ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 10813-1— 2011

Вибрация

РУКОВОДСТВО ПО ВЫБОРУ ВИБРОСТЕНДОВ

Часть 1

Оборудование для испытаний на воздействие вибрации

ISO 10813-1:2004
Vibration generating machines — Guidance for selection — Part 1: Equipment for environmental testing
(IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2012

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Автономной некоммерческой организацией «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АНО «НИЦ КД») на основе собственного аутентичного перевода стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 183 «Вибрация, удар и контроль технического состояния»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2011 г. № 594-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 10813-1:2004 «Вибростенды. Руководство по выбору. Часть 1. Оборудование для испытаний на воздействие внешних факторов» (ISO 10813-1:2004 «Vibration generating machines — Guidance for selection — Part 1: Equipment for environmental testing»). Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5 (пункт 3.5).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации и межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых информационных указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет

© Стандартинформ, 2012

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 1
4 Требования к вибрационным испытаниям 1
5 Типы и характеристики вибростендов 3
6 Рекомендации по выбору вибростенда 9
Приложение А (справочное) Примеры 18
Приложение В (справочное) Условия вибрационных испытаний в международных стандартах МЭК 20
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации и действующим в этом качестве межгосударственным стандартам 22
Библиография 23

Введение

Задача выбора вибростенда встает каждый раз, когда необходимо провести испытания на воздействие вибрации для новой продукции или провести эти испытания в режиме, ранее для данной продукции не применявшемся. При этом приходится решать, какому из вариантов отдать предпочтение: приобрести ли новое испытательное оборудование, модернизировать имеющееся, арендовать оборудование у другой испытательной лаборатории или даже заказать проведение испытаний в полном объеме специализирующейся на них лаборатории. В процессе принятия решения следует принимать во внимание ряд факторов:

- цель испытаний [например, определение вибропрочности и (или) виброустойчивости в заданных условиях окружающей среды (в режиме обычных или ускоренных испытаний); определение динамических характеристик конструкции; диагностирование; калибровка];
- требования к испытаниям;
- условия проведения испытаний [например, с возбуждением одного или нескольких типов вибрации; только на вибрацию или в сочетании с другими воздействиями (например, одновременное проведение вибрационных и климатических испытаний)];
- особенности испытуемого объекта.

Настоящий стандарт распространяется на оборудование для испытаний на вибропрочность и (или) виброустойчивость, и установленная в нем процедура выбора исходит, в первую очередь, из требований к таким испытаниям. Однако пользователь стандарта должен иметь в виду, что на выбор испытательного оборудования могут существенно повлиять специфичность условий испытаний, равно как и испытуемого объекта. Так, например, требование возбуждать вибрацию объекта, который перед этим был установлен в климатической камере, предъявляет особые требования к интерфейсу вибростенда, а если испытуемый объект имеет большие размеры и (или) сложную форму и при этом обладает многочисленными резонансами для разных направлений колебаний, то это может потребовать применения более мощного испытательного оборудования, чем то, что было бы выбрано в соответствии с настоящим стандартом для объекта той же массы, но обладающего большой жесткостью. Ввиду того, что указанные особенности трудно поддаются формализации, связанные с ней вопросы в настоящем стандарте не рассматриваются.

Таким образом, основным критерием выбора испытательного оборудования, рассматриваемого в настоящем стандарте, является его способность создать вибрацию требуемого уровня для конкретного испытуемого объекта.

Если испытательное оборудование предполагается использовать в испытаниях разных видов, то это также должно быть учтено при его выборе. Кроме того, выбор вибростенда должен сопровождаться выбором соответствующей системы управления вибростендом, что в настоящем стандарте не рассматривается.

Необходимо иметь в виду, что вибростенд относится к сложным видам оборудования, правильный выбор которого возможен лишь при соответствующей квалификации. В такой ситуации покупатель зачастую вынужден обращаться к помощи третьей стороны. Использование настоящего стандарта позволит покупателю оценить, насколько обоснованным будет решение по выбору вибростенда, предложенное ему третьей стороной.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Вибрация

РУКОВОДСТВО ПО ВЫБОРУ ВИБРОСТЕНДОВ

Часть 1

Оборудование для испытаний на воздействие вибрации

Vibration. Guidance for selection of vibration generating machines. Part 1. Equipment for dynamic environmental testing

Дата введения — 2012—12—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает руководство по выбору вибростендов, используемых в испытаниях на воздействие факторов окружающей среды исходя из требований испытаний.

Руководство распространяется на выбор:

- типа испытательного оборудования;
- модели испытательного оборудования;
- некоторых основных элементов испытательного оборудования (исключая систему управления вибростендом).

Примечание — Некоторые примеры выбора вибростенда приведены в приложении А.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ИСО 2041 Вибрация, удар и контроль состояния. Словарь (ISO 2041, Mechanical vibration, shock and condition monitoring — Vocabulary)

ИСО 5344 Системы воспроизведения вибрации электродинамические. Технические характеристики (ISO 5344, Electrodynamic vibration generating systems — Performance characteristics)

ИСО 8626 Оборудование испытательное гидравлическое для воспроизведения вибрации. Методы представления характеристик (ISO 8626, Servo-hydraulic test equipment for generating vibration — Methods of describing characteristics)

ИСО 15261 Системы воспроизведения вибрации и удара. Словарь (ISO 15261, Vibration and shock generating systems — Vocabulary)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 2041, ИСО 5344, ИСО 8626 и ИСО 15261.

4 Требования к вибрационным испытаниям

4.1 Виды вибрационных испытаний

Цель вибрационных испытаний — определить способность объекта сохранять свои свойства и целостность в условиях воздействия вибрации заданной степени жесткости. В соответствии с решаемыми задачами вибрационные испытания подразделяют на испытания на вибропрочность и испытания на виброустойчивость.

Издание официальное

Испытания на вибропрочность проводят для проверки способности объекта противостоять воздействию вибрации заданной степени жесткости и нормально функционировать после прекращения этого воздействия. В испытаниях данного вида вибрационные нагрузки могут приводить к механическим повреждениям образца и могут быть использованы для прогнозирования срока службы объекта в условиях вибрационных нагрузок.

