхней границы рабочего диапазона частот.

$\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_{min}$ — минимальное входное воздействие на датчик ускорения;

$$R_{вх.м.у}=1 \text{ кОм};$$

χ, $U_{вх.\,эмп}$ — по паспортам приборов.

Порядок расчета

1. Расчет частотных характеристик идеальной ЭГВЗС.

1.1. Рассчитываем

$$U_д=\chi\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_{min}, \qquad K_a=\frac{U_{вх.эмп}}{U_д}.$$

1.2. Рассматриваем возможные значения ω_0, D. Для каждой пары ω_0, D определяют среднеквадратическое значение σ_a по формуле

$$\sigma_a=\sqrt{\int_0^\infty (M_1^2+N_1^2)\,\widetilde{S}_{ij}(\omega)d\omega},$$

где

$$M_1=\frac{K_x(K_x-K_a\omega^2)+K_v^2\omega^2}{(K_x-K_a\omega^2)^2+K_v^2\omega^2},$$

$$N_1=\frac{K_v(K_x-K_a\omega^2)\omega-K_xK_v\omega}{(K_x-K_a\omega^2)^2+K_v^2\omega^2},$$

$$K_x=\omega_0^2K_a, \quad K_v=2\omega_0DK_a.$$

1.3. Выбираем значения ω_0, D, удовлетворяющие требованиям действующих государственных стандартов или санитарных норм из условия

$$\sigma_a\leqslant\sigma_{a.доп},$$

где $\sigma_{a.доп}$ — допустимое значение σ_a.

1.4. Исходя из выбранных значений ω_0, D, рассчитываем K_x, K_v по формулам п. 1.2.

1.5. Проверяем выбор ω_0, D из условия перерегулирования

$$\frac{M_{1max}}{M_1(\omega=0)}\ll 1{,}1,$$

где $M_1(\omega)$ — определяют по формуле п. 1.2.

$$M_1(\omega=0)=1.$$

1.6. Выбираем время переходного процесса $T_р$, удовлетворяющее условиям

$$\frac{\pi}{\omega_c}\leqslant T_р\leqslant\frac{4\pi}{\omega_c}, \quad T_р\leqslant 0{,}1\ \tau_к.$$

1.7. Рассчитываем и строим амплитудно-частотную $A_2(\omega)$ и фазо-частотную $\varphi_2(\omega)$ характеристики замкнутой ЭГВЗС по относительному перемещению x:

$$A_2(\omega)=\sqrt{M_2^2+N_2^2}, \qquad \varphi_2(\omega)=\operatorname{arctg}\frac{N_2}{M_2},$$

$$M_2(\omega)=-\frac{K_a(K_x-K_a\omega^2)\omega^2}{(K_x-K_a\omega^2)^2+K_v^2\omega^2},$$

где

$$N_2(\omega)=-\frac{K_aK_v\omega^2}{(K_x-K_a\omega^2)^2+K_v^2\omega^2},$$

1.8. Рассчитываем и строим амплитудно-частотную $H_1(\omega)$ и фазочастотную $\Theta_1(\omega)$ характеристики разомкнутой ЭГВЗС по относительному перемещению

$$H_1(\omega)=\frac{1}{\sqrt{1-2\frac{\cos\varphi_2(\omega)}{A_2(\omega)}+\frac{1}{A_2(\omega)}}},$$

$$\Theta_1(\omega)=\operatorname{arctg}\frac{\sin\varphi_2(\omega)}{\cos\varphi_2(\omega)-A_2(\omega)}.$$

1.9. Рассчитываем амплитудно-частотную характеристику перемещения исполнительного механизма

$$x(\omega)=1{,}1y(\omega),$$

где

$$y(\omega)=\frac{1}{\omega^2}\sqrt{\tilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)\Delta\omega}.$$

Выбираем исполнительный механизм с амплитудно-частотной характеристикой $H_{им}(\omega)\geqslant x(\omega)$.

2. Экспериментальное определение амплитудно-фазо-частотных характеристик разомкнутой реальной ЭГВЗС по относительному перемещению.

