

## ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ ВИБРОДАТЧИК МАЯТНИКОВОГО ТИПА

Г. С. ЖАРТОВСКИЙ

(Представлена кафедрой горных машин, рудничного транспорта и горной механики)

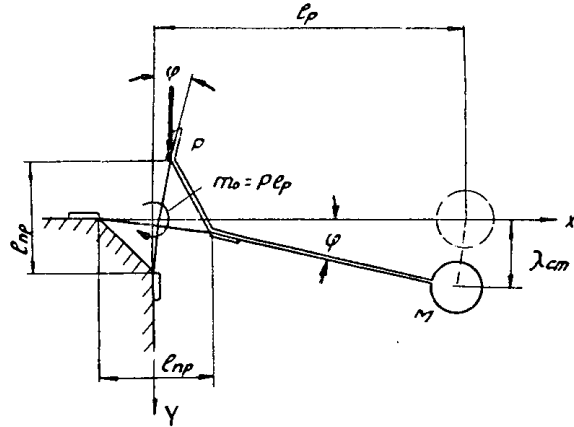
Для измерения вибраций механических объектов широкое распространение получили сейсмические вибродатчики, у которых точка отсчета создается искусственно с помощью сейсмических или иначе—инерционных систем, обязательным элементом которых является упругая подвеска. Обычно упругая подвеска служит одновременно и направляющей движения для обеспечения линейных или крутильных колебаний. От того, как она выполнена, зависят частотные свойства вибродатчиков. Для виброметрического режима всегда стремятся собственную частоту  $f_0$  выполнить как можно меньше, так как она ограничивает нижний предел частотного диапазона измерения. Это иногда связано с недопустимым по величине статическим прогибом сейсмической массы, увеличивающим габариты и ухудшающим эксплуатационные свойства датчиков. Верхний предел измерений по частоте ограничивается либо потерей устойчивости упругой подвески от воздействия неизмеряемых компонентов вибраций, либо влиянием распределенных масс пружин, т. е. высшими резонансами  $f_i$ . Удобно оценивать динамические свойства сейсмических систем величиной динамического частотного диапазона, выраженной через отношение  $\frac{f_i}{f_0}$ . Для целей измерений наиболее важным является первый обертоном  $f_1$ . В серийных отечественных датчиках, предназначенных для измерений в области инфразвукового диапазона частот, величина  $\frac{f_1}{f_0}$  составляет 15—30, что не всегда удовлетворяет потребности практики. Анализ наиболее широко распространенных типов упругих подвесов показывает, что задача существенного расширения динамического частотного диапазона может быть удовлетворительно решена с помощью маятниковых подвесок с применением упругого шарнира без трения — «креста пружин», обеспечивающих динамический частотный диапазон на порядок выше приведенных значений. Настоящая работа посвящена исследованию свойств магнитоэлектрических вибродатчиков с маятниковым подвесом на упругом шарнире.

Как известно, собственная частота маятникового подвеса (рис. 1) определяется выражением

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{I}}, \text{ гц,}$$

где  $c$  — жесткость пружин к крутильным колебаниям;  
 $I = Ml_p^2$  — момент инерции сейсмической массы  $M$ ;  
 $l_p$  — расстояние центра массы до точки поворота (в реальных условиях  $l_p$  учитывает влияние массы рычага).

Жесткость к крутильным колебаниям может быть определена из следующих соображений. Под действием веса  $P$  масса  $M$  отклонится



на величину статического прогиба  $\lambda_{сп}$ , связанного с собственной частотой зависимостью

$$\lambda_{сп} \cong 2,48 \left( \frac{10}{f_0} \right)^2 \text{ мм.}$$

Каждая из пружин, образующих упругий шарнир, будет нагружена практически только изгибающим моментом

$$M_{изг} = \frac{m_0}{n} = \frac{P \cdot l_p}{n},$$

где  $n$  — число пружин в шарнире.

