

УДК 534.647
DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-1-133-141

Повышение надежности измерения ускорений при виброиспытаниях

В. Г. Эдвабник¹, М. М. Кузнецов^{2*}

¹ АО «НИИ «Октава», г. Новосибирск, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: a9214439@yandex.ru

Аннотация. В работе анализируются некоторые причины искажения задаваемых и измеряемых параметров вибрации при испытаниях аппаратуры на электродинамическом вибростенде. В частности, определяется влияние стыков сопрягаемых поверхностей столов вибростенда – переходного стола и переходного стола – приспособления для вибрации. Предложена идеализированная модель стыка двух поверхностей, которая может быть теоретически описана с помощью теории обобщенной проводимости гетерогенных структур. Стык представлен как матрица металла с включениями пустот, представленных как компоненты смеси, имеющей бесконечную проводимость. Выведено соотношение, показывающее, что модуль упругости стыка двух металлических поверхностей примерно на 30 % меньше, чем у однородного металла. Полученные теоретические выводы являются обоснованием рекомендации о повышении жесткости механической системы «стол вибростенда – переходный стол – приспособление для виброиспытаний» за счет введения в стыки тонкой (40–80 мкм) полиэтиленовой пленки. Показана фундаментальная причина возникновения разности измерений величины виброускорения в различных контрольных точках – наличие опрокидывающего момента в механической системе. Устранение методической ошибки при виброиспытаниях возможно при управлении вибростендом не по реальной, а по условной точке управления. Приведены и обоснованы рекомендации по выбору условной точки управления вибростендом при виброиспытаниях аппаратуры.

Ключевые слова: вибростенд, виброиспытания, виброускорение, приспособление для виброиспытаний, датчик ускорения, основное направление, поперечное направление, контрольная точка

Введение

При проведении виброиспытаний аппаратуры на вибростенде механическая испытательная подсистема представляет собой стол вибростенда динамического (ВД), приспособление для виброиспытаний (ПВИ) и установленное в нем испытуемое изделие (ИИ). В подавляющем большинстве случаев между столом ДВ и ПВИ устанавливается дополнительный переходной стол, чтобы в дорогостоящем «основном» столе, являющемся частью ВД, не изнашивались отверстия для установки ПВИ. Переходной стол может использоваться до 10 лет, а затем заменяется; при этом переходные отверстия стола ВД остаются абсолютно неизношенными. Общий вид механической подсистемы при виброиспытаниях показан на рис. 1.

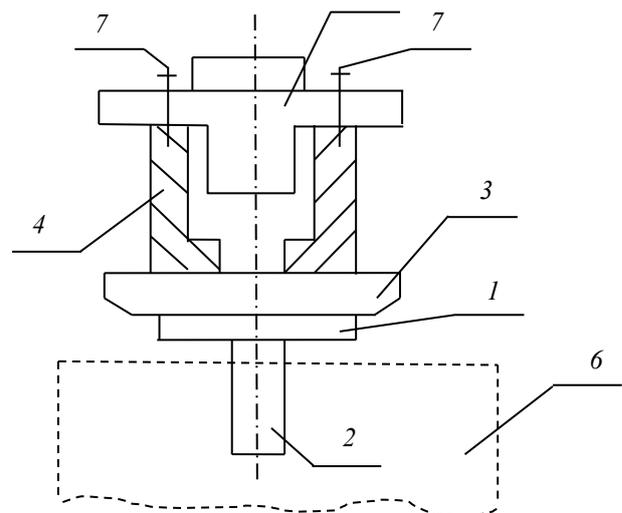


Рис. 1. Механическая подсистема при виброиспытаниях аппаратуры:

1 – стол ДВ со штоком 2; 3 – переходной стол; 4 – ПВИ; 5 – ИИ; 6 – неподвижная часть вибростенда; 7 – элементы крепления ИИ и ПВИ

Методы и материалы

Понятно, что датчик виброускорений, установленный на ненагруженный стол ДВ и на ПВИ в местах крепления ИИ (именно эти места выбирают в качестве контрольных точек – КТ – для установки датчиков виброускорений) дает различные показания. В первую очередь это связано с наличием в испытательной подсистеме двух стыков сопрягаемых поверхностей – между столом ДВ и переходным столом, а также между переходным столом и ПВИ [1].