2.1. Снимаем по блок-схеме (черт. 2) частотные характеристики разомкнутой реальной ЭГВЗС при отсутствии коррекции. Амплитудно-частотную характеристику $H_2(\omega)$ определяем как отношение сигнала с датчика перемещений вибростенда к сигналу с выхода *ДП*. Фазо-частотную характеристику $\Theta_2(\omega)$ определяем как разность фаз этих двух сигналов. Строим графики $H_2(\omega)$, $\Theta_2(\omega)$.

3. Расчет параметров корректирующего устройства.

3.1. Корректирующее устройство вводим в блок управления, если расхождение между желаемыми и реальными частотными характеристиками разомкнутой ЭРВЗС более 20%.

3.2. Строим желаемые амплитудно-частотную $H_3(\omega)$ и фазо-частотную $\Theta_3(\omega)$ характеристики корректирующего устройства по формулам:

$$\operatorname{Lg}[H_3(\omega)]=\operatorname{Lg}[H_1(\omega)]-\operatorname{Lg}[H_2(\omega)];\quad \Theta_3(\omega)=\Theta_3(\omega)-\Theta_2(\omega).$$

Определяем Θ_{3max} и соответствующую ему частоту f_m так, что

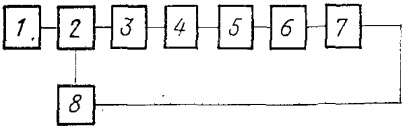
$$\Theta_3(f_m)=\Theta_{3max}.$$

3.3. Определяем коэффициент усиления $K_{кор}$ корректирующего устройства, решив уравнение

$$\Theta_{2max}=\operatorname{arctg}\frac{1}{\sqrt{K_{кор}}}-\operatorname{arctg}\sqrt{K_{кор}}.$$

3.4. Корректирующим устройством служит дифференцирующий контур постоянного тока, показанный на черт. 3. Выбираем R_2 из условия $R_2\gg R_{вх.м.у.}$ Сопротивление R_1 рассчитываем по формуле

$$R_1=R_2\frac{1-K_{кор}}{K_{кор}}.$$



1 — низкочастотный генератор периодических колебаний; *2* — вибростенд; *3* — датчик ускорений; *4* — блок управления; *5* — исполнительный механизм; *6* — датчик относительного перемещения; *7* — осциллограф; *8* — датчик перемещения вибростенда

Черт. 2

3.5. Рассчитываем величину емкости по формуле

$$C=\frac{1}{2\pi f_m R_1 \sqrt{K_{кор}}},$$

где f_m — частота, на которой $\Theta_3(f_m)=\Theta_{3max}$.

3.6. Рассчитываем и строим фазо-частотную характеристику реального корректирующего устройства по формуле

$$\varphi_4(\omega)=\operatorname{arctg}\omega T_1-\operatorname{arctg}\omega T_2,$$

где T_1 — постоянная времени контура по производной ($T_1=R_1C$);

T_2 — постоянная времени отставания.

4. Определение заноса устойчивости системы.

4.1. Снимаем по блок-схеме (черт. 2), где в блок управления включено корректирующее устройство, и строим логарифмическую амплитудно-частотную $H_5(\omega)$ и фазо-частотную $\Theta_5(\omega)$ характеристики по относительному перемещению разомкнутой скорректированной системы.

4.2. Определяем ω_1 из условия $\Theta_5(\omega_1)=-\pi$. Система устойчива по амплитуде, когда

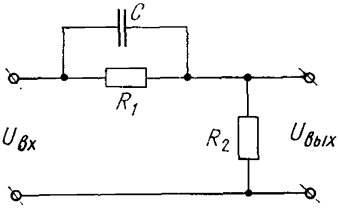
$$|Lg\, H_5(\omega_1)|\geqslant \text{от 6 до 7 дБ}.$$

Если в рабочем диапазоне частот $\Theta_5(\omega)\neq\pi$, то система устойчива по амплитуде.

4.3. Определяем ω_2 из условия $H_5(\omega_2)=0$.

Система устойчива по фазе, если

$$180°+\Theta_5(\omega_2)\geqslant \text{от 40 до 45°}.$$



Черт. 3

5. Определение эффективности ЭГВЗС

5.1. Рассчитываем квадрат амплитудно-частотной характеристики скорректированной ЭГВЗС по абсолютному ускорению

$$[A_1(\omega)]^2=M_1^2+N_1^2,$$

где $M_1(\omega)$, $N_1(\omega)$ см. п. 1.2.