Рис. 1. Схема работы маятникового подвеса с упругим шарниром

Деформация пружин от сжимающей вертикальную пружину силы  $P$  мала, поэтому ее

влиянием можно пренебречь. Таким образом, решая уравнение изгиба пружин, как балочек с жесткими заделками по концам, нагруженных только изгибающим моментом, легко получить выражение для жесткости упругого шарнира. Рассмотрим это на примере горизонтальной пружины.

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M_{изг} = \frac{m_0}{n}, \quad \frac{dy}{dx} = \varphi(x) = \frac{m_0}{EI \cdot n} \cdot x.$$

Но так как  $c \varphi = \frac{m_0}{n}$ , то  $c = \frac{EI}{l_{пр}} \cdot n$ ,

где  $l_{пр}$  — рабочая длина пружины.

Зная верхний предел измерения вибро смещений, можно просто рассчитывать напряжения в пружинах и оценивать долговечность работы датчика (число допустимых циклов по кривым Веллера для материала пружины), так как в послерезонансной зоне отклонения сейсмической массы равны внешнему воздействию. При сохранении длины пружин и верхнего предела измерений напряжения в пружинах растут с повышением собственной частоты датчика. Для пружин прямоугольного сечения эту зависимость можно рассчитать и представить в виде

$$\frac{\sigma'}{\sigma''} = \left( \frac{f_0'}{f_0''} \right)^{2,3},$$

а для круглого сечения —

$$\frac{\sigma'}{\sigma''} = \left( \frac{f_0'}{f_0''} \right)^{1,2}.$$

Здесь  $\sigma'$  и  $f_0'$  берутся для одной подвески, а  $\sigma''$  и  $f_0''$  — для другой

Маятниковые подвесы выполняются иногда на шарнирах с сухим трением качения или скольжения. Подшипники увеличивают порог чувствительности датчика и делают невозможным измерения вибраций, со-

измеримых с «люфтами» сочленений. Иными словами, не обеспечивается постоянство точки вращения рычага маятника. Этих недостатков лишены упругие шарниры типа «крест пружин». Заслуживает особого внимания свойство такого шарнира с высокой точностью сохранять постоянство точки вращения в пределах  $10\text{--}15^\circ$  поворота рычага. Экспериментальная проверка этого свойства проводилась на четырех крестообразно расположенных пружинах длиной 150 мм. В пределах  $6\text{--}8^\circ$  смещение точки поворота составляло 0,1—0,15 мм. Таким образом, пружины с рабочей длиной 1,5—2 мм могут обеспечить отклонение точки поворота не более 1—1,5 мк, а для случая измерения вибраций в несколько микрон вышеназванные отклонения составят сотые доли микрона. То есть можно рекомендовать такую сейсмическую систему для прецизионных измерений. Это свойство подтверждает и характер чисто моментной нагрузки пружин, как принято в нашем расчете жесткости, так как только при одинаковом радиусе кривизны пружин, что характерно для чисто моментной нагрузки, возможно стабильное положение оси вращения.

Чтобы сейсмическая масса точно отслеживала движение измеряемого объекта, необходимо сохранять значение жесткости в заданных пределах деформации упругого подвеса постоянным. Принято считать [1], что пружины датчиков работают в линейной зоне, если величина максимального прогиба пружин составляет не более 10% рабочей длины пружин. Это требование необходимо учитывать при выборе длины рычага. Так, к примеру, при  $l_{\text{пр}} = 2$  мм и максимальном пределе измерений  $\pm 2$  мм длина рычага, а точнее  $l_1$ , должна быть не менее 20 мм.

В сложных условиях эксперимента может потребоваться любая пространственная ориентация датчика и, следовательно, сейсмической системы. Это требование может быть несовместимым с выбранной собственной частотой, так как большой статический прогиб  $\lambda_{\text{ст}}$  выбирает весь свободный ход чувствительного элемента. С другой стороны, существует предел устойчивого состояния маятникового подвеса, расположенного вертикально массой вверх.