При испытаниях на виброустойчивость проверяется способность объекта выполнять свои функции и сохранять значения параметров в установленных пределах под воздействием вибрации. Во время испытаний на виброустойчивость объект, как правило, в течение установленного периода времени функционирует в нормальном режиме и подвергается воздействию вибрации, не вызывающей его механических повреждений. При этом регистрируются случаи отказов и сбоев в функционировании объекта.

4.2 Методы вибрационных испытаний

4.2.1 Общие положения

Экспериментальное воспроизведение вибрационных нагрузок может быть реализовано путем одночастотного и многочастотного возбуждений вибрации различными способами: на фиксированной частоте, с качанием частоты, в форме случайного (узкополосного и широкополосного) возбуждения и т. д., а также использованием смешанных режимов испытаний. Кроме того, возбуждение может прилагаться одновременно к нескольким точкам объекта и (или) в нескольких направлениях.

Обычно в технических условиях используют следующие виды вибрационного воздействия:

- гармоническая вибрация на фиксированных частотах;
- гармоническая вибрация с качанием частоты;
- широкополосная случайная вибрация;
- вибрация, воспроизводящая заданную акселерограмму процесса;
- синусоидальные импульсы с заполнением.

Испытания с возбуждением вибрации указанных видов кратко описаны в 4.2.2—4.2.5, основываясь преимущественно на требованиях, установленных в соответствующих международных стандартах (см. [1]—[4]). Однако необходимо иметь в виду, что в целях вибрационных испытаний могут быть использованы и другие виды вибрации.

Требования к возбуждаемой вибрации (и вытекающие из этого требования к испытательному оборудованию), установленные в международных стандартах, приведены в приложении В.

4.2.2 Гармоническая вибрация на фиксированных частотах

Этот вид испытаний заключается в последовательном воздействии гармонической вибрации на определенных частотах с заданными амплитудами на испытуемый объект в требуемом диапазоне частот. Частоту и амплитуду регулируют вручную. Система управления поддерживает постоянство воспроизводимого ускорения или перемещения. В программе испытаний указывают поддиапазоны частот и фиксированные частоты в пределах этих поддиапазонов, продолжительность испытаний и амплитуду перемещения, скорости или ускорения.

4.2.3 Гармоническая вибрация с качанием частоты

Сущность метода состоит в циклическом прохождении заданного диапазона частот от нижней до верхней границы и обратно при постоянстве заданных параметров вибрации (обычно в качестве таких параметров используют амплитуду перемещения на низких частотах и амплитуду ускорения на высоких частотах). Частота перехода от режима постоянной амплитуды перемещения к постоянной амплитуде ускорения обычно лежит в диапазоне от 10 до 500 Гц. Система управления поддерживает постоянство воспроизводимого ускорения или перемещения. В процессе качания частоты фиксируют механические резонансы и иные отклонения в динамическом поведении или функционировании испытуемого объекта. В программе испытаний указывают диапазон качания частоты, амплитуды перемещения и ускорения, частоту перехода, скорость качания и продолжительность испытаний.

4.2.4 Широкополосная случайная вибрация

Сущность метода заключается в создании в контрольной точке стола вибростенда или в некоторой точке испытуемого объекта широкополосной случайной вибрации, спектральная плотность ускорения которой должна быть близка к заданной, определенной по результатам натурных испытаний. Программу испытаний задают в виде уровней спектральной плотности ускорения для поддиапазонов частот, входящих в диапазон частот испытаний.

4.2.5 Воспроизведение акселерограммы процесса

В испытании данного вида объект подвергают воздействию временного сигнала (акселерограммы), определяемого через спектр отклика таким образом, чтобы моделировать эффекты, вызываемые короткодействующими случайными силами. Акселерограмма может представлять собой запись реаль-

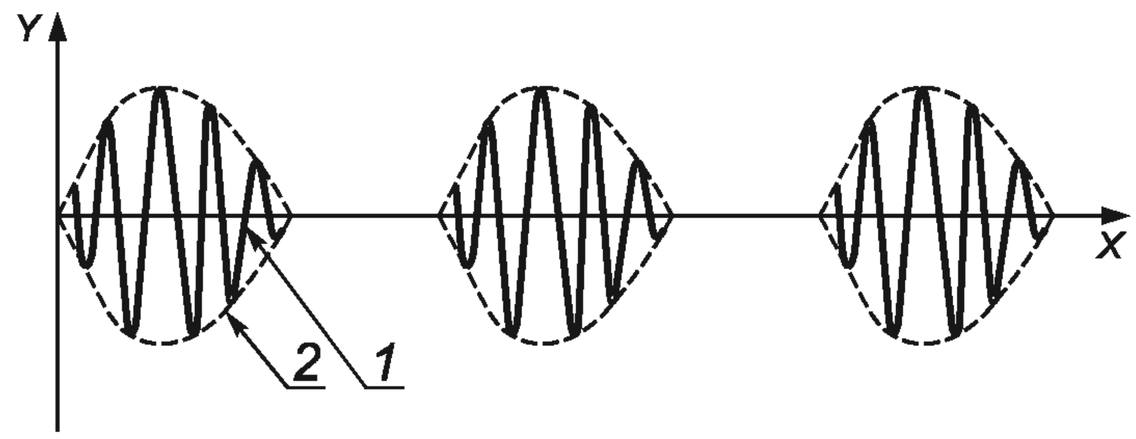
ного события, выборку случайного процесса или искусственно синтезированный сигнал. Использование акселерограммы позволяет с помощью одного временного сигнала охватить широкий спектр отклика и одновременно возбудить все моды колебаний объекта с учетом эффекта их связанности.

Испытания данного вида используют в тех случаях, когда объект в процессе эксплуатации подвергается воздействиям случайных динамических сил короткой длительности, например при землетрясении, взрыве, транспортной тряске.

Условия испытаний определяются диапазоном частот испытаний, заданным спектром отклика, числом и длительностью акселерограмм и числом больших пиков отклика.

