

05.13.07
У 799

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. ЛЕНИНСКОГО
КОМСОМОЛА

На правах рукописи

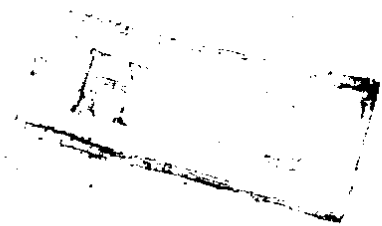
УСТЕЛЕНЦЕВ ЛЕВ ИОСИФОВИЧ

РАЗРАБОТКА АКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВИБРОЗАЩИТНЫХ
СИСТЕМ ДЛЯ МАШИНИСТОВ МАНЕВРОВЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Специальность 05.13.07 – Автоматизация технологических
процессов и производств

Автореферат

на соискание ученой степени кандидата технических наук



Работа выполнена на кафедре "Системы автоматического управления"
Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола
и во Всесоюзном научно-исследовательском институте охраны труда
и техники безопасности в черной металлургии (ВНИИТБчермет)

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор А.П. Сибрин

Официальные оппоненты

доктор технических наук,
профессор Р.Х. Тафиятуллин
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Н.Ю. Моисеев

Ведущее предприятие

Всесоюзный научно-исследовательский
институт охраны труда ВНИИТБ,
г. Свердловск

Защита состоится 28 ноября 1990 г. в 15:10 час.


на заседании специализированного Совета при Челябинском политех-
ническом институте им. Ленинского комсомола по адресу
454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76, ауд. 244

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Автореферат разослан " _____ " октября 1990 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, просим направлять по
адресу совета института.

Ученый секретарь
специализированного совета


А.П. Сибрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Среди неблагоприятных для здоровья человека факторов производственной среды одним из наиболее распространенных является вибрация. Только на предприятиях черной металлургии вредному воздействию общей вибрации подвергается свыше ста тысяч человек, из них около двадцати тысяч машинистов маневровых локомотивов и их помощники.

Превышение уровней виброскорости над допустимыми значениями, определяемыми санитарными нормами СН № 3044-84, на рабочих местах машинистов маневровых локомотивов наблюдается в треть-октавной полосе со среднегеометрической частотой 2 Гц (превышение составляет 1,12 раза) и достигает наибольшего значения в третьоктавах 3,15 Гц (в 2,17 раза); 4 Гц (в 2,24 раза); 5 Гц (в 2,2 раза). Указанный диапазон частот является наиболее вредным для организма, т.к. именно в нем находятся основные резонансные частоты отдельных органов тела человека.

Анализ известных виброзащитных систем (пассивных и активных) показал, что наиболее приемлемой для рабочего места машиниста является активная электродинамическая виброзащитная система (АЭВС), представляющая собой виброизолятор с автоматическим регулированием, исполнительным механизмом которого является электродинамический преобразователь.

Работа выполнена в рамках программы 0.74.08 ГКНТ и ВЦСИС на 1985-90 г.г. "Разработать и внедрить методы и средства, обеспечивающие дальнейшее повышение безопасности и оздоровление условий труда в народном хозяйстве", задание 04.02 "Разработать эффективные способы обеспечения вибробезопасности на рабочих местах предприятий".

Цель и основные задачи работы. Целью настоящей работы яв-

ляется разработка АЭВС для защиты машинистов маневровых локомотивов промышленных предприятий от вредного воздействия вибрации.

Для достижения указанной цели были решены следующие основные задачи:

1. Разработаны электродинамические преобразователи, отвечающие требованиям исполнительных механизмов АЭВС для человека-оператора.
2. Разработан метод расчета электродинамических преобразователей с учетом наиболее рационального использования энергонесущих элементов (постоянных магнитов).
3. Определены наиболее эффективные законы управления АЭВС.
4. Оптимизация параметров цепей управления АЭВС рабочего места человека-оператора.
5. Разработаны конструкции АЭВС для рабочего места машиниста.

Проведены их лабораторные и производственные испытания.

Методы исследования. В работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические исследования основаны на использовании основных положений теории автоматического регулирования, теории колебаний, а также теории электрических цепей.

Экспериментальные исследования разработанных АЭВС проведены на основе традиционных методов виброакустических измерений, основанных на спектральном анализе.

Научная новизна работы:

- получены аналитические выражения для определения параметров конструкций электродинамических преобразователей с магнитной системой типа "сэндвич";
- дано математическое описание принципиально нового электродинамического виброизолятора с регулируемой жесткостью, представ -

- ляющего собой разомкнутую систему регулирования;
- разработана методика выбора оптимальных параметров электродинамического преобразователя типа "сэндвич";
 - определено влияние параметров цепей управления на эффективность работы и устойчивость АЭВС;
 - установлены наиболее эффективные законы управления АЭВС для различных по спектральному составу возмущающих воздействий;
 - получены аналитические зависимости, позволяющие определять оптимальные параметры цепей управления АЭВС с учетом влияния динамических характеристик тела человека и характера вибрационного воздействия.

Практическая ценность работы состоит в том, что проведенные исследования позволяют разрабатывать эффективные АЭВС с улучшенными массо-габаритными показателями. Разработанный электродинамический виброизолятор с регулируемой жесткостью даст возможность наиболее простыми средствами осуществить виброзащиту машинистов маневровых локомотивов промышленных предприятий.

Внедрение результатов работы.

Разработанный электродинамический виброизолятор ВАЭД-2М был использован для снижения уровней вибрации, воздействующей на машиниста, на маневровом локомотиве ТМ-4 (инв. № 237) железнодорожного цеха № 2 Челябинского металлургического комбината. Виброизолятор позволил снизить скорректированный уровень виброускорения на 10 дБ, что обеспечило выполнение требований санитарных норм (СН № 3044-84).

Методики расчета АЭВС были использованы при разработке ОСТ 14-20-131-83 "ССБТ. Вибрация. Методы расчета виброизоляции рабочего места оператора металлургического оборудования".