Положение статической устойчивости может быть определено следующим образом. Пусть рычаг маятника отклонится от вертикали под действием веса массы  $P$  на величину  $\varphi$ . Этому отклонению будет противодействовать восстанавливающий момент упругого шарнира— $c\varphi$ . Уравнение равновесия стержня в отклоненном состоянии получит вид

$$P \cdot l_p \cdot \varphi - c \varphi = 0.$$

Из условия отклоненного состояния ( $\varphi \neq 0$ ) находим

$$c_{\text{кр}} = P \cdot l_p.$$

При свободных колебаниях маятника в уравнение равновесия добавится инерционный член:

$$Pl_p \ddot{\varphi} - c \varphi = I \frac{d^2 \varphi}{dt^2},$$

иначе

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \frac{c - P \cdot l_p}{I} \varphi = 0.$$

Очевидно, что при  $c_{\text{кр}} = Pl_p$  собственная частота маятника превращается в нуль, т. е. система теряет устойчивость. Знание предельного значения жесткости особенно необходимо при проектировании датчиков с собственными частотами в несколько герц.

Выбор минимальной длины рычага маятника из условий работы пружин в линейной зоне может потребовать дополнительной корректировки, если датчик будет работать при воздействии на него неизмеряемых боковых компонент. Анализ динамической устойчивости подвесок при воздействии на них параметрических нагрузок показывает, что от неизмеряемых вибраций возможно появление инерционных сил, приложенных к сейсмической массе. Эти знакопеременные силы при разложении будут действовать как вдоль рычага маятника, растягивая или сжимая его, так и в направлении оси измерения, дополнительно раскачивая подвеску. Не касаясь специального вопроса возникновения параметрических резонансов, необходимо отметить, что чем короче рычаг, т. е. чем больше угол  $\varphi$ , тем больше осевая компонента инерционных сил, возникающих от боковых вибраций. Очевидно, это повышает чувствительность датчика к неизмеряемым вибрациям. Задавшись предварительно величиной боковой чувствительности  $\gamma\%$  и возможным при работе  $\varphi_{\max}$ , можно скорректировать значение  $l_p$ . Боковая чувствительность

$$\gamma = \operatorname{tg} \varphi_{\max} \cdot 100 \, \%.$$

Угол  $\varphi_{\max}$ , как видно из рис. 1, определяется, исходя из максимального предела измерений  $\xi_0^{\max}$  и длины рычага

$$\operatorname{tg} \varphi_{\max} \approx \frac{\xi_0^{\max}}{l_p},$$

следовательно,

$$l_p = \frac{\xi_0^{\max}}{\gamma} \cdot 100.$$

Если влияние распределенных масс на вынужденные колебания рассмотренной сейсмической системы можно существенно уменьшить применением «креста пружин», расширяя таким образом верхний предел измерений по частоте, то использование магнитоэлектрического преобразователя для преобразования колебаний сейсмической массы в электрический сигнал позволяет в широких пределах варьировать величиной собственной частоты  $f_0$ . Как отмечено выше, с этой частотой связан статический прогиб  $\lambda_{\text{ст}}$ . Например, для датчика с собственной частотой 5 гц, предназначенного для измерения вибраций в пределах  $\pm 3$  мм, нужно обеспечить свободный ход не менее 16 мм. Конструктивно выполнить такой датчик не всегда представляется возможным, поэтому статический прогиб иногда компенсируют введением подпятниковых пружин с относительно малой жесткостью и большим ходом в датчиках, измеряющих вертикальные вибрации [2]. При измерениях горизонтальных вибраций подпятниковые пружины не ставятся, т. е. датчики не могут работать в любой пространственной ориентации. Введение подпятниковых пружин ухудшает частотные свойства датчиков на высоких частотах вследствие проявления высших резонансов компенсационной пружины. Перспективным является электрический способ компенсации статического прогиба в датчиках с магнитоэлектрическим преобразователем, заключающийся в следующем. По катушке преобразователя пропускается постоянный ток, который, взаимодействуя с полем постоянного магнита, удерживает сейсмическую массу в том или ином положении в зависимости от своей величины и направления. Компенсирующую силу можно легко определить:

$$F = B I l_k,$$

где  $B$  — индукция в воздушном зазоре преобразователя,

$l$  — активная длина проводника катушки.