Качество стыков существенно влияет на достоверность воспроизведения вибрации и надежность измерений характеристик режимов вибраций [2].

Проиллюстрируем это положение. Шероховатость реальных поверхностей колеблется от 40 мкм ($40 \cdot 10^{-6}$ м) при фрезеровании и координатно-расточных работах до 6 мкм ($6 \cdot 10^{-6}$ м) при шлифовании [3]. Допустимые предельные отклонения от плоскости для реальных конструктивных элементов в зависимости от степени точности поверхности колеблются от $25 \cdot 10^{-6}$ до $150 \cdot 10^{-6}$ м и выше, и это при достаточно жестких допусках. В то же время из известной формулы (1), связывающей перегрузку, частоту и амплитуду гармонической вибрации [4], легко видеть, что при такой незначительной перегрузке, как $2g$ (g – ускорение свободного падения), на ча-

стоте 50 Гц амплитуда вибрации составляет $0,25 \cdot 10^{-6}$ м, что на два порядка меньше величин отклонения размеров реальных конструкций идеальной поверхности за счет неплоскостности и шероховатости деталей [1]

$$n = \frac{Af^2}{250}, \quad (1)$$

где n – перегрузка, ед.; A – амплитуда вибрации, мм; f – частота, Гц.

Легко видеть, что при такой незначительной перегрузке, как $2g$ (g – ускорение свободного падения), на частоте 50 Гц амплитуда вибрации составляет $0,25 \cdot 10^{-6}$ м, что на два порядка меньше величин отклонения размеров реальных конструкций идеальной поверхности за счет неплоскостности и шероховатости деталей [1].

Также отметим, что амплитуды колебаний в зоне высокочастотных резонансов (на частотах выше 1 000 Гц) существенно меньше величины зазора стыков, хотя стыки между накладным столом и ПВИ находятся в условиях значительного предварительного сжатия, необходимого для обеспечения условий нераскрытия стыка при максимальных рабочих нагрузках [1].

Стык шероховатых поверхностей схематично представлен на рис. 2 [5].

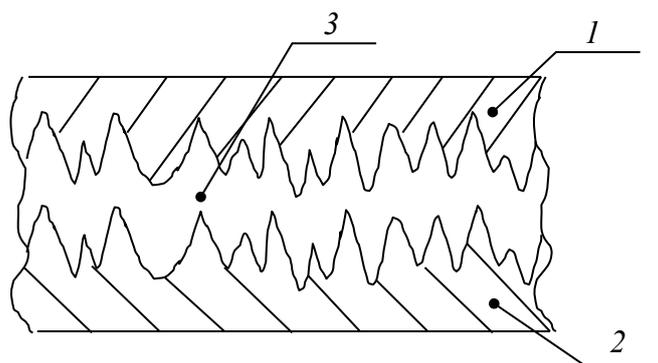


Рис. 2. Увеличенное изображение стыка шероховатых поверхностей:

1, 2 – сопряженные детали; 3 – зазор (пустое пространство)

Наличие пиков и впадин ввиду шероховатости поверхностей стыкуемых деталей 1 и 2 приводит к образованию пустых прост-

ранств – зазоров в стыке. Затяжка болтов (винтов) при стыковке деталей приводит к некоторому сминанию соприкасающихся

пиков шероховатости или неплоскостности, но не может привести к полному смыканию зазора 3. Отсутствие сплошного контакта между сопрягаемыми поверхностями дает основание называть места полного смыкания пятном контакта. Из многочисленных исследу-

ований известно, что пятно контакта стыкуемых деталей при сжатии составляет величину не более 5–10 % от общей площади сопрягаемых поверхностей [6].

Схематическая идеализация стыкуемых поверхностей показана на рис. 3 [5].