Апробация работы. Основные положения работы доложены на Всесоюз-

ном совещании по вибрационной технике (г.Тбилиси, 1978 г.); III Всесоюзной конференции по борьбе с шумом и вибрацией (г.Челябинск, 1980 г.); научно-практической конференции "Охрана труда на металлургических предприятиях" (г.Свердловск, 1981 г.); Всесоюзной конференции по вибрационной технике (г.Кутаиси, 1981 г.); семинаре "Вибрационная техника" (г.Москва, 1981 г.); IV Всесоюзном симпозиуме "Влияние вибрации на организм человека и проблемы виброзащиты" (г.Москва, 1982 г.); научно-технической конференции "Пути повышения эффективности методов борьбы с шумом и вибрацией" (г.Вильнюс, 1983 г.); Второй Всесоюзной конференции "Проблемы виброизоляции машин и приборов" (г.Иркутск, 1989 г.); научно-техническом семинаре по вопросам борьбы с шумом и вредной вибрации (г.Свердловск, 1989 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ и получено 10 авторских свидетельств СССР на изобретения, одно положительное решение, а также 2 авторских свидетельства НРБ, одно авторское свидетельство ЧССР, 2 хозяйственных патента ГДР.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, состоящего из 196 наименований работ советских и зарубежных авторов, и приложения. Общий объем работы 257 стр., включая 59 рисунков и 16 таблиц.

На защиту выносятся:

- результаты исследований электродинамических преобразователей, как исполнительных механизмов АЭВС;
- выбор наиболее эффективных законов управления АЭВС для различных по спектральному составу вибрационных воздействий;
- выбор и обоснование показателей качества работы системы, предназначенной для виброзащиты человека-оператора;
- методы решения задач выбора оптимальных параметров АЭВС рабоче-

- го места человека-оператора и результаты оптимизации системы для машинистов маневровых локомотивов;
- методы и результаты экспериментальных исследований АЭВС.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Состояние вопроса и постановка задачи исследования

Обзор исследований, посвященных разработке виброзащитных систем для машинистов железнодорожных локомотивов, показал, что в настоящее время разработаны высокоэффективные пассивные виброзащитные подвески сидений для машинистов локомотивов. Однако, они по ряду своих конструктивных характеристик не пригодны для рабочего места машиниста маневрового локомотива.

Перспективными в этом отношении являются активные виброзащитные системы (АВС). Анализ известных конструкций АВС, различающихся по типу исполнительных механизмов (пневматические, гидравлические, электромеханические), позволил сделать вывод о том, что наиболее приемлемой для рабочего места машиниста маневрового локомотива является электродинамическая АВС (АЭВС).

Сдерживающим фактором применения АЭВС для защиты человека-оператора является отсутствие достаточно малогабаритных электродинамических преобразователей. Кроме того, следует отметить, что не достаточно глубоко изучено влияние параметров цепей управления на эффективность виброизоляции и условия устойчивости. Не исследовано влияние динамических характеристик тела человека на эффективность работы АЭВС. Отсутствуют практические разработки по применению АЭВС для виброзащиты человека-оператора и, в частности, машинистов железнодорожных локомотивов.

Таким образом, на основе изучения состояния вопроса был сделан вывод о целесообразности разработки АЭВС для защиты на

шинистов маневровых локомотивов от вредного воздействия вибрации и сформулированы основные задачи диссертационной работы. Электродинамический преобразователь для активных виброзащитных систем

Разработана новая конструкция электродинамического преобразователя с магнитной системой типа "сэндвич" (рис. I).

Электродинамический преобразователь

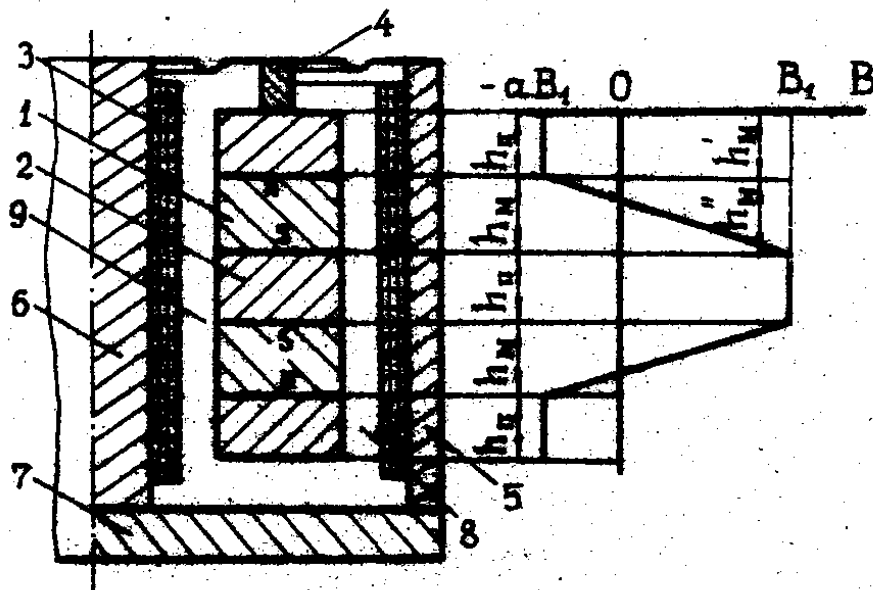


Рис. I.

1-альцевые постоянные магниты; 2-кольцевые постоянные наконечники; 3-силовые катушки; 4-упругая подвеска; 5-наружный магнитопровод; 6-внутренний магнитопровод; 7-немагнитное основание; 8-большой воздушный зазор; 9-малый воздушный зазор

Толкающая сила преобразователя вычисляется в соответствии с выражением:

$$Q = \frac{1}{2\mu} \pi j_s K_z K_g B_r h_m (D+d) \left[(2\alpha+1) h_n + \frac{\alpha^2+1}{\alpha+1} h_m - 2(\alpha+1) \frac{x^2}{h_m} \right], \quad (I)$$

где μ - относительная магнитная проницаемость материала постоянного магнита; j_s - плотность электрического тока; K_z , K_g - коэффициенты заполнения, соответственно, катушки медью и зазора катушкой; B_r - остаточная индукция материала постоянного магнита; h_m , h_n - высоты, соответственно, постоянного магнита и полюс-

ного наконечника; D, d - наружный и внутренний диаметры постоянного магнита; α - коэффициент, учитывающий уменьшение величины магнитной индукции под крайними полюсными наконечниками ($\alpha < 1$); X - амплитуда перемещения подвижной части преобразователя.

Выражение (I) получено в предположении линейного характера распределения магнитной индукции по высоте воздушного зазора под постоянными магнитами, как показано на рис. I. Данное предположение было подтверждено экспериментально. Кроме того, учитывались такие факторы, как одинаковый тепловой режим работы силовых катушек, находящихся в большом и малом зазорах; обеспечение оптимального режима работы постоянных магнитов, при котором удельная энергия внешнего магнитного поля становится максимальной; использование в разработанной конструкции постоянных магнитов из закритических материалов с прямолинейной характеристикой размагничивания.