$I_k$  — ток компенсации.

В связи с тем, что компонента силы веса массы, создающая статический прогиб, в зависимости от пространственной ориентации датчика меняется по закону синуса, легко выполнить устройство регулирования  $I_k$  для обеспечения нормальной работы датчика в любом положении. Данный способ был использован [3] при создании низкочастотных магнитоэлектрических вибродатчиков с собственной частотой 4—6 гц и некомпенсированным статическим прогибом 7—16 мм. При индукции в зазоре 2000 тесла, числе витков 700 ( $R_{\text{кат}} = 500 \text{ ом}$ ) ток компенсации равнялся 10 ма. Датчики устойчиво работали при любой ориентации.

Использование частотного диапазона вплоть до частоты резонанса возможно лишь в том случае, когда неравномерность амплитудно-частотной характеристики в зоне резонанса не превышает допустимой погрешности измерений. Для этих целей обычно стремятся ввести эффективное успокоение колебательной системы. В магнитоэлектрических датчиках успокоение осуществляется электромагнитным способом: токами Фуко каркаса катушки и генерированным током катушки. Эффект успокоения может быть получен тем больше, чем выше индукция в воздушном зазоре магнитной системы, так как степень успокоения пропорциональна второй степени индукции. При проектировании замкнутой системы (рис. 2) имеет смысл полностью использовать габариты магнитопровода (т. е.  $D_1$  должно быть равно  $D_2$ ) с целью получения максимальной чувствительности датчика, так как индукция  $B$  в зазоре не зависит от среднего зазора  $D_{\text{ср}}$ , а чувствительность пропорциональна индукции и активной длине витков катушки. Действительно, из закона Ома для магнитной цепи следует

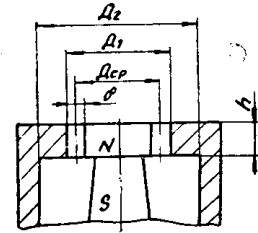


Рис. 2. Магнитная система вибродатчика

$$\Phi = \frac{I\omega}{R_k + R_m + R_v},$$

где  $\Phi$  — поток магнитной индукции;

$I\omega$  — намагничивающая сила магнита;

$R_k$  — магнитное сопротивление постоянного магнита;

$R_m$  — магнитное сопротивление магнитопровода;

$R_v = \frac{\delta}{S_v}$  — магнитное сопротивление воздушного зазора;

$S_v$  — площадь сечения воздушного зазора.

В реальном преположении, что  $R_k + R_m \ll R_v$ , получим

$$\Phi \cong \frac{I\omega}{\delta} \cdot S_v.$$

Следовательно, 
$$B = \frac{\Phi}{S_v} = \frac{I\omega}{\delta}.$$

Таким образом, при сохранении постоянной величины рабочего зазора  $\delta$  выигрыш в чувствительности получается в  $\frac{D_2}{D_1}$  раз и индукция в зазоре не изменяется. Изменение величины  $D_{\text{ср}}$ , строго говоря, может повлиять положительно на эффект успокоения, но недостаточно, поэтому для выравнивания амплитудно-частотной характеристики в зоне резо-