4.2.6 Синусоидальные импульсы с заполнением

В испытании данного вида объект возбуждают на фиксированных частотах (либо наблюдаемых в реальных условиях эксплуатации объекта, либо изменяемых с заданным шагом, не превышающим половину октавы) установленным числом синусоидальных импульсов (см. рисунок 1). Эти фиксированные частоты могут совпадать с критическими частотами объекта, определенными при измерении его частотной характеристики.



X — время; *Y* — ускорение (перемещение) вибрации; *1* — несущая частота; *2* — огибающая сигнала

Рисунок 1 — Типичная последовательность синусоидальных импульсов с заполнением

Условия испытаний определяются диапазоном частот испытаний, уровнем вибрации, числом циклов колебаний в пределах одного импульса и числом импульсов. Система управления поддерживает постоянной амплитуду перемещения в диапазоне ниже частоты перехода и амплитуду ускорения в диапазоне выше этой частоты.

5 Типы и характеристики вибростендов

5.1 Основные типы вибростендов

5.1.1 Общие положения

Вибростенд является исполнительным органом вибрационной установки и обеспечивает воспроизведение и передачу на объект требуемой вибрации. Тип и свойства вибростенда определяют основные характеристики установки — как энергетические (вынуждающая сила, грузоподъемность, амплитуда перемещения, скорости или ускорения, диапазон частот), так и метрологические (допуски, гармонические искажения, колебания в поперечном направлении и т. д.). В зависимости от конструкции и принципа действия вибростенды подразделяют на электродинамические, гидравлические, механические, электромагнитные, пьезоэлектрические, магнитострикционные, резонансные и др. При испытаниях на вибропрочность и виброустойчивость наиболее часто используют электродинамические, гидравлические и механические вибростенды.

5.1.2 Электродинамический вибростенд

Электродинамический вибростенд создает динамическую вынуждающую силу за счет взаимодействия переменного тока в подвижной катушке, которая служит исполнительным устройством вибростенда, и постоянного магнитного поля. Для передачи движения испытуемому объекту катушка может быть соединена с ним через стол.

Вибрационную установку, в состав которой входит электродинамический вибростенд, называют электродинамической. Она включает в себя также задающий генератор и систему управления, усилитель мощности, источник питания катушки подмагничивания, средства измерений и вспомогательные средства, обеспечивающие работу установки. В состав установки может входить также горизонтальный стол скольжения.

5.1.3 Гидравлический вибростенд

Гидравлический вибростенд создает динамическую вынуждающую силу в результате изменения давления жидкости по заданному закону. В гидравлических вибростендах сила и движение передаются испытуемому объекту посредством гидравлического исполнительного устройства (поршня, толкаемого потоком жидкости), который управляется сервоклапанами.

Вибрационную установку, в состав которой входит гидравлический вибростенд, называют гидравлической. Она включает в свой состав также гидравлическую систему питания, задающий генератор, замкнутую цепь управления, измерительное и вспомогательное оборудование.

5.1.4 Механический вибростенд

Механический вибростенд создает динамическую вынуждающую силу в результате преобразования механической энергии вращательного движения.

Механические вибростенды подразделяют на кинематические и инерционные.

В кинематических вибростендах воздействие на испытуемый объект осуществляют путем его отклонения непосредственно управляющим механизмом, например кривошипно-шатунным, кулисным или кулачковым.

В вибростендах инерционного действия вынуждающая сила создается посредством вращательного (иногда возвратно-поступательного) движения неуравновешенных масс.

Вибрационная установка, в состав которой входит механический вибростенд, называется механической.

5.2 Основные характеристики вибростендов

Характеристики электродинамических и гидравлических вибростендов приведены соответственно в ИСО 5344 и ИСО 8626 и включают в себя следующие:

- номинальную вынуждающую силу;
- допустимую статическую нагрузку;
- диапазон частот;
- пределы воспроизведения перемещения, скорости и ускорения;
- коэффициент гармонических искажений;
- коэффициент поперечных составляющих;
- неравномерность распределения вибрации по столу вибростенда;
- резонансные частоты вибростенда.

5.3 Особенности вибростендов разных типов

5.3.1 Электродинамический вибростенд

Типичные значения характеристик электродинамических вибростендов приведены в таблице 1. Изготовителями предлагаются ряды моделей, различающихся значениями номинальной вынуждающей силы. В случае приобретения вибрационной установки у изготовителя или при комплектовании такой установки из разных источников рекомендуется обращаться к технической документации, где указаны реальные технические характеристики оборудования.

Таблица 1

Номинальная вынуждающая сила, Н	Выходная мощность усилителя мощности, ВА	Диапазон частот, Гц	Максимальное перемещение, мм	Максимальная скорость, м/с	Максимальное ускорение без нагрузки, м/с^2	Максимальная нагрузка, кг	Масса подвижной системы, кг
31,5	6,3	От 5 до 13000	2,5	0,4	200	1,0	0,16
63	19	От 5 до 10000	2,5	0,4	300	1,5	0,2
125	62,5	От 5 до 8000	5,0	0,8	500	2,0	0,25
250	165	От 5 до 8000	8,0	1,3	650	4,0	0,38
500	400	От 5 до 7000	8,0	1,3	800	10,0	0,62
1000	1000	От 5 до 5000	12,5	2,0	1000	25,0	1,0
2000	2000	От 5 до 5000	12,5	2,0	1000	75,0	2,0
4000	4000	От 5 до 4000	12,5	2,0	1000	200,0	4,0
8000	8000	От 5 до 3500	12,5	2,0	1000	300,0	8,0
16000	16000	От 5 до 3000	12,5	2,0	1000	400,0	16,0
32000	32000	От 5 до 2500	12,5	2,0	1000	500,0	32,0
64000	64000	От 5 до 2000	12,5	2,0	1000	1000,0	64,0
128000	128000	От 5 до 1800	12,5	2,0	1000	2000,0	128,0
200000	200000	От 5 до 1600	12,5	2,0	1000	3125,0	200,0

Примечание — Предельные значения для разных характеристик не могут быть достигнуты одновременно.