Расчет электродинамического преобразователя заключается в определении его конструктивных параметров, позволяющих получить требуемую величину толкающей силы, при заданной амплитуде колебаний и ограничении на величину потребляемой мощности. При этом, для случая полигармонического и случайного возбуждений, внутренний и наружный диаметры постоянных магнитов определяются по выражениям:

$$d = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^s Q_i^{-2}}}{2B_r \left[(2\alpha + 1)h_n + \frac{1}{\alpha + 1} h_m \right]} \left[\frac{2\mu}{\mathcal{K}_1 \mathcal{K}_2 \mathcal{K}_3 h_m} \frac{3\rho_s j_s (h_m + h_n)(h_m + 4h_n)}{P_{\text{св}} + \sqrt{\sum_{i=1}^s \left(\frac{Q_i^2}{\Delta \omega_i} \cdot \mathcal{J}_i \right)^2}} \right], \quad (2)$$

$$D = \frac{3\rho_3 j_3 (h_M + h_{II})(h_M + 4h_{II}) \sqrt{\sum_{i=1}^s \bar{Q}_i^2}}{B_r \left[(2a+1)h_{II} + \frac{1}{a+1} h_M \right] \left[P_{oa} - r \right] \sqrt{\sum_{i=1}^s \left(\frac{\bar{Q}_i^2}{\Delta\omega_i} J_i \right)^2}} + d, \quad (3)$$

где \bar{Q}_i - требуемая величина толкающей силы в третьоктавной (октавной) полосе частот; s - количество частотных полос; P_{oa} - допустимая величина потребляемой электрической мощности; r - коэффициент трения; $\Delta\omega_i$ - ширина частотной полосы; $J_i = \int_{\omega_{ni}}^{\omega_{vi}} \frac{\omega^2 d\omega}{(k - \omega^2 m)^2 + \omega^2 r^2}$; ω - круговая частота; ω_{ni} , ω_{vi} - нижняя и верхняя частоты третьоктавной (октавной) полосы; k - коэффициент жесткости упругих элементов; m - масса подвижной части преобразователя и объекта защиты.

В соответствии с разработанной методикой рассчитан электродинамический преобразователь для АЭВС кресла машиниста маневрового локомотива. В магнитной системе преобразователя применены магниты из феррит-бария 25БАГ70 с характеристиками $B_r = 0,38$ Тл, $\mu = 1,15$. Остальные параметры преобразователя имеют значения: $\bar{Q} = 200$ Н; $P_{oa} = 75$ Вт; $j_3 = 6 \cdot 10^6$ А/м²; $\rho_3 = 0,0075 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; $a = 0,3$; $h_M = 2,2 \cdot 10^{-2}$ м; $h_{II} = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м; $k = 3,5 \cdot 10^4$ Н/м; $r = 372$ Н·с/м; $m = 100$ кг; $D = 18,2 \cdot 10^{-2}$ м; $d = 5,5 \cdot 10^{-2}$ м; $\delta = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м.

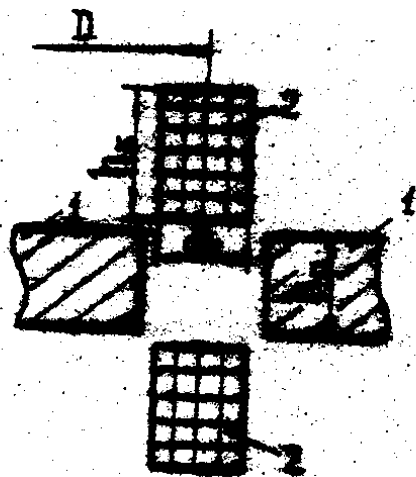
Разработанный преобразователь имеет коэффициент силы по массе равной $K_{ms} = 36$ Н/кг. Аналогичный показатель у одного из лучших электродинамических преобразователей ЕХ356 (фирма "Pro-deca", Франция) составляет 17 Н/кг. Приведенное сравнение говорит о более совершенной магнитной системе преобразователя типа "сэндвич" по сравнению с известными конструкциями. По своим массо-габаритным характеристикам этот преобразователь позволяет

осуществить практическую реализацию АЭВС для рабочего места человека-оператора.

Электродинамический виброизолятор с регулируемой жесткостью

Электродинамический виброизолятор с регулируемой жесткостью, представляет собой разомкнутую систему регулирования. Изменение жесткости виброизолятора осуществляется с помощью электродинамического преобразователя, у которого в исходном состоянии силовые катушки выведены за пределы рабочего зазора (рис.2). Питание силовых катушек осуществляется от регулируемого источника постоянного тока.

Поперечное сечение рабочего зазора электродинамического преобразователя



Толкающая сила такого преобразователя пропорциональна амплитуде перемещения его подвижной части, т.е. действие преобразователя эквивалентно внесению в систему дополнительной (положительной или отрицательной в зависимости от направления тока) жесткости.

Рис.2.
1 - полюсные наконечники;
2,3 - силовые катушки

Модуль частотной передаточной функции электродинамического виброизолятора с учетом динамических характеристик тела человека (в виде входного механического импеданса) будет равен:

$$A_{(\omega)} = \sqrt{\frac{\omega^2 r^2 + (k - k_{em})^2}{[-\omega^2 (m_c + z_2) + k - k_{em}]^2 + \omega^2 (r + z_1)^2}} \quad (4)$$

где k_{em} - коэффициент жесткости, вносимый электродинамическим

преобразователем; m_c - масса сиденья, включая массу подвижной системы преобразователя; Z_1, Z_2 - действительная и мнимая части входного механического импеданса тела человека.

В соответствии с выражением (4) определена предельная эффективность электродинамического виброизолятора при ограничении на величину его динамической жесткости, т.е. $(K - K_{вн}) \geq K_q$, где $K_q = 4 \cdot 10^3$ Н/м - допустимая величина жесткости, обеспечивающая устойчивую работу виброизолятора рабочего места человека-оператора. В табл. I приведены результаты вычислений коэффициентов эффективности виброизолятора в сравнении с требуемой эффективностью.

Таблица I

Предельная эффективность электродинамического виброизолятора

| Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, Гц | 1,6 | 2,0 | 2,5 | 3,15 | 4,0 | 5,0 | 6,3 | 8,0 | 10,0 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Предельные коэффициенты эффективности виброизоляции | 1,11 | 1,72 | 2,44 | 3,33 | 5,88 | 10,0 | 13,9 | 10,3 | 8,33 |
| Требуемые коэффициенты эффективности виброизоляции | 0,60 | 1,12 | 1,80 | 2,17 | 2,24 | 2,20 | 1,75 | 1,50 | 1,06 |

Исполнительным механизмом электродинамического виброизолятора является электродинамический преобразователь типа "сэндвич", силовые катушки которого расположены в соответствии с рис. 2. Расчет преобразователя сводится к определению оптимальных значений конструктивных параметров, позволяющих реализовать исполнительный механизм минимального объема. В качестве целевой функции принят объем активной части преобразователя V_a , под которым понимается суммарный объем энергонесущих узлов (постоянные магниты с полюсными наконечниками и силовые катушки).