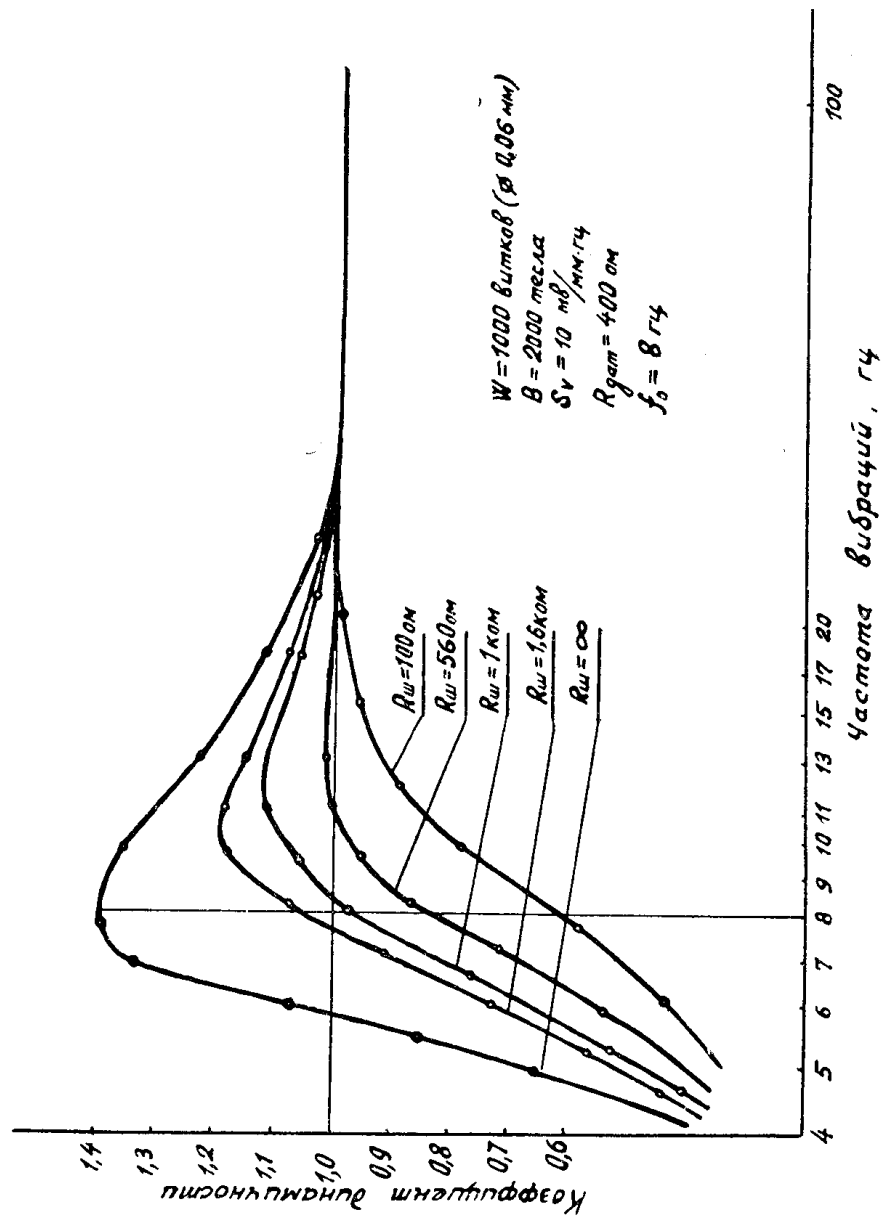


Рис. 3. Влияние шунтирования вибродатчика на амплитудно-частотную характеристику.

нанса прибегают к шунтированию датчика, заведомо соглашаясь при этом с потерей чувствительности и некоторым повышением собственной частоты  $f_0$ . На рис. 3 показано экспериментально снятое семейство амплитудно-частотных характеристик магнитоэлектрического датчика при различном шунтировании. Для приведенных параметров датчика оптимальным сопротивлением шунта является  $R_{ш}=560 \text{ ом}$ .