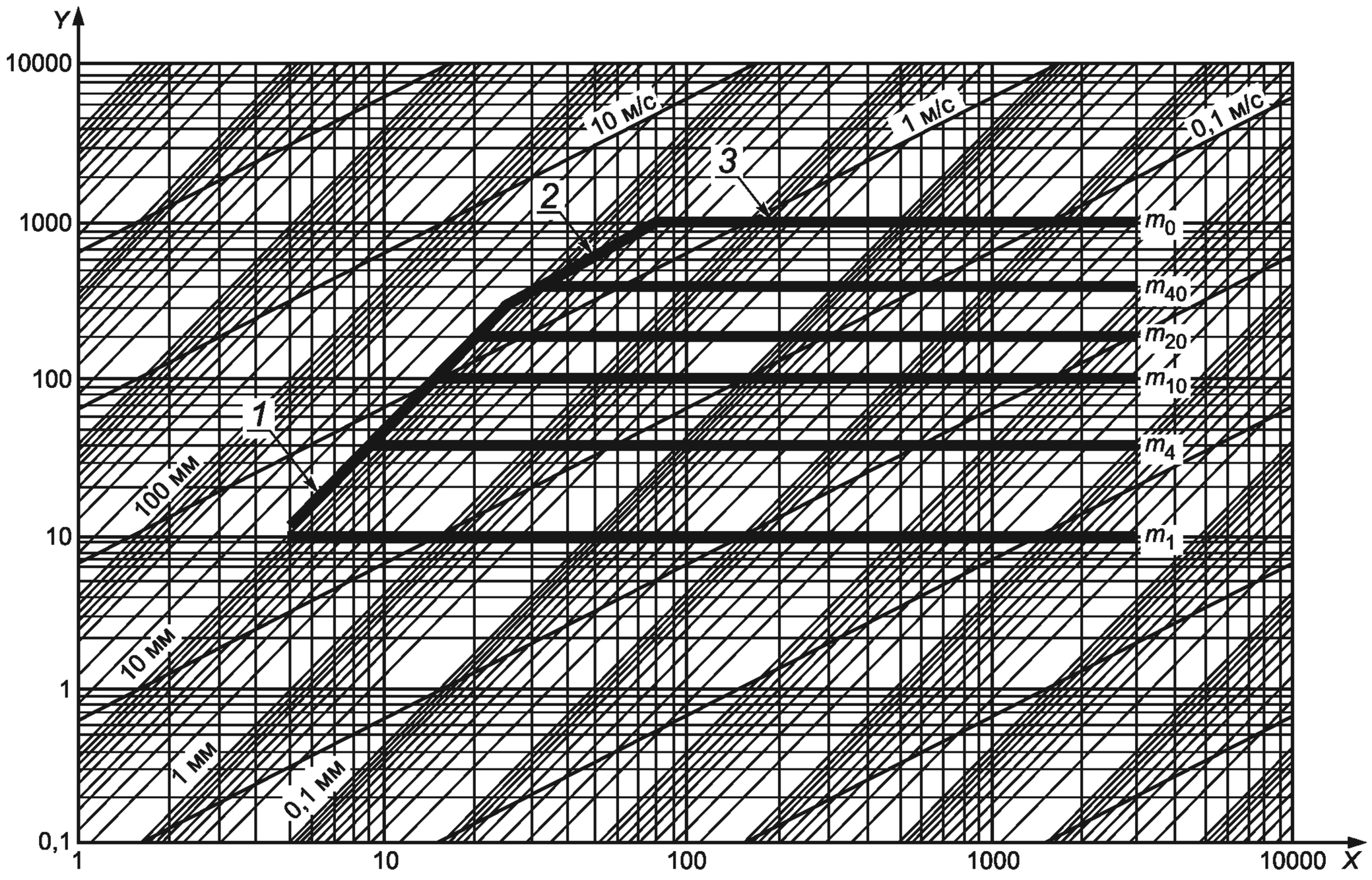
Характерными особенностями электродинамических вибростендов являются:

- возможность возбуждения вибрации любого вида: гармонической (на фиксированной частоте и с качанием частоты), случайной (широкополосной и узкополосной) и др.;
- простота и удобство управления (в ручном и автоматическом режимах);
- широкий диапазон частот: от 0,5 до 15000 Гц (обычно от 5 до 5000 Гц). Обычно, чем меньше номинальная вынуждающая сила, тем выше верхняя граница диапазона частот;
- большие значения воспроизводимых перемещений: до $\pm$ 25 мм (обычно до $\pm$ 12,5 мм) и ускорений: до 1500 м/с^2 (обычно до 1000 м/с^2);
- большие значения вынуждающей силы: до 400 кН (обычно до 200 кН);
- относительно большая допустимая нагрузка: до 4000 кг (обычно до 1000 кг);
- малый уровень гармонических искажений: около 5 % (за исключением отдельных областей частот, где искажения возрастают вследствие резонансов вибростенда и нагрузки);
- приемлемый уровень поперечных колебаний и неравномерности распределения вибрации по столу вибростенда: около 10 % (за исключением отдельных областей частот, где отклонение движения от заданного возрастает вследствие резонансов подвижной системы и эксцентриситета нагрузки).

Недостатком электродинамического вибростенда является наличие магнитного поля рассеяния в зоне стола, но при наличии в составе вибрационной установки устройства компенсации поля его удается уменьшить до значений порядка 0,001 Т.

Следует иметь в виду, что номинальную вынуждающую силу нельзя обеспечить во всем номинальном диапазоне частот. На нижних частотах она ограничена максимальным ходом стола (перемещением), на средних частотах — максимальным значением скорости, на высоких частотах — резонансами подвижной системы вибростенда. Достижимое значение ускорения зависит от массы нагрузки. ИСО 5344 устанавливает шесть испытательных нагрузок: m_0, m_1, m_4, m_{10}, m_{20}, m_{40}, где первая нагрузка равна нулю (ненагруженный стол вибростенда), а остальные имеют массы, при которых достигаются ускорения стола 10, 40, 400, 200 и 400 м/с^2 соответственно.