При проектировании электродинамического преобразователя считаются известными величины h_n , Q_{max} , P_g . Задача оптимизации сводится к нахождению минимума целевой функции V_a по трем параметрам: n - количество постоянных магнитов, D и d при следующих основных ограничениях-неравенствах:

$$h > \frac{(a+n-1)k_1}{\left[1 - \left(\frac{100-\epsilon\%}{100}\right)^2\right](3a+2n-2)} \quad (5)$$

$$2\mu B_r A^2 h_n (3a+2n-2)^3 (D+d)^2 (D-d) P_g - \\ - \rho_2 j_2 (n+2) [(a+n-1)(D-d)Ah_n + 2\mu Q_{max}]^2 [(3a+2n-2)(D-d)Ah_n + \\ + 2\mu Q_{max}] \geq 0, \quad (6)$$

где $A = \pi j_2 k_2 k_3 B_r h_n$.

Неравенство (5) - условие работы преобразователя в линейном режиме с заданной точностью $\epsilon\%$, а (6) - условие-ограничение на допустимую потребляемую мощность.

Целевая функция V_a вычисляется по выражению:

$$V_a = \frac{\pi(D-d) [(a+n-2) + 3a+2n-2](D-d)Ah_n + 2\mu Q_{max}}{4(3a+2n-2)A} + \\ + \frac{(n+2)\pi j_2 [(a+n-1)(D-d)Ah_n + 2\mu Q_{max}]^2 [(3a+2n-2)(D-d)Ah_n + 2\mu Q_{max}]}{2\mu A^2 (3a+2n-2)^3 (D+d)^2 (D-d)} \quad (7)$$

Расчет оптимальных параметров проведен на персональной ЭВМ "Электроника МС-0585" прямым методом поиска Нелдера и Мида. В результате расчетов при $K = 2 \cdot 10^4$ Н/м, $h_n = 0,01$ м, $Q_{max} = 200$ Н, $k_2 = k_3 = 0,7$; $j_2 = 6 \cdot 10^6$ А/м²; $P_g = 75$ Вт; $\epsilon = 10\%$ получены следующие значения параметров электродинамического преобразователя для рабочего места машиниста: $n = 4$, $D = 0,125$ м, $d = 4,3 \cdot 10^{-2}$ м, $h_n = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м, $\delta = 4,8 \cdot 10^{-3}$ м.

Синтез структурных схем АЭВС

Для достижения величины виброскорости, определяемой критерием "обеспечение комфорта" по международному стандарту МС 2631-74 требуются более эффективные системы, чем описанный выше виброизолятор. Такими системами являются АЭВС с автоматическим управлением, в дальнейшем - просто АЭВС. На рис.3 изображена расчетная блок-схема АЭВС общего вида.

Блок-схема активной электродинамической виброзащитной системы

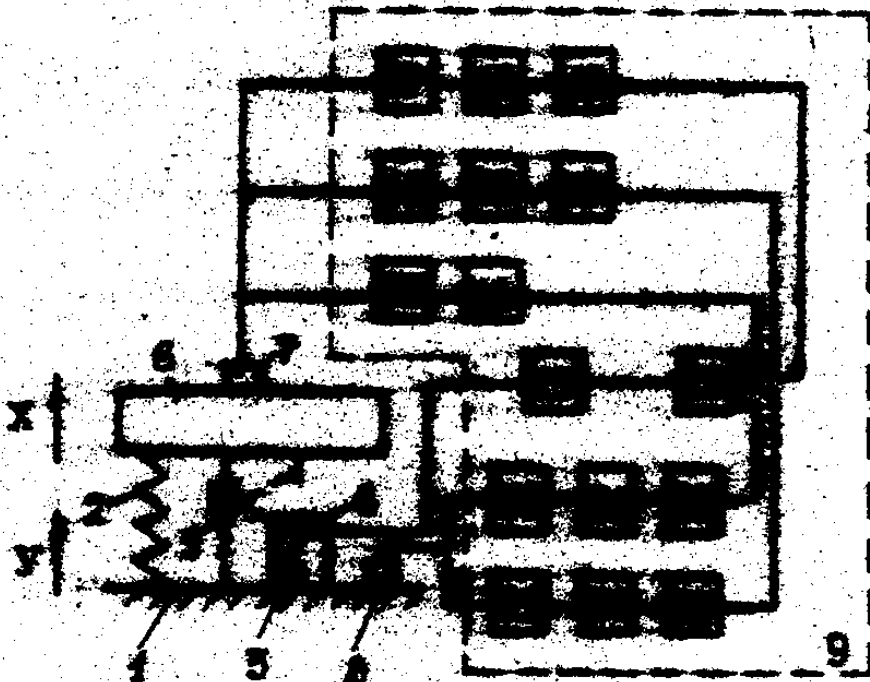


Рис. 3.

1-вибрирующее основание; 2,3-упругий и демпфирующий элементы пассивного виброизолятора; 4-электродинамический преобразователь; 5-силовая катушка; 6-изолируемый объект; 7,8-пьезоэлектрические акселерометры; 10,14,17,20,23-предусилители; 11,16,19,22,25-усилители; 12-сумматор; 13-усилитель мощности; 15,21-интеграторы; 18,24-двойные интеграторы.

Движение изолируемого объекта при кинематическом возбуждении со стороны колеблющегося основания описывается известной системой уравнений:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = -r\dot{y} + ky + Q, & (8) \\ LI + R_c I + \xi (\dot{x} - \dot{y}) = U, & (9) \end{cases}$$

где \ddot{x} , \dot{x} , x - ускорение, скорость, перемещение изолируемого объекта; \dot{y} , y - скорость, перемещение основания; L - индуктивность силовой катушки, I - величина тока в силовой катушке; U - напряжение, приложенное к силовой катушке; $R_c = R + R_y$ - суммарное сопротивление силовой катушки и выходной цепи усилителя мощности; ξ - электромеханическая постоянная электродинамического преобразователя.