Необходимо отметить, что стабильность амплитудно-частотных характеристик в зоне резонанса связана с изменением степени успокоения  $\beta$  датчика. Для магнитоэлектрических датчиков уменьшение степени успокоения вызывается ростом активного сопротивления алюминиевого или медного каркаса катушки и витков от температуры. Это показано на рис. 4, только для удобства по оси абсцисс отложены значения коэффициента динамичности  $K_d$ , связанного на частоте резонанса со степенью успокоения зависимостью

$$K_d = \frac{1}{2\beta}.$$

Как видно из графика, изменение степени успокоения от температуры составляет примерно  $2,5\% \text{ } 10^\circ\text{C}$ .

Все вышеизложенные соображения легли в основу проектирования датчиков, применяемых в ряде виброизмерительных приборов, причем датчики конструктивно отличались друг от друга только жесткостью пружин [4, 5]. Конструкция датчика с собственной частотой  $f_0 = 17 \text{ гц}$  показана на рис. 5, а его фотография — на рис. 6.

Магнитная система вибродатчика состоит из постоянного конусообразного магнита 1 с напрессованным на него полюсным наконечником 2 и цилиндрического магнитопровода 3. Постоянный магнит изготовлен из сплава «магнико», а детали 2 и 3 из магнитно-мягкого железа. Магнит конусной частью вставляется в магнитопровод и поджимается шайбой 4. В радиальном зазоре магнитной системы помещена катушка 5 магнитоэлектрического преобразователя, которая наматывается на дюралевый каркас с рычагом 6. Детали 5 и 6 образуют сейсмическую массу упругой системы вибродатчика, которая с помощью двух крестообразно расположенных плоских пружин 7 подвешивается к приливу магнитопровода, жестко соединенного с дюралевым корпусом 8 винтами. Корпус завинчивается крышкой 9 и снабжен двумя кнопками — токовыми 10 и приливом с резьбой для крепления к объекту. Пружины 7

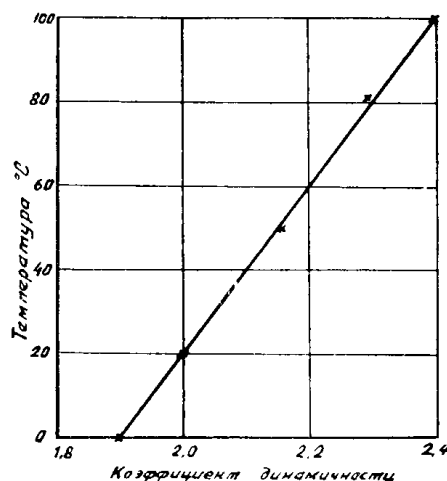


Рис. 4. Термостабильность коэффициента динамичности

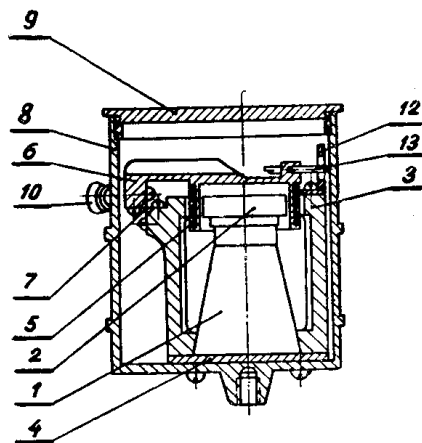


Рис. 5. Конструкция датчика

изготовлены из высококачественной пружинной стали толщиной 0,06 мм. Рабочая длина пружин 1,5 мм. Таким образом, плоские пружины образуют шарнир без трения и обеспечивают вращательное движение сейсмической массы. Для ограничения хода катушки преобразователя к магнитопроводу прикреплен упор 12 с пазом, в котором ходит ограничительный штифт 13. Магнитоэлектрический преобразователь имеет