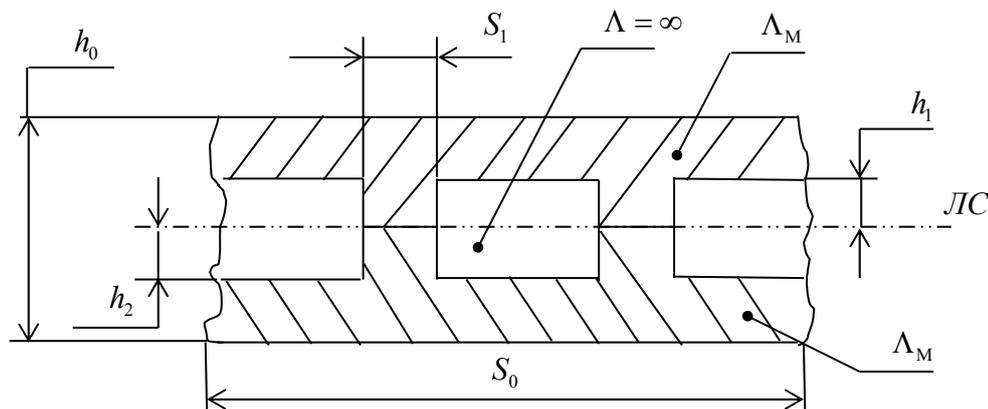


Рис. 3. Схематическая идеализация стыка шероховатых поверхностей

Выделим мысленно пограничный слой зоны контакта толщиной $h_0 > h_1 + h_2$, где h_1 и h_2 – минимальные размеры выступов-впадин вследствие шероховатости при обработке контактируемых поверхностей по линии стыка (рис. 3, 4). В данной идеализации не будем учитывать волнистостей при отклонении от идеальной плоскости.

Учитывая вышесказанное о размерах пятна контакта, полагаем, что

$$\frac{nS_1}{S_0} = 0,1, \quad (2)$$

где S_1 – площадь одиночного контактного пятна в месте стыка сопрягаемых деталей;

n – количество точек контакта;

S_0 – площадь поверхности сопрягаемых деталей в условно идеальном состоянии (без выступов-впадин из-за шероховатости).

Структура, показанная на рис. 3, может трактоваться с позиции теории обобщенной проводимости (разработанной В. Г. Эдвабником [7, 8]) как матрица из металла с включениями с бесконечной проводимостью (пу-

стотами) [5].

Относительная объемная концентрация θ_B включений (пустот) в показанной структуре вычисляется следующим образом:

$$\theta_B = \frac{(S_0 - nS_1) \cdot (h_1 + h_2)}{S_0 \cdot h_0}. \quad (3)$$

С учетом (2) и принимая

$$\frac{h_0}{h_1 + h_2} = 1,5 \quad (4)$$

(т. е. общая толщина h_0 стыка в 1,5 раза превышает суммарную высоту $(h_1 + h_2)$ выступов-впадин шероховатых поверхностей сопрягаемых деталей), из (3) получаем

$$\theta_B = 0,6. \quad (5)$$

Значение θ_B в реальности будет несколько меньше 0,6, так как идеализация на рис. 3 отличается от приближенной к реальной картине, показанной на рис. 2, – реально меньше, чем это показано на рис. 3.

Модуль упругости – параметр, подпадающий под определение обобщенной проводимости. Вычисление модуля упругости рассматриваемой структуры производится по формуле, выведенной в [9]:

$$1 - \theta_B^{2/3} \leq \frac{\Lambda_\infty}{\Lambda_M} \leq \frac{1 - \theta_B^{2/3}}{1 - \theta_B^{2/3} \left(1 - \theta_B^{1/3}\right)}. \quad (6)$$

При $\theta_B \approx 0,45$ из формулы (6) следует, что

$$0,43 \leq \frac{\Lambda_\infty}{\Lambda_M} \leq 0,49, \quad (7)$$

где Λ_∞ – обобщенная проводимость матрицы с включениями; Λ_M – обобщенная проводимость матрицы без включений.

Формула (7) говорит о том, что модуль упругости рассмотренной структуры меньше модуля упругости материала (металла) без пустот примерно на 30 % (в $\sqrt{\Lambda_\infty/\Lambda_M}$ раз, а $\sqrt{43} \approx \sqrt{49} = 0,7$).

К идентичным выводам пришли и авторы работ [5, 10, 11], исследовавшие влияние упругого контактного слоя на собственные частоты составных конструкций и использовавшие другой подход и другую модель упругого контактного слоя.

Существенное снижение жесткости и собственной частоты реальных составных конструкций «стол ВД – накладной стол» и «накладной стол – ПВИ» вносит заметные искажения в воспроизведение режимов вибрации. Это, в свою очередь, может привести к недостоверным выводам при оценке стойкости испытываемой бортовой электронной аппаратуры (БЭА) к механическим воздействиям.