Величина толкающей³ силы электродинамического преобразователя, в соответствии с законом Ампера, определяется по формуле:

$$Q = \xi I. \quad (10)$$

Блок управления формирует на выходе усилителя мощности напряжение:

$$U = -(\mathcal{W}_x x + \mathcal{W}_y y), \quad (11)$$

где \mathcal{W}_x и \mathcal{W}_y - передаточные функции цепей обратной связи и компенсации блока управления.

На основе анализа приведенных уравнений (8)-(11) были определены эффективность виброизоляции АЭВС с различными законами управления, а также влияние на эффективность и устойчивость работы системы значений параметров реальных динамических звеньев цепей управления.

Независимо от законов управления эффективность виброизоляции системы возрастает по мере снижения сопрягающих частот интегрирующих звеньев и предусилителей. При достижении этими частотами значений 0,01 от резонансной частоты исходной пассивной системы АЭВС по эффективности подавления колебаний становится

близкой к идеальной. Однако, при подавлении низкочастотной вибрации достигнуть указанного значения сопрягающих частот технически трудно. В связи с этим представляется наиболее целесообразным выбрать компромиссное значение этих величин (порядка 0,1), позволяющее получить достаточно высокую эффективность виброизоляции при сравнительно несложной технической реализации.

Широкополосную виброизоляцию можно реализовать на основе комбинированного управления. Наиболее эффективной системой является АЭВС с управлением по скорости и перемещению объекта в сумме с управлением по перемещению основания. Несколько уступает этой системе по широкополосности и степени подавления колебаний АЭВС с цепями управления по скорости объекта и перемещению основания. Однако, к достоинствам этой системы относится наименьшая амплитуда низкочастотных резонансных колебаний.

Расчет АЭВС для человека-оператора

Расчет АЭВС заключается в определении оптимальных параметров цепей управления АЭВС при кинематическом возбуждении с учетом динамических характеристик тела человека и характера вибрационного воздействия.

Принимая во внимание функциональное назначение АЭВС за целевую функцию выбрано скорректированное значение контролируемого параметра U_K (виброускорение или виброскорость):

$$U_K = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (U_{2i} K_i)^2} \quad (12)$$

где U_{2i} - среднеквадратическое значение скорости или ускорения в i -ой полосе частот; K_i - весовой коэффициент для i -ой полосы, учитывающий степень вредности для организма человека механических колебаний в каждой частотной полосе.

Задача оптимизации: найти максимум целевой функции (12) путем соответствующего выбора параметров цепей управления АЭВС при

соблюдений условий устойчивости, а также ограничений в виде неравенств:

$$U_x \leq U_{\text{доп}}, \quad (13)$$

$$A_{(i)} \leq A_{g(i)}, \quad (14)$$

$$P_a \leq P_{a\text{доп}}, \quad (15)$$

где $U_{\text{доп}}$, $A_{g(i)}$, $P_{a\text{доп}}$ - допустимые величины скорректированного значения контролируемого параметра, модуля частотной передаточной функции в i -ой полосе частот, активной мощности.

Рассмотрены АЭВС с наиболее эффективными законами управления; АЭВС с обратной связью (ОС) по скорости объекта и АЭВС с обратной связью по скорости и компенсацией жесткости упругого элемента.

Структурные схемы систем приведены на рис. 4.

Переменными параметрами цепи ОС АЭВС с управлением по скорости являются постоянные времени предусилителя $T_{\text{во}}$ и интегратора $T_{\text{в}}$, а также относительный внесенный коэффициент сопротивления ρ . Значения параметров $T_{\text{во}}$ и $T_{\text{в}}$ выбираем на основании приведенных выше рекомендаций.

Область допустимых значений параметра ρ , удовлетворяющих условию устойчивости, определена методом Д-разбиения в области одного параметра. При этом для АЭВС рабочего места машиниста условие устойчивости имеет вид: $\rho \leq 53$.

Снижение уровней вибрации до принятых в СССР нормативных значений обеспечивается значением коэффициента $\rho_0 = 4$. При этом величина потребляемой мощности составила $P_0 = 8$ Вт. Предельная эффективность данной АЭВС ограничивается условием (14). Предельный коэффициент ρ_0 составляет $\rho_{\text{max}} = 11$, а величина потребляемой мощности $P_{\text{max}} = 12$ Вт.