На рисунке 2 приведены типичные кривые зависимости ускорения (скорости, перемещения) от частоты при разных нагрузках.



X — частота, Гц; *Y* — ускорение, м/с^2; *1* — предел по перемещению; *2* — предел по скорости; *3* — максимальное ускорение

Рисунок 2 — Типичные характеристики электродинамического вибростенда

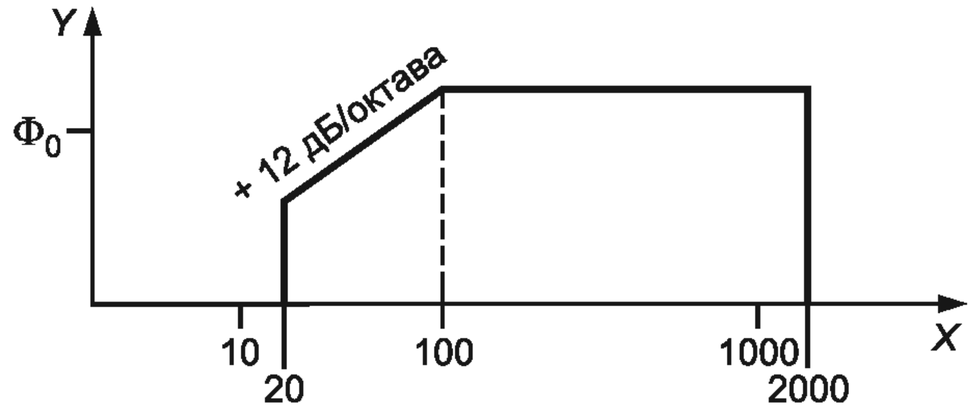
Для случайной вибрации номинальная вынуждающая сила в соответствии с ИСО 5344 определена как функция спектральной плотности мощности ускорения $\Phi_a(f)$ в $(м/с^2)^2/Гц$ (см. рисунок 3), имеющая вид:

$\Phi_a(f) = 0$ $f < 20$ Гц;

$\Phi_a(f) = (f/100)^2\Phi_0$ 20 Гц < f < 100 Гц;

$\Phi_a(f) = \Phi_0$ 100 Гц < f < 2000 Гц;

$\Phi_a(f) = \Phi_0(2000/f)^4$ или $10^{-4}\Phi_0$ f > 2000 Гц.



X — частота, Гц; Y — спектральная плотность мощности ускорения Φ_a

Рисунок 3 — Форма спектральной мощности ускорения для электродинамического вибростенда (по ИСО 5344)

Значение пик-фактора должно быть не менее 3.

5.3.2 Гидравлический вибростенд

Типичные значения характеристик гидравлических вибростендов приведены в таблице 2.

Характерными особенностями гидравлических вибростендов являются:

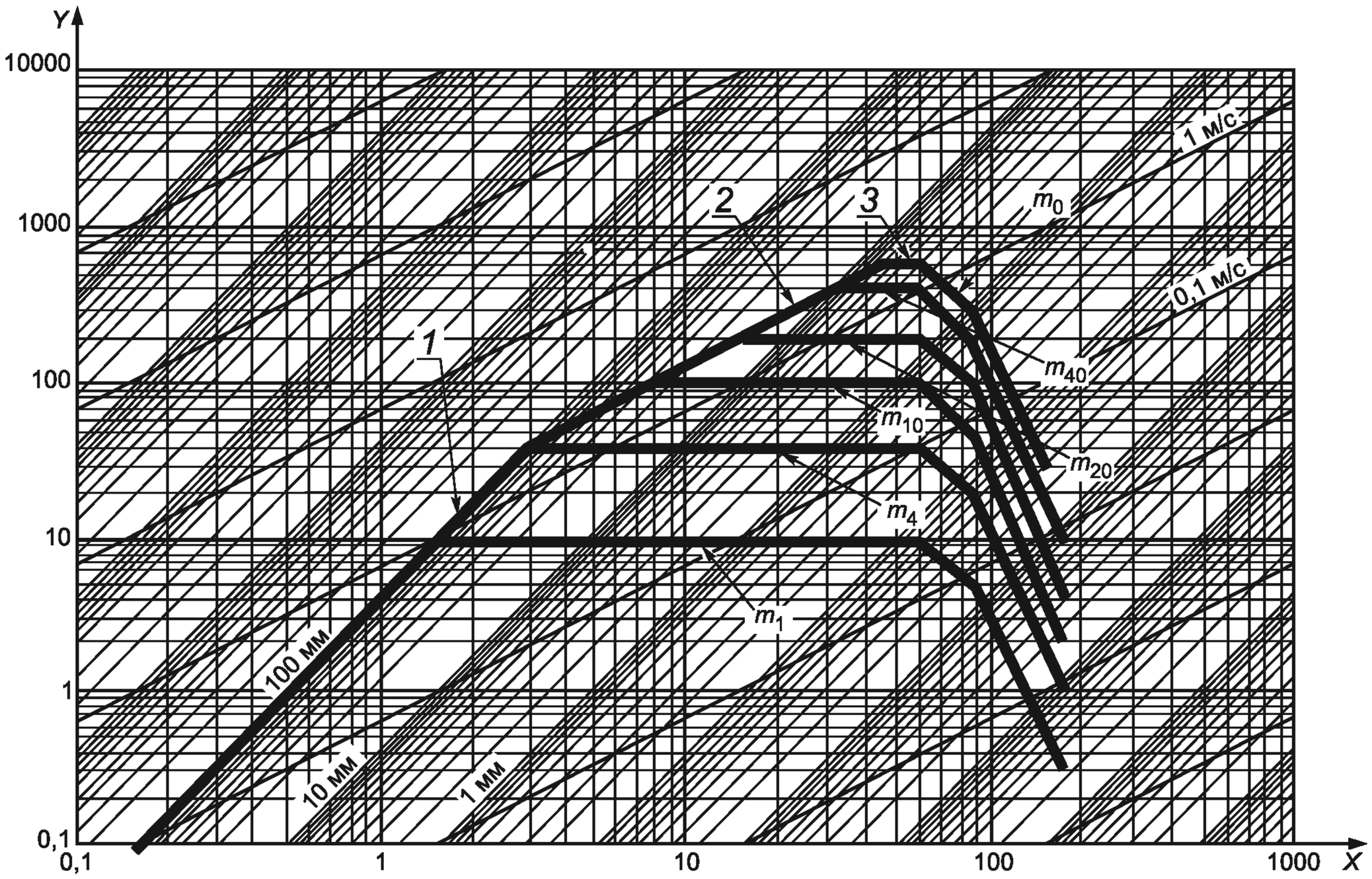
- возможность возбуждения вибрации любого вида;
- простота и удобство управления (в ручном и автоматическом режимах);
- расширение частотного диапазона до нуля в области низких частот и ограничение верхней частоты примерно 800 Гц (обычно не более 100 Гц);
- большие значения воспроизводимых перемещений: до 200 мм, ускорения: до 1000 $м/с^2$ и скорости: до 10 м/с (обычно до 2 м/с);