Обсуждение

Общая методика выбора условной точки управления следующая. КТ, формирующие условную точку управления, должны представлять собой пары противоположных КТ. Места установки виброизмерительных преобразователей (датчиков виброускорений) выбирают рядом с точками крепления ИИ

к ПВИ. Если же число точек крепления к ПВИ (крепление ИИ к ПВИ имитирует крепление БЭА в объекте применения – ракете, снаряде и т. п.) не является четным, а также если точки крепления не являются противоположными (относительно оси симметрии БЭА), то места установки датчиков виброускорений для управления ВД по условной точке управления допускается выбирать вне точек крепления БЭА к приспособлению, если при этом обеспечивается выполнение требований по точности поддержания режимов испытаний в основном направлении.

Добиться повышения жесткости механической подсистемы «ВД – накладной стол – ПВИ – ИИ» можно, если принять необходимые меры по ликвидации зазоров в стыках сопрягаемых деталей. Отраслевой стандарт [12] рекомендует применять в стыках между столом ДВ и накладным столом, а также между накладным столом и ПВИ упругопластичные пленки (например, типа МСО толщиной 40–80 мкм [13]), которые после сжатия стыкуемых поверхностей «выбирают» зазоры вследствие шероховатостей и волнистостей поверхностей деталей и после сжатия ведут себя практически как несжимаемые жидкости. Применение таких пленок, заменяемых после каждой стыковки элементов механической подсистемы при виброиспытаниях, позволяет эффективно бороться с искажениями вибрации в средне- и высокочастотном диапазонах (от нескольких сотен до двух тысяч герц) [1].

Помимо влияния стыков, которое нивелируется за счет уплотнения стыков тонкой полиэтиленовой пленкой, серьезное влияние на недостоверность результатов измерения виброускорений при испытаниях оказывает пространственная неустойчивость движения механической подсистемы «стол ВД – переходной стол – ПВИ – ИИ».

Представим себе, что механическая подсистема, показанная на рис. 1, в процессе виброиспытаний отклоняется на некоторый угол от вертикали, являющейся основным направлением вибрационного воздействия. Реально это происходит практически всегда, так как на практике центр масс механической подсистемы лежит по оси испытаний выше центра подвеса подсистемы [1].

Из рис. 4 понятно, что если линия, соединяющая центр масс механической подсистемы и центр подвеса, составляет некоторый угол α (отличный от нуля) с направлением действия задающей силы F_3 , всегда возникает некоторый «опрокидывающий» момент M , что эквивалентно появлению в контрольных точках КТ1 и КТ2 дополнительных инерционных сил (рис. 5).

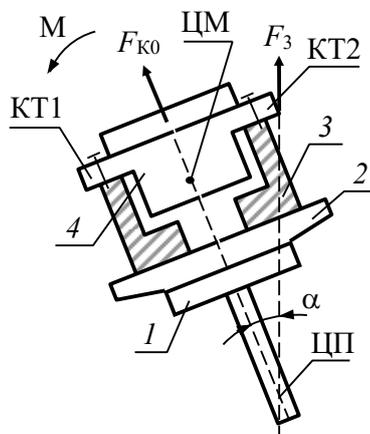


Рис. 4. К пространственной неустойчивости движения механической подсистемы при виброиспытаниях:

ЦП – центр подвеса вибратора; ЦМ – центр масс механической подсистемы; 1 – стол вибростенда; 2 – накладной стол; 3 – приспособление для виброиспытаний; 4 – испытуемое изделие; КТ1, КТ2 – контрольные точки вибрации; α – угол между направлением действия задающей силы F_3 и силы, вызывающей колебания в основном направлении F_{k0} при испытаниях изделия; M – момент силы, вызывающей неустойчивость колебательной подсистемы [14]

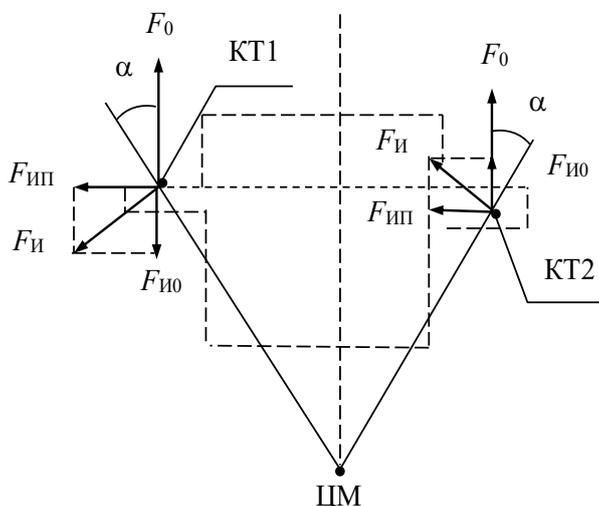


Рис. 5. Различия величины силы в КТ1 и КТ2

Приведем формулы для результирующих сил, возникающих при вибрации в основном направлении, для различных симметрично расположенных контрольных точек КТ1 и КТ2:

$$F_{КТ1} = F_0 - F_{и0}; \quad (8)$$

$$F_{КТ2} = F_0 + F_{и0}. \quad (9)$$

На рис. 5 пунктиром показано испытуемое изделие.

Симметрично линии, проходящей через центр масс механической подсистемы и параллельной действию толкающей силы при испытаниях в основном направлении F_O , расположены контрольные точки КТ1 и КТ2. Ввиду пространственной неустойчивости механической подсистемы в КТ1 и КТ2 помимо силы F_O будет наблюдаться влияние сил $F_{И}$, наличие плеч которых тождественно моменту M на рис. 4. Раскладывая силу $F_{И}$ в КТ1 и КТ2 на силы $F_{ИО}$, действующие в основном направлении вибрации и силы $F_{ИП}$, действующие в поперечном направлении, мы приходим к пониманию причин:

– возникновения поперечных ускорений при виброиспытаниях в одном заданном (основном) направлении;

– различия показаний датчиков ускорений, расположенных в симметричных контрольных точках возникают при малейшей несбалансированности (неустойчивости) механической подсистемы.

Поскольку значения виброускорений, измеряемых датчиками в КТ1 и КТ2 в основном направлении, пропорциональны действующим силам, правомерно представить, что

$$a_{O1} = a_{O3} - a_{И} \cos \alpha; \quad (10)$$

$$a_{O2} = a_{O3} + a_{И} \cos \alpha, \quad (11)$$

где a_{O1} , a_{O2} – измеряемые в КТ1 и КТ2 виброускорения в основном направлении; a_{O3} – задаваемые в основном направлении виброускорения; α – угол между осью испытаний и линией, проходящей через центр масс механической подсистемы и контрольную точку (КТ1 или КТ2) [14].

Результаты

Результатом приведенных исследований и рассуждений можно считать установление фундаментальной неустойчивости испытательной подсистемы, обуславливающей появ-

ление систематических ошибок при виброиспытаниях [15].

Из изложенного ясно, что в качестве точки управления вибростендом при виброиспытаниях нельзя использовать ни КТ1, ни КТ2. Результаты измерений в этих контрольных точках ведут к недостоверности, а в конечном счете неэффективности виброиспытаний. Устранение методических ошибок всегда является самым действенным методом повышения достоверности результатов измерений [16].

Текущее измерение угла α (см. рис. 4) в процессе испытаний для введения коррекции в систему обратной связи при управлении ВД является практически нерешаемой задачей (мгновенное значение угла α постоянно изменяется в процессе вибровоздействия). Без информации об угле α нельзя рассчитать значение опрокидывающего момента M .

Стандарт [12] устанавливает выбор так называемой условной точки управления, а именно, в качестве сигнала управления в цепь отрицательной обратной связи ВД поступает сигнал, являющийся полусуммой значений виброускорений в симметрично противоположных контрольных точках.

Формула для определения значения виброускорения в основном направлении в условной точке управления $a_{уу}$ выглядит следующим образом:

$$a_{уу} = \frac{a_{O1} + a_{O2}}{2} = a_{O3}, \quad (12)$$

где a_{O1} и a_{O2} определяются формулами (10) и (11).

Из (10) и (12) видно, что, даже не интересуясь величиной опрокидывающего момента M , управление ВД по условной точке управления устраняет методические систематические ошибки, неизбежно возникающие при управлении ВД в процессе испытаний от сигналов в отдельной физической контрольной точке (КТ1, КТ2 и др.).