Структурные схемы АЭВС

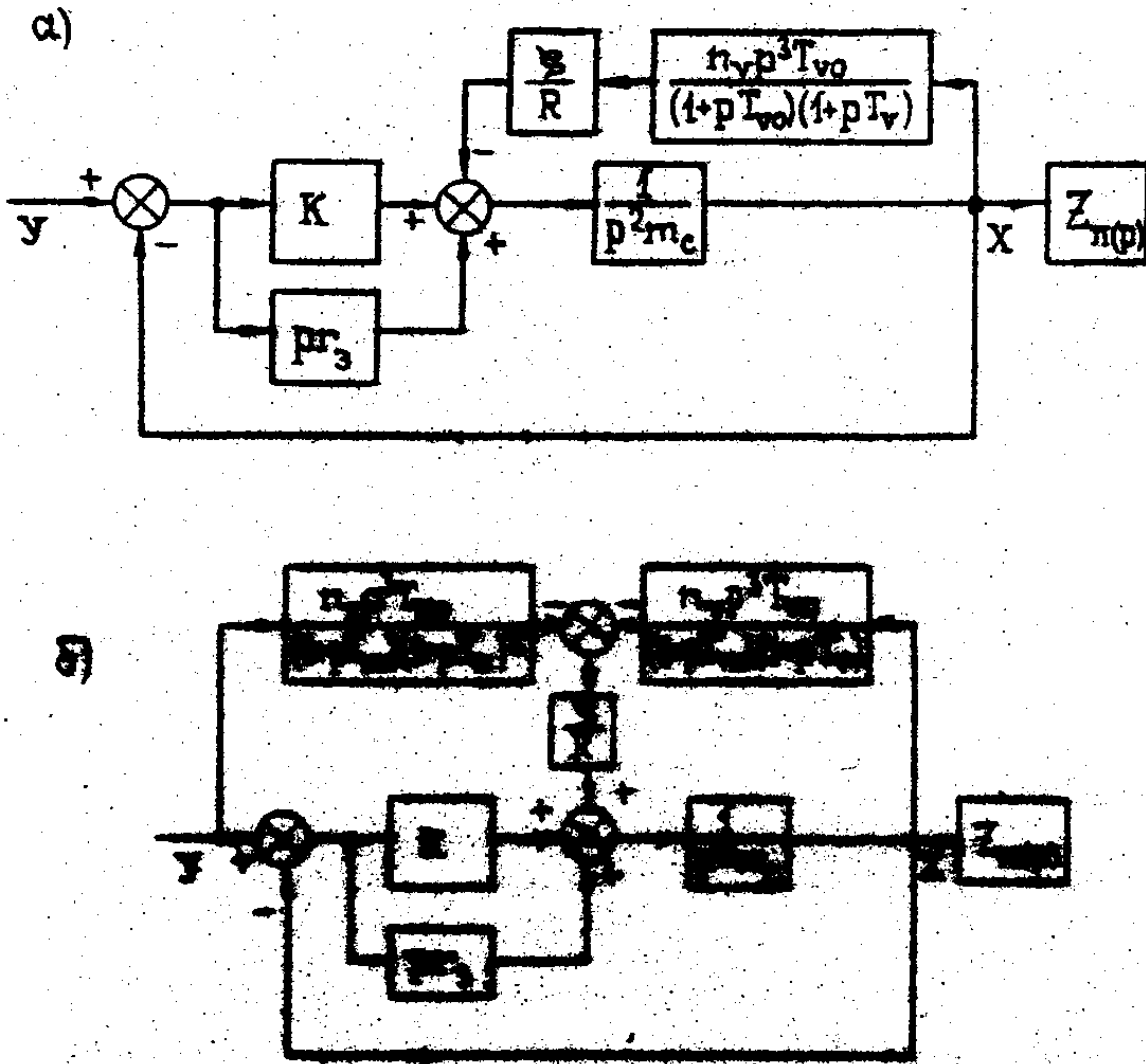


Рис. 4.

- а) с ОС по скорости объекта;
- б) с дополнительной компенсацией жесткости

Постоянные времени динамических звеньев АЭВС с дополни-
 тельной компенсацией жесткости выбирались из тех же соображений,
 что для системы, рассмотренной выше. Переменным параметром сис-
 темы наряду с коэффициентом сопротивления ρ будет и относитель-
 ный внесенный коэффициент жесткости γ_k . Расчет на ЭВМ области
 допустимых значений по методу Д-разбиения показал, что $\rho \leq 52$.
 Принимая во внимание сложный характер зависимости целевой функ-
 ции от параметров ρ и γ_k , поиск их оптимальных значений осу-
 ществлялся методом Нелдера и Мида с последующей проверкой на со-
 ответствие области допустимых значений. В результате расчета по-

лучены оптимальные значения параметров $\rho_0 = 2,5$; $\gamma_{\text{ко}} = 0,4$.

В табл. 2 представлены предельные коэффициенты эффективности виброизоляции АЭВС.

Таблица 2

Предельная эффективность виброизоляции АЭВС

| Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, Гц | 1,6 | 2 | 2,5 | 3,15 | 4 | 5 | 6,3 | 8 | 10 |
|---|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|------|
| Предельные коэффициенты эффективности виброизоляции АЭВС с ОС по скорости | 3,3 | 4,2 | 5,2 | 6,3 | 7,6 | 9,4 | 11,8 | 12,3 | 12,1 |
| с дополнительной компенсацией жесткости | 4,7 | 6,1 | 7,4 | 8,5 | 9,6 | 11 | 13,2 | 12,6 | 12,1 |
| Требуемые коэффициенты эффективности для МС 2631-74 | 0,9 | 1,8 | 2,9 | 3,4 | 3,5 | 3,4 | 2,8 | 2,4 | 1,7 |

Эффективность виброизоляции АЭВС с автоматическим управлением в 2-4 раза превосходит эффективность электродинамического виброизолятора.

Для виброзащиты машиниста маневрового локомотива следует предпочесть, как более простую, АЭВС с ОС по скорости.

Экспериментальные исследования АЭВС

По результатам проведенного расчета, на основе четырех постоянных магнитов из феррит-бария марки М-25БА170-1, имеющих размеры $D = 0,134$ м, $d = 5,7 \cdot 10^{-2}$ м, $h_m = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, был разработан и изготовлен опытный образец электродинамического виброизолятора с регулируемой жесткостью (ВАЭД-2М). Виброизолятор имеет диапазон регулирования жесткости (в зависимости от величины постоянного тока) от $1,6 \cdot 10^3$ до $4,8 \cdot 10^4$ Н/м; потребляемая мощность не более 75 Вт; масса виброизолятора не более 50 кг.

Эффективность виброизоляции ВАЭД-2М была определена методом спектрального анализа в лабораторных условиях.

На рис. 5 в качестве примера показаны некоторые логарифмические третьоктавные спектры виброускорений объекта защиты в виде человека-оператора.

Экспериментальные ЛАЧХ ВАЭД-2М

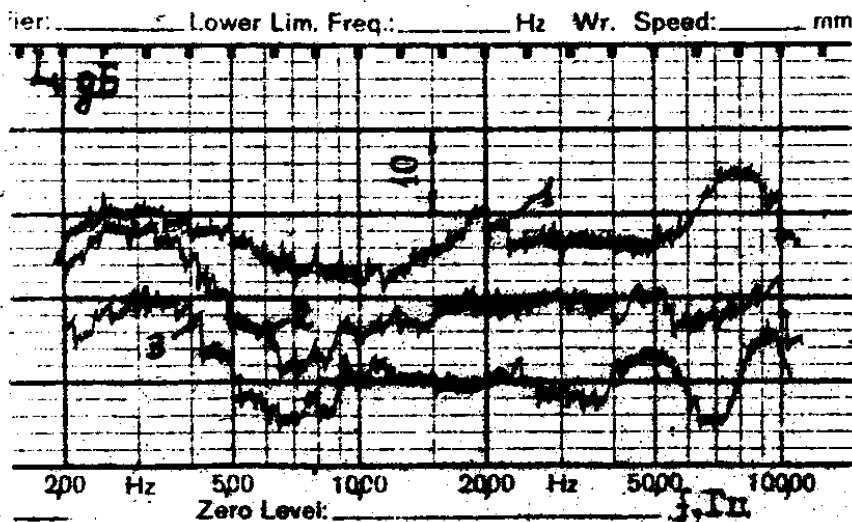


Рис. 5.

- 1 - колебания основания;
- 2,3 - колебания изолируемого объекта при токе 0; + 2А, соответственно

для снижения уровня вибрации, действующей на машиниста до допустимых значений, определяемых СН 3044-84. Ожидаемая экономическая эффективность от установки ВАЭД-2М на рабочем месте машиниста составляет 570 руб. в год.

Экспериментальная проверка АЭВС с автоматическим управлением была проведена на опытном образце с ОС по скорости и цепи компенсации по перемещению (в дальнейшем - просто АЭВС). Опытный образец собран на базе электродинамического преобразователя типа КСЕ-211 (фирма "Роботрон", ГДР). В качестве изолируемого объекта был применен груз массой 70 кг.