Таблица 2

Вынуждающая сила, Н	Диапазон частот, Гц	Максимальное перемещение, мм	Максимальная скорость, м/с	Максимальное ускорение, $м/с^2$	Масса подвижной системы, кг
5000	От 0,1 до 140	100	2,0	1000	5
8000	От 0,1 до 100	100	2,0	1000	8
10000	От 0,1 до 100	100	2,0	1000	10
15000	От 0,1 до 100	100	2,0	1000	15
20000	От 0,1 до 100	100	2,0	1000	20
30000	От 0,1 до 60	100	2,0	1000	30
50000	От 0,1 до 60	100	2,0	1000	50
100000	От 0,1 до 60	100	1,7	600	167
200000	От 0,1 до 60	100	0,8	300	667
500000	От 0,1 до 30	100	0,3	100	5000
1000000	От 0,1 до 30	100	0,1	30	33333

- очень большая развиваемая сила: до 10 МН (обычно не более 1 МН);
- очень большая допустимая нагрузка: до нескольких тонн;
- малый уровень поперечных колебаний: обычно от 5 % до 10 %;
- отсутствие магнитного поля в зоне стола;
- малая чувствительность к эксцентриситету нагрузки;
- повышенный уровень гармонических искажений в низкочастотной области (ниже собственной частоты исполнительного устройства): до 15 % и более;
- низкий уровень гармонических искажений на частотах выше собственной: около 5 %.

Типичные кривые для характеристик гидравлической установки показаны на рисунке 4. Они похожи на аналогичные кривые для электродинамических вибростендов, но имеют участки спада силы (ускорения) на высоких частотах.



X — частота, Гц; *Y* — ускорение, м/с^2; *1* — предел по перемещению; *2* — предел по скорости; *3* — максимальное ускорение

Рисунок 4 — Типичные характеристики гидравлического вибростенда

Для случайной вибрации значения номинальных характеристик аналогичны характеристикам электродинамического вибростенда. Номинальную силу задают через функцию спектральной плотности мощности ускорения $\Phi_a(f)$, $(м/с^2)^2/Гц$, (см. рисунок 5) или через функцию спектральной плотности мощности перемещения $\Theta(f)$, $м^2/Гц$, имеющие вид:

$$\Phi_a(f) = 0 \qquad \Theta(f) = 0 \qquad f < f_1;$$

$$\Phi_a(f) = \frac{f^4}{(f_2 f_3)^2}\Phi_0 \qquad \Theta(f) = \Theta_0 \qquad f_1 < f < f_2;$$

$$\Phi_a(f) = \frac{f^2}{f_3^2}\Phi_0 \qquad \Theta(f) = \frac{f_2^2}{f^2}\Theta_0 \qquad f_2 < f < f_3;$$

$$\Phi_a(f) = \Phi_0 \qquad \Theta(f) = \frac{(f_2 f_3)^2}{f^4} \qquad f_3 < f < f_4;$$

$$\Phi_a(f) = \frac{f_4^2}{f^2}\Phi_0 \qquad \Theta(f) = \frac{(f_2 f_3 f_4)^2}{f^6} \qquad f_4 < f < f_5;$$

$$\Phi_a(f) = \frac{(f_4 f_5)^2}{f^4} \qquad \Theta(f) = \frac{(f_2 f_3 f_4 f_5)^2}{f^8} \qquad f_5 < f < f_6;$$

$$\Phi_a(f) = 0 \qquad \Theta(f) = 0 \qquad f > f_6,$$

где f_1 — нижняя граница диапазона частот возбуждения;

f_2 — частота перехода между диапазонами постоянного перемещения и постоянной скорости;

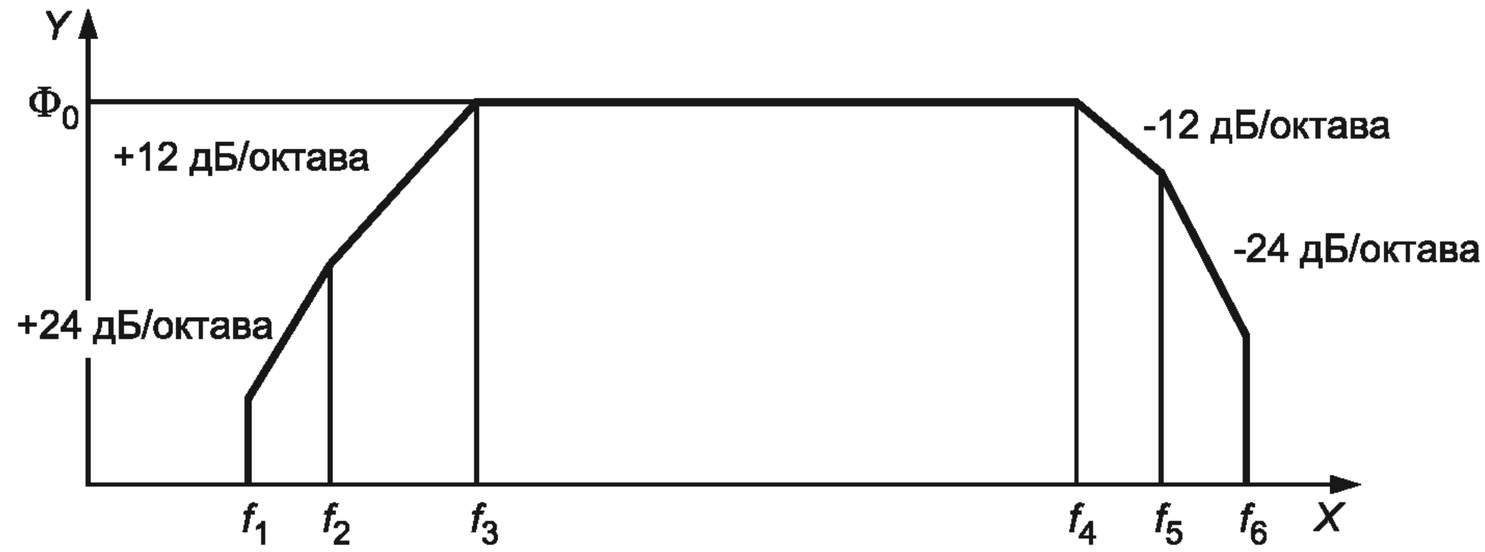
f_3 — частота перехода между диапазонами постоянной скорости и постоянного ускорения;