Заключение

Повышения надежности измерения ускорений при виброиспытаниях можно достичь при реализации следующих мер:

1) введением в стыки сопрягаемых поверхностей «стол вибростенда – переходной стол» и «переходной стол – приспособление для виброиспытания» тонкой (40–80 мкм) пленки, например, марки МСО, которая при сжатии выбирает все имеющиеся зазоры и ведет себя как несжимаемая жидкость;

2) управление вибростендом в процессе виброиспытаний по условной точке управления, а именно: в качестве сигнала управления используется полусумма значений виброускорений в двух контрольных точках, расположенных симметрично относительно оси вибростенда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эдвабник В. Г. Способы достижения достоверности и надежности виброиспытаний // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 182–186.
2. Остроменский П. И. Вибрационные испытания радиоаппаратуры и приборов. – Новосибирск : Изд-во Новосибирского государственного ун-та, 1992. – 173 с.
3. Орлов П. И. Основы конструирования : справ.-метод. пособие в 3-х кн. – М. : Машиностроение, 1977. – Кн. 1. – 400 с.
4. Карпушин В. Б. Виброшумы радиоаппаратуры. – М. : Сов. радио, 1977. – 318 с.
5. Эдвабник В. Г., Механошин С. Г., Кузнецов М. М. К расчету параметров упругого контактного слоя // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Национ. науч. конф. «Наука. Обороны. Безопасность-2017» : сб. материалов (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – С. 123–127.
6. Трение, изнашивание и смазка : справочник в 2-х кн. (под ред. И. В. Крагельского и В. А. Алисина). – М. : Машиностроение, 1978. – Кн. 1. – 368 с.
7. Эдвабник В. Г. К теории обобщенной проводимости смесей [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-2. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19855> (дата обращения: 24.10.2022).
8. Эдвабник В. Г. Некоторые фундаментальные задачи теории обобщенной проводимости // Сибирский научный вестник. – 1999. – Вып. 3. – С. 276.
9. Эдвабник В. Г. Теория обобщенной проводимости. – Новосибирск : Наука, 2019. – 212 с.
10. Остроменский П. И., Волошин А. В. К расчету резонансных частот составных конструкций // Вопросы динамики механических систем. – Новосибирск : Новосибирский электротехнический ин-т, 1989. – 90 с.
11. Волошин А. В., Остроменский П. И. Использование модели упругого контактного слоя при расчетах собственных частот составных конструкций // Тезисы научных школ. – Новосибирск : НГТУ, 2008. – С. 188.
12. ОСТ В84-1742–87. Аппаратура радиоэлектронная и приборы. Методы виброиспытаний нормальной и повышенной точности. – М. : Госстандарт, 1988. – 41 с.
13. ГОСТ 10354–82. Пленка полиэтиленовая. Технические условия. – Введ. 1983–07–01. – М. : Стандартиформ, 1983. – 23 с.
14. Эдвабник В. Г. Методика выбора условной точки управления для повышения достоверности и качества вибрационных испытаний // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2013» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 187–191.
15. Эдвабник В. Г., Легкий В. Н., Шебалкова Л. В. Конструкторско-технологическое обеспечение надежности бортовой аппаратуры : учеб. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – 215 с.
16. Иориш Ю. И. Виброметрия. – М. : ГНТИМЛ, 1963. – 772 с.

Об авторах

Валерий Григорьевич Эдвабник – кандидат технических наук, член-корреспондент РАН, консультант генерального директора.

Максим Михайлович Кузнецов – кандидат технических наук, доцент.

Получено 21.06.2022

© В. Г. Эдвабник, М. М. Кузнецов, 2023

Improving the reliability of acceleration measurements during vibration tests

V. G. Edvabnik¹, M. M. Kuznetsov^{2*}

¹ JSC "Research Institute "Octava", Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: a9214439@yandex.ru

Abstract. The paper analyzes some causes of distortion of the set and measured vibration parameters during testing of equipment on an electrodynamic vibration stage. In particular, the influence of the joints of the mating surfaces on the vibration stand – a transition table and a transition table – a device for vibration is determined. An idealized model of the junction of two surfaces is proposed, which can be theoretically described using the theory of generalized conductivity of heterogeneous structures. The joint is represented as a matrix of metal with inclusions of voids, represented as components of a mixture having infinite conductivity. A relation is derived showing that the elasticity model of the two metal surfaces joint is approximately 30 % less than that of a homogeneous metal. The obtained theoretical conclusions substantiate the recommendation to increase the rigidity of the mechanical system "vibration stand table - transition table – device for vibration tests" by introducing a thin (40...80 microns) polyethylene film into the joints. The fundamental reason for the difference in the measurement of the vibration acceleration magnitude at different control points is shown – the presence of a tipping moment in the mechanical system. Elimination of a methodological error during vibration tests is possible when controlling the vibration stand not by a real, but by a conditional control point. Recommendations on the choice of a conditional control point for the vibration stand during vibration tests of the equipment are given and justified.