Результаты испытаний в виде логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) скорости колебаний (относительно

После завершения лабораторных испытаний ВАЭД-2М был установлен на маневровом тепловозе ТТМ-4 Челябинского металлургического комбината. В результате производственных испытаний определено, что виброизолятор позволяет получать эффективность виброизоляции до 10 дБ скорректированного уровня виброускорения. Указанной эффективности достаточно

опорного значения $5 \cdot 10^{-8}$ м/с) приведены на рис. 6.

Экспериментальные ЛАЧХ опытного образца АЭВС

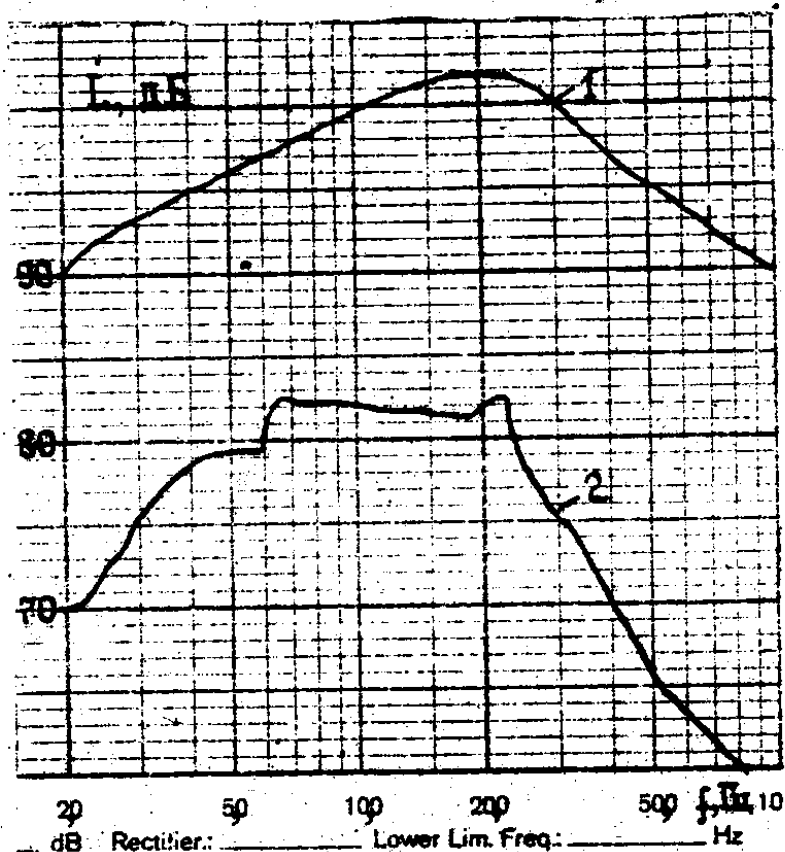


Рис. 6.

1 - колебания основания;
2 - колебания изолируемого
объекта

Анализ результатов испытаний показывает, что АЭВС, обладая большей эффективностью по сравнению с ВАЭД-2М, позволяет снижать уровни вибрации до значений, регламентируемых международным стандартом ИСО 2631-74.

В ходе лабораторных испытаний АЭВС была осуществлена проверка разработанной в работе методики расчета системы. Погрешность вычислений не превышает 15%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Анализ электродинамических преобразователей как исполнительных механизмов АЭВС показал, что наиболее целесообразно для этих целей использовать преобразователи с магнитной системой типа "сэндвич" на основе кольцевых постоянных магнитов. Преобразователи такого типа, за счет более рационального использования объема и снижения потокосе рассеяния, имеют значительно лучшие массо-габаритные показатели по сравнению с известными конструкциями.

2. Получены аналитические выражения, описывающие работу электродинамических преобразователей с магнитной системой типа "сэндвич". Определены условия наиболее эффективного использова-

ния энергии постоянных магнитов. Предложена методика расчета данного преобразователя при моно- и полигармоническом возбуждении.

3. Определено влияние параметров реальных динамических звеньев цепей управления на эффективность работы и устойчивость АЭВС. Установлены наиболее эффективные законы управления АЭВС для различных по спектральному составу возмущающих воздействий.

4. Анализ эффективности АЭВС с различными законами управления показал, что получение широкополосной виброизоляции возможно при использовании комбинированного управления, представляющего собой различные сочетания законов управления по перемещению основания и ускорению, скорости, перемещению объекта. Наиболее эффективной системой виброзащиты является АЭВС с управлением по скорости, перемещению объекта и перемещению основания. Несколько уступает этой системе по широкополосности и степени подавления колебаний АЭВС с цепями управления по скорости объекта и перемещению основания. Однако, к достоинствам этой системы относится то, что она имеет наименьшую амплитуду низкочастотных резонансных колебаний.

5. Получены аналитические выражения, позволяющие определять оптимальные параметры цепей управления АЭВС с управлением по скорости объекта защиты и с управлением по скорости объекта и перемещению основания. При расчете оптимальных параметров цепей управления, обеспечивающих снижение уровня вибрации, воздействующей на человека-оператора, до допустимых значений, учитывается влияние динамических характеристик тела человека и характер вибрационного воздействия.

6. Решена задача выбора АЭВС с оптимальными параметрами для рабочего места машиниста маневрового локомотива промышленного

предприятия. Определено, что наиболее целесообразно для виброзащиты машиниста применять АЭВС с управлением по скорости изолируемого объекта.

7. Получено математическое описание принципиально нового электродинамического виброизолятора с регулируемой жесткостью. Предложенный виброизолятор позволяет более простыми средствами, чем АЭВС с автоматическим управлением, получить эффективную виброзащиту машиниста маневрового локомотива.

8. Разработана методика выбора оптимальных конструктивных параметров электродинамического преобразователя с магнитной системой типа "сэндвич", позволяющая реализовать преобразователь с минимальным объемом, для электродинамического виброизолятора с регулируемой жесткостью. Проектирование и изготовление электродинамического виброизолятора (ВАЭД-2М) для рабочего места машиниста маневрового локомотива, проведенные в соответствии с предложенной методикой, показали, что виброизолятор отвечает всем требованиям для данного рабочего места.

9. Экспериментальные исследования в лабораторных и производственных условиях подтвердили правильность теоретических выводов, сделанных в данной работе.

Основные положения диссертации изложены в следующих печатных работах:

1. Гершман П.Я., Росин Г.С., Устеленцев Л.И. Новые конструкции электродинамических вибраторов // Тезисы Всесоюзной конференции по вибрационной технике. - Тбилиси, 1981. - С.198.