f_4 — предельная частота первого ограничения по ускорению;

f_5 — предельная частота второго ограничения по ускорению;

f_6 — верхняя граница диапазона частот возбуждения;

$$\Theta_0 = \Phi_0 \frac{1}{(2\pi f_2)^4}.$$



X — частота, Гц; *Y* — спектральная плотность мощности ускорения Φ_a

Рисунок 5 — Форма спектральной мощности ускорения для гидравлического вибростенда (по ИСО 8626)

Значение пик-фактора должно быть не менее 3.

5.3.3 Механический вибростенд

Типичные значения характеристик для механических вибростендов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Номинальная нагрузка, кг	Диапазон частот, Гц	Максимальное перемещение, мм	Максимальное ускорение, м/с^2	Масса подвижной системы, кг
5	От 5 до 100	± 5	150	0,33
25	От 5 до 100	± 5	150	1,66
50	От 5 до 100	± 5	100	5,0
100	От 5 до 80	± 3	100	10,0
250	От 5 до 80	± 3	50	50,0
500	От 5 до 80	± 3	50	100,0
1000	От 5 до 80	± 2,5	50	200,0

Характерными особенностями механических вибростендов являются:

- возможность возбуждения только гармонической вибрации на фиксированных частотах;
- сложность управления;
- ограниченный диапазон частот: от 0,1 до 300 Гц (обычно от 5 до 100 Гц);
- низкий уровень воспроизводимых перемещений: обычно около 5 мм, в инфразвуковой области возможно увеличение до 100 мм;
- низкий уровень воспроизводимого ускорения: до 300 м/с^2 (обычно не более 150 м/с^2);
- допустимая нагрузка до нескольких тонн (обычно несколько десятков или сотен килограммов);
- повышенный уровень гармонических искажений (обычно от 15 % до 25 %, наличие высокочастотного узкополосного шума);
- повышенный уровень поперечных колебаний: около 25 %;
- отсутствие магнитного поля в зоне вибростола;
- простота конструкции;
- низкая стоимость;
- перемещение (скорость, ускорение) не зависит от массы нагрузки;
- перемещение не зависит от частоты.

5.3.4 Сравнение вибростендов электродинамического, гидравлического и механического типов

В таблице 4 приведены предельные значения основных характеристик вибростендов трех типов.

Области обычного использования сравниваемых вибростендов показаны на рисунке 6.

Таблица 4

Параметр	Тип вибростенда		
	электродинамический	гидравлический	механический
Вынуждающая сила, кН	От 0,1 до 400	От 5 до 10000	От 0,5 до 150
Масса нагрузки, кг	1000	5000	500
Перемещение, мм	± 25, обычно ± 12,5	± 200, обычно ± 50	± 100, обычно ± 5
Ускорение (без нагрузки), м/с^2	1500, обычно 1000	1000, обычно 100	300, обычно 100
Частота, Гц	От 0,5 до 20000, обычно от 5 до 500	От 0 до 800, обычно от 1 до 200	От 0,1 до 300, обычно от 5 до 100
Гармонические искажения, %	От 2 до 5, на некоторых частотах до 25 и более	15 ниже собственной частоты, 5 выше собственной частоты	20 и более
Поперечные колебания, %	От 5 до 10, на некоторых частотах до 25 и более	От 5 до 10	20 и более
Неравномерность распределения вибрации по столу, %	От 5 до 10, на некоторых частотах до 25 и более	От 2 до 5	От 5 до 10
Магнитная индукция, Т	0,001 и более	Нет	Нет
Чувствительность к эксцентриситету нагрузки	Существенная	Низкая	Существенная
Виды возбуждения	Все	Все	На фиксированных частотах
Цена	Высокая	Высокая	Низкая

6 Рекомендации по выбору вибростенда

6.1 Выбор типа вибростенда

В соответствии с требованиями к испытаниям вибростенд должен обеспечивать воспроизведение вибрации с заданными параметрами: перемещением d, ускорением a, спектральной плотностью ускорения Φ_a на заданной частоте f или в диапазоне частот от f_L до f_H при нагружении объектом массы m_s и допустимых уровнях гармонических искажений, поперечных составляющих вибрации, неравномерности распределения вибрации по столу вибростенда и магнитного поля рассеяния в зоне стола.

Исходя из указанных требований к параметрам испытаний и из особенностей и характеристик вибростендов, указанных в 5.3 и 5.4, определяют тип вибростенда.