5.2. Рассчитываем

$$\tilde{S}_{\ddot{z}}(\omega)=[A_1(\omega)]^2\,\tilde{S}_{\ddot{y}}(\omega).$$

5.3. Рассчитываем и сравниваем их с допустимыми среднеквадратическими скоростями в октавных полосах частот

$$\sigma_v(n)=\frac{\sigma_a(n)}{2\pi\bar{f}},$$

где

$$\sigma_a(n)=\sqrt{\int_{\omega_н}^{\omega_в}\tilde{S}_{\ddot{z}}(\omega)\,d\omega};$$

$\omega_н$, $\omega_в$ — нижняя и верхняя граничные угловые частоты октавных полос;

$\tilde{f}$ — среднегеометрическое значение частоты октавной полосы.

Пример расчета

Исходные данные:

Пусть оценка спектральной плотности ускорения основания аппроксимируется аналитической функцией

$$\tilde{S}_{\ddot{y}}(\omega)=\frac{2\alpha\sigma_0^2}{\pi}\cdot\frac{\omega^2+\alpha^2+\beta^2}{[\omega^2-(\alpha^2+\beta^2)]^2+4\alpha^2\omega^2},$$

где $\alpha=1{,}9\ с^{-1}$; $\beta=18\ с^{-1}$; $\sigma_0=2{,}7\ м/с^2$;

σ_0 — среднеквадратическое значение ускорения основания;

$\tau_к$ от 1,0 до 1,5 с; $U_{вх.эмп}=1В$; $R_{вх.м.у}=1$ кОм;

$\left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)_{min}=0{,}01\,lg$; $f_с=16$ Гц; $\varkappa=100$ мВ/g.

Порядок расчета

1. Расчет частотных характеристик идеальной ЭГВЗС.

1.1. $U_D=100$ мВ/$g\cdot 0{,}01g=1$ мВ. $K_a=\frac{1В}{1мВ}=1000$;

1.2. Результаты расчетов σ_a сводим в табл. 1.

Таблица 1

м/с²

D	f_0, Гц / ω_0, $с^{-1}$						
	0,1 / 0,63	0,3 / 1,88	0,5 / 3,14	1,0 / 6,28	1,5 / 9,42	2,0 / 12,56	3,0 / 18,84
0,1	0,39	0,71	0,93	1,53	2,57	4,47	10,5
0,5	0,22	0,41	0,60	1,03	2,08	2,87	5,0
1,0	0,21	0,39	0,54	1,0	2,39	2,8	3,8
1,2	0,21	0,39	0,53	1,11	2,46	2,8	3,1
1,4	0,21	0,39	0,53	1,13	2,51	2,8	3,0

1.3. Для обеспечения выполнения действующих санитарных норм, пользуясь табл. 1, принимаем $\omega_0=11,88$ с$^{-1}$ ($f_0=0,3$ Гц), $D\geqslant 1,0$, при которых $\sigma=0,4$ м/с^2.

1.4. Подсчитываем

$$K_x=1,88^2\cdot 1000=3546 \text{ с}^{-2};$$

$$K_v=2\cdot 1,88\cdot 1\cdot 1000=3760 \text{ с}^{-1}.$$

1.5 .Результаты расчета $M_{1\max}$ для различных $D\geqslant 1,0$ показаны в табл. 2.

Таблица 2

D	1,0	1,2	1,4
$M_{1\max}$	1,1	1,0	1,0

Условие перерегулирования при $D\geqslant 1,0$ выполняется.

1.6. Поскольку $\omega_c=2\pi f_c=100$ с$^{-1}$; $\frac{\pi}{\omega_c}=0,03$ с;

$\frac{4\pi}{\omega_c}=0,12$ с; $0,1\tau_к$ от 0,10 до 0,15 с,

то

$$0,03 \text{ с}\leqslant T_p\leqslant 0,12 \text{ с},$$

$T_p\leqslant$ от 0,1 до 0,15 с.

Принимаем $T_р=0,1$ с.

1.7. Результаты расчета $A_2(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ показаны на черт. 4 и 5.

1.8. Результаты расчета $H_1(\omega)$, $\Theta_1(\omega)$ показаны на черт. 6.