2. Росин Г.С., Устеленцев Л.И. К расчету активного электродинамического демпфера колебаний // Вибрационная техника: Материалы семинара. - Москва, 1981. - С.61-64.

3. Росин Г.С., Устеленцев Л.И. Об автоматическом управле-

нии одномассовыми колебательными системами при помощи электродинамических силовозбудителей //III Всесоюзная конференция по борьбе с шумом и вибрацией: Борьба с вибрацией. - Челябинск, 1980. - С.208-211.

4. Росен Т.С., Устеленцев Л.И. Управление динамическими свойствами виброизолирующей системы, возбуждаемой кинематически //Тезисы Всесоюзного совещания по вибрационной технике. - Тбилиси, 1978. - С.81.

5. Устеленцев Л.И. Влияние параметров цепей управления на эффективность работы активной электродинамической виброзащитной системы //Влияние вибрации на организм человека и проблемы виброзащиты: Тез. докл. IV Всесоюзного симпозиума. - М.: Наука, 1982. - С.73-74.

6. Устеленцев Л.И. О выборе параметров цепей управления активной электродинамической виброзащитной системы //Пути повышения эффективности методов борьбы с шумом и вибрацией: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Вильнюс, 1983. - С.110-113.

7. Устеленцев Л.И. О применении активных виброзащитных систем (АВС) на предприятиях черной металлургии //Охрана труда на металлургических предприятиях: Тез. докл. - Свердловск, 1981. - С.51-53.

8. Устеленцев Л.И. Расчет активного электродинамического виброизолятора с оптимальными параметрами для рабочего места машиниста маневрового локомотива //Социально-экономические вопросы повышения безопасности труда в черной металлургии: Темат. сб. науч. тр. - М.: Металлургия, 1989. - С.143-155.

9. Устеленцев Л.И. Способы управления электродинамическими виброзащитными системами //Средства защиты работающих на предприятиях черной металлургии: Темат. сб. науч. тр. - М.: Металлур-

гия, 1985. - С.50-57.

10. Устеленцев Л.И. Электродинамическая виброзащитная система для кресла машиниста маневрового локомотива //Защита рабочих черной металлургии от опасных и вредных производственных факторов: Темат.сб.науч.тр. - М.: Металлургия, 1986. - С.59-69.

11. Устеленцев Л.И. Экспериментальные исследования активно-го электродинамического виброизолятора //Повышение безопасности труда на предприятиях черной металлургии: Темат.сб.науч.тр. - М.: Металлургия, 1990. - С.64-70.

12. Устеленцев Л.И., Антонова Л.К. Электродинамический виброизолятор с регулируемой жесткостью //Вторая Всесоюз. конф. "Проблемы виброизоляции машин и приборов": Тез. докл. - Иркутск-Москва, 1989. - С.156.

13. А.с. 722598 СССР, МКИ В06В1/04. Электродинамический вибратор/Г.С.Росин, Л.И.Устеленцев (СССР). № 2628760/18-25; Заявлено 13.06.78; Опубл. 25.03.80, Бюл. № 11. - 2 с.

14. А.с. 724219 СССР, МКИ В06В1/04. Электродинамический вибратор/Г.С.Росин, Л.И.Устеленцев (СССР). - № 2684327/18-10; Заявлено 10.11.78; Опубл.30.03.80, Бюл. № 12. - 3 с.

15. А.с. 882644 СССР, МКИ В 06 В1/04. Электродинамический силовозбудитель/Г.С.Росин, Л.И.Устеленцев (СССР). - №2861171/18-10; Заявлено 29.10.79; Опубл. 23.11.81, Бюл. № 43. - 2 с.

16. А.с. 921637 СССР, МКИ В 06 В1/04. Электродинамический вибратор/Г.С.Росин, Л.И.Устеленцев (СССР). - №2619258/18-10; Заявлено 24.05.78; Опубл. 23.04.82, Бюл. № 15. - 3 с.

17. А.с. 963572 СССР, МКИ В 06 В1/04. Электродинамический силовозбудитель/Г.С.Росин, Л.И.Устеленцев, П.Я.Герман (СССР). - № 3005395/18-10; Заявлено 18.11.80; Опубл. 07.10.82, Бюл. № 37.

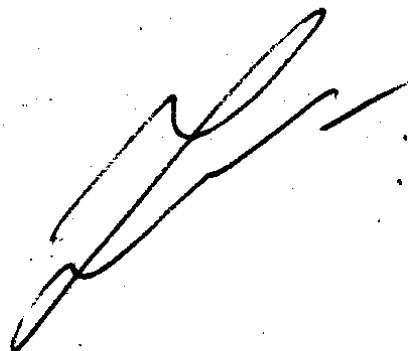
18. А.с. I023I58 СССР, МКИ F 16 F 15/03. Виброизолирующее устройство с автоматическим управлением/Г.С.Росин, Л.И.Устеленцев (СССР). - № 273656I/25-28; Заявлено 15.03.79; Опубл. 15.06.83, Бвл. № 22. - 2 с.

19. А.с. I058633 СССР, МКИ В 06 В I/04. Электродинамический вибратор/Г.С.Росин, Л.И.Устеленцев, П.Я.Гершман (СССР). - № 3297II7/I8-10; Заявлено 16.03.81; Опубл. 07.12.83, Бвл. № 45. - 3 с.

20. А.с. I222933 СССР, МКИ F 16 F 15/03. Регулируемый электродинамический виброизолятор/Росин Г.С., Устеленцев Л.И., Свердлов В.Я., Козинцев И.Ф., Кухарев А.Е. (СССР). - № 3589404/25-28; Заявлено 04.05.83; Опубл. 7.04.86, Бвл. № 13. - 3 с.

21. А.с. I274780 СССР, МКИ В 06 VI/04. Электродинамический вибратор/Л.И.Устеленцев, Г.С.Росин, Г.Н.Гартман (СССР). - № 3836460/24-10; Заявлено 30.12.84; Опубл. 07.12.86, Бвл. № 45. - 2 с.

22. А.с. I357625 СССР, МКИ F 16 F 15/03. Регулируемый электродинамический виброизолятор/ Устеленцев Л.И. (СССР). - № 3969302/25-28; Заявлено 29.10.85; Опубл. 7.12.87, Бвл. № 45. - 3 с.



Подписано к печати 08.10.90. Формат 60X90 I/I6. Печ. л. I,5.
Уч.-изд. л. I. Тираж 100 экз. Заказ 432/901.

УОИ ЧИИ. 454080, Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.