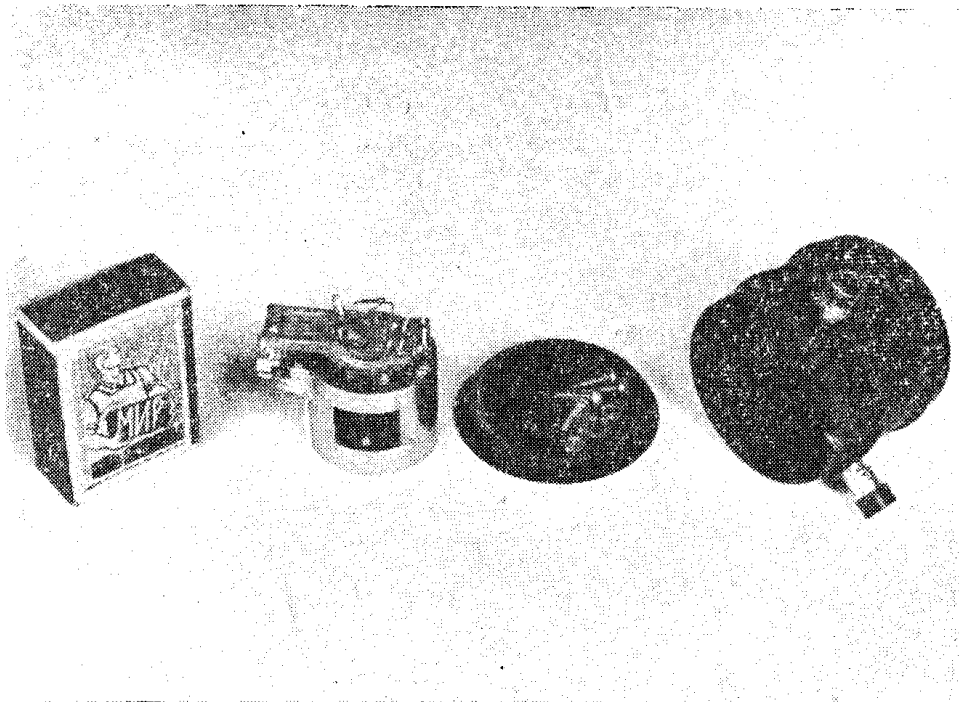


Рис. 6. Датчик со снятым корпусом

следующие параметры: индукция в воздушном зазоре 2500 тесла, число витков катушки 1000 (провод ПЭЛ-II 0,08 мм), сопротивление катушки 200 ом.

Техническая характеристика датчика:

чувствительность по скорости — 10 мв/мм гц;

частотный диапазон 15—1200 гц (с неравномерностью амплитудно-частотной характеристики в зоне резонанса  $\pm 12\%$ );

верхний предел измеряемых амплитуд вибросмещения — 2 мм;

верхний предел измеряемых ускорений (длительный режим) — 15 g.

верхний предел измеряемых ускорений (кратковременный режим) — 30 g;

чувствительность к боковым вибрациям не более — 10%;

температурный диапазон  $\pm 60^\circ\text{C}$ ;

пространственная ориентация любая;

вес датчика 180 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Гик. Частотные характеристики реальных сейсмических вибродатчиков и их моделирование. Труды конференции «Автоматический контроль и электрические измерения». Вып. II. Новосибирск, 1960.

2. Ю. П. Иориш. Виброметрия. 1963.

3. Л. Д. Гик, А. И. Пинчук, Ф. Д. Лаптев, И. Г. Митюхин, В. И. Печуркин, Г. С. Жартовский. Измеритель вибраций ВВА 1. Удостоверение о регистрации № 48292, 1964.

4. Л. Д. Гик, Г. С. Жартовский, И. Г. Митюхин, В. И. Печуркин. Разработка вибродатчика. Удостоверение о регистрации № 48288, 1964.

5. К. Б. Карандеев, Л. Д. Гик, И. Г. Митюхин, Г. С. Жартовский, В. И. Печуркин, Ф. Д. Лаптев, Л. А. Томилина, Я. Т. Загорский. Разработка виброизмерительного прибора для работы с индукционным датчиком. Удостоверение о регистрации № 48290, 1964.