1.9. Результаты расчета $x(\omega)$, подсчитанные для $\Delta f=0,5$ Гц ($\Delta\omega=3,14c^{-1}$) приведены в табл. 3.

Таблица 3

f, Гц	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$x(\omega)$, см	3,42	0,97	0,55	0,46	0,54	0,56

Продолжение табл. 3

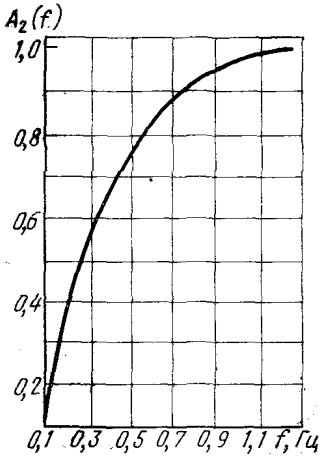
f, Гц	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
$x(\omega)$, см	0,14	0,06	0,04	0,02	0,02	0,01

2. Экспериментальное определение амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик разомкнутой реальной ЭГВЗС.

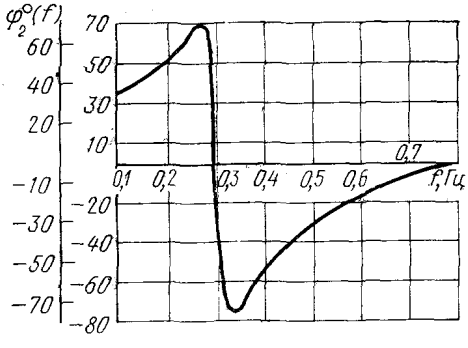
2.1. $H_2(\omega)$, $\Theta_2(\omega)$ показаны на черт. 7.

3. Расчет параметров корректирующего устройства.

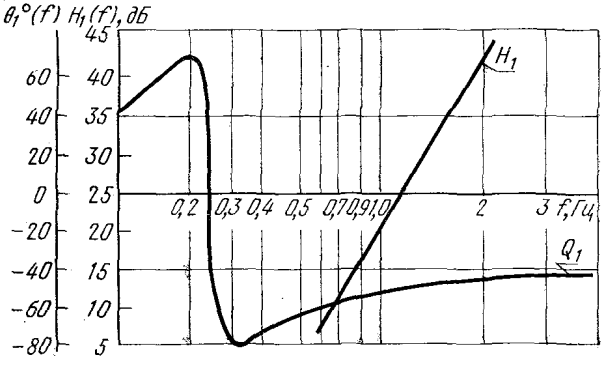
3.1. Поскольку расхождение между реальными и желаемыми частотными характеристиками разомкнутой ЭГВЗС (черт. 6 и 7) превышает 20% необходимо ввести корректирующее устройство.



Черт. 4



Черт. 5



Черт. 6

3.2. $H_3(\omega)$, $\Theta_3(\omega)$ показаны на черт. 8. $\Theta_{3max}=70°$, $f_m=10$ Гц.

3.3. Решив уравнение

$$70°=\operatorname{arctg}\frac{1}{\sqrt{K_{кор}}}-\operatorname{arctg}\sqrt{K_{кор}},$$

получаем $K_{кор}=0{,}1$.

3.4. Поскольку $R_{вх\cdot м\cdot у}=1$ кОм, то принимаем $R_2=10$ кОм.

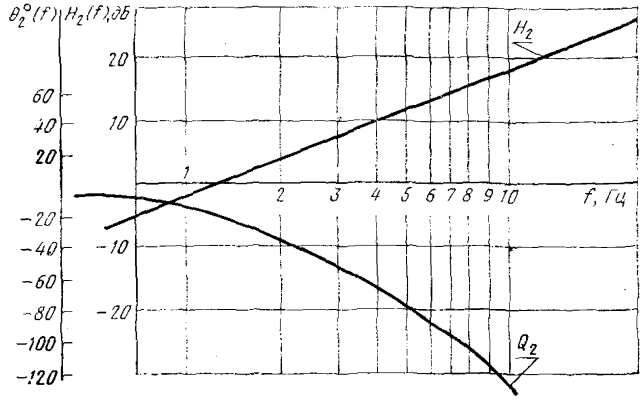
3.5. $$C=\frac{1}{2\pi\cdot 10\cdot 9\cdot 10^4\sqrt{0{,}1}}\approx 0{,}7 \text{ мкФ}.$$

3.6. Фазо-частотная характеристика реального корректирующего устройства показана на черт. 9.