Keywords: vibration stand, vibration tests, vibration acceleration, device for vibration tests, acceleration sensor, main direction, transverse direction, control point

REFERENCES

1. Edvabnik, V. G. (2013). The vibration testing accuracy and reliability improving methods. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2013 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptika-2013]* (pp. 182–186). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
2. Ostromensky, P. I. (1992). *Vibratsionnye ispytaniia radioapparatury i priborov [Vibration tests of radio equipment and instruments]*. Novosibirsk: Novosibirsk State University Publ., 173 p. [in Russian].
3. Orlov, P. I. (1977). *Osnovy konstruirovaniia: Kn. 1 [Fundamentals of design: Book 1]*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 400 p. [in Russian].
4. Karpushin, V. B. (1977). *Vibroshumy radioapparatury [Vibroshums of radio equipment]*. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 318 p. [in Russian].
5. Edvabnik, V. G., Mekhanoshin, S. G., & Kuznetsov, M. M. (2017). On the calculation of parameters of an elastic contact layer. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2017: Natsional'noi nauchnoi konferentsii: Nauka. Oborona. Bezopasnost'-2017 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2017: National Scientific Conference: Science. Defense. Security-2017]* (pp. 123–127). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
6. Kragelsky, I. V., & Alisin, V. A. (1978). *Trenie, iznashivanie i smazka: Kn. 1 [Friction, wear and lubrication: Book 1]*. Moscow: Mashinostroenie Publ., 368 p. [in Russian].
7. Edvabnik, V. G. (2015). On the theory of generalized conductivity of mixtures. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*, No. 1-2. Retrieved from <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19855> (accessed: 10/24/2022).

8. Edvabnik, V. G. (1999). Some fundamental problems of the theory of generalized conductivity. *Sibirskiy nauchnyy vestnik [Siberian Scientific Bulletin]*, 3, p. 276 [in Russian].
9. Edvabnik, V. G. (2019). *Teoriya obobshchennoy provodimosti [Theory of generalized conductivity]*. Novosibirsk: Nauka Publ., 212 p. [in Russian].
10. Ostromensky, P. I., & Voloshin, A. V. (1989). On the calculation of resonant frequencies of composite structures. *Voprosy dinamiki mekhanicheskikh sistem [Questions of dynamics of mechanical systems]*. Novosibirsk: Novosibirsk Electrotechnical Institute Publ., 90 p. [in Russian].
11. Voloshin, A. V., & Ostromensky, P. I. (2008). Using the elastic contact layer model in the calculations of natural frequencies of composite structures. *Tezisy nauchnykh shkol [Abstracts of Scientific Schools]*. Novosibirsk: NSTU Publ., P. 188 [in Russian].
12. Branch Standard. (1988). OST V84-1742-87. Electronic equipment and devices. Methods of vibration tests of normal and increased accuracy. Moscow: Gosstandart Publ., 41 p. [in Russian].
13. State Standard. (1983). GOST 10 354-82. Polyethylene film. Technical conditions. Moscow: Standartinform Publ., 23 p. [in Russian].
14. Edvabnik, V. G. (2013). The technique of a conventional control point choosing for reliability and quality of the vibration tests increasing. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-2013 [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptika-2013]* (pp. 187–191). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
15. Edvabnik, V. G., Legkiy, V. N., & Shebalkova, L. V. (2020). *Konstruktorsko-tehnologicheskoe obespechenie nadezhnosti bortovoi apparatury [Design and technological support of reliability of onboard equipment]*. Novosibirsk: NSTU Publ., 215 p. [in Russian].
16. Iorish, Yu. I. (1963). *Vibrometriia [Vibrometry]*. Moscow: GNTIML Publ., 772 p. [in Russian].

Author details

Valery G. Edvabnik – Ph. D., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Consultant to the General Director.

Maxim M. Kuznetsov – Ph. D., Associate Professor.

Received 21.06.2022

© V. G. Edvabnik, M. M. Kuznetsov, 2023