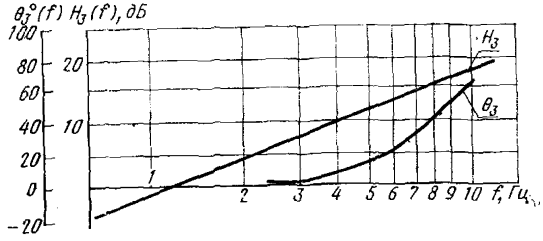
4 .Определение запаса устойчивости системы

4.1. $H_5(\omega)$, $\Theta_5(\omega)$ построены на черт. 10.

4.2. Поскольку в диапазоне частот от 0 до 16 Гц $\Theta_5(\omega) \neq \pi$, то система устойчива по амплитуде.



Черт. 7



Черт. 8

4.3. $f_2 = 1{,}3$ Гц; $\Theta_5(1{,}3) = -35°$.

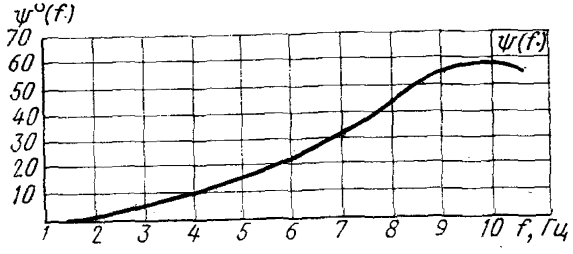
Запас устойчивости по фазе составляет 145°, то есть условие устойчивости по фазе выполняется.

5. Определение эффективности ЭГВЗС

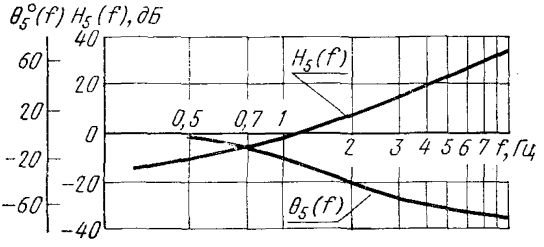
5.1. Результаты расчета $[A_1(\omega)]^2$ показаны на черт. 11.

5.2. Оценки спектральной плотности $\widetilde{S}_{\dot{y}}(\omega)$, $\widetilde{S}_{\dot{z}}(\omega)$ представлены на черт. 12.

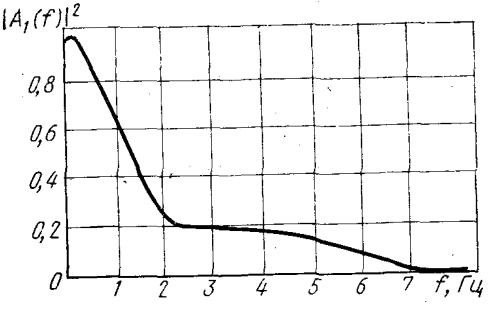
5.3. Результаты расчета показаны на черт. 13. Система обеспечивает выполнение действующих санитарных норм.



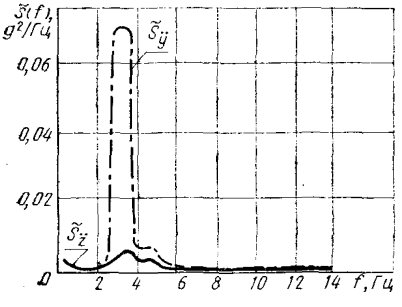
Черт. 9



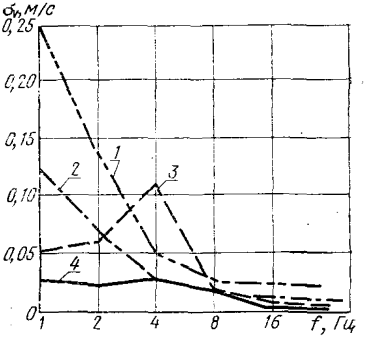
Черт. 10



Черт. 11



Черт. 12



1, *2* — по СН 1102—73 до и после 1978 г. соответственно; *3* — пол кабины; 4 — сиденье

Черт. 13

gost.e-ecolog.ru