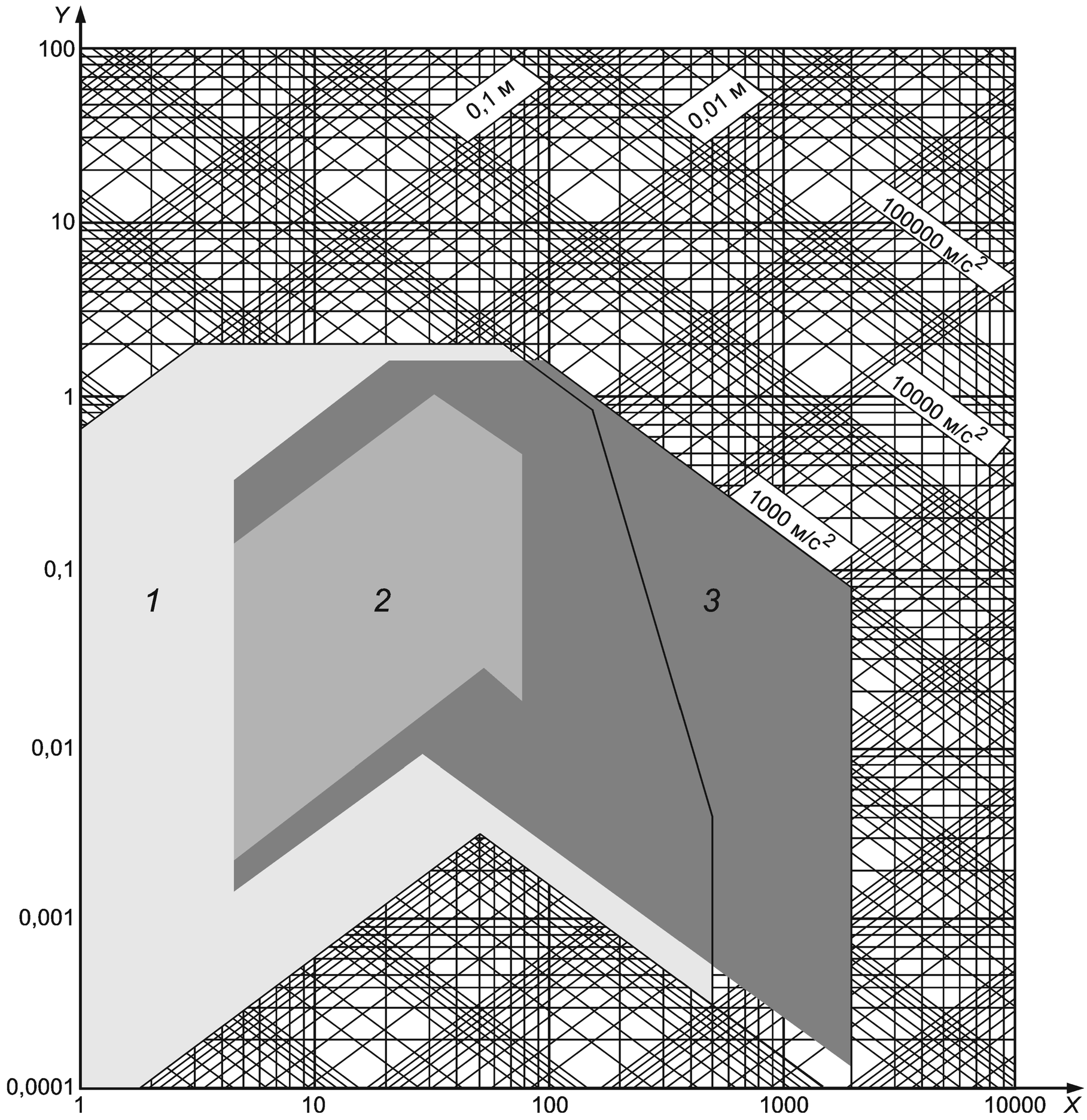
На высоких частотах (выше 1000 Гц) может использоваться только электродинамический вибростенд; на низких частотах (инфразвуковой диапазон частот) предпочтение следует отдать гидравлическому вибростенду; на средних частотах (до 200 Гц) могут использоваться все виды вибростендов.

Для воспроизведения значительных перемещений (более ± 25 мм) используют, как правило, гидравлический вибростенд.

Случайная вибрация может быть воспроизведена электродинамическим и гидравлическим вибростендами.

Для испытаний очень тяжелых объектов (более 1000 кг) целесообразно использовать гидравлический вибростенд.

При возможности использовать вибростенды каждого из трех типов следует обращать внимание на точностные характеристики, определяемые уровнем допустимых гармонических искажений, поперечных составляющих, неравномерности распределения вибрации и магнитного поля рассеяния в зоне стола. Наличие требования к отсутствию магнитных полей практически исключает или существенно затрудняет использование электродинамического вибростенда. Если же такого требования нет, то выбор электродинамического вибростенда может оказаться предпочтительным. С другой стороны, при достаточно низких требованиях к точности испытаний с целью снижения затрат на испытания целесообразно использовать механический вибростенд.



X — частота, Гц; *Y* — скорость, м/с; *1* — гидравлические вибростенды; *2* — механические вибростенды; *3* — электродинамические вибростенды

Рисунок 6 — Сравнение областей типичного применения электродинамических, гидравлических и механических вибростендов

Гидравлический вибростенд следует использовать для испытаний на низких частотах, когда требуются большие перемещения и большие усилия.

Электродинамический вибростенд целесообразно использовать при испытаниях в широкой полосе частот с небольшими перемещениями и высокими ускорениями. Для них характерно малое искажение формы сигнала при гармоническом возбуждении и высокая точность управления при случайном возбуждении.

Для проведения испытаний на воздействие случайной вибрации могут быть использованы гидравлические и электродинамические вибростенды.

Номинальные характеристики вибростендов должны превышать требования к испытаниям.

6.2 Выбор модели вибростенда

6.2.1 Общие положения

Основным требованием к вибрационной установке, определяемым условиями испытаний, является способность возбуждать колебания объекта массой m_s на частоте f или в пределах диапазона час-

тот от f_L до f_H с максимальной амплитудой перемещения d_{max}, скорости v_{max} или ускорения a_{max} или с заданной спектральной плотностью ускорения $\Phi_a(f)$.

Процедура определения характеристик установки, удовлетворяющей заданным требованиям испытаний, приведена в 6.2.1—6.2.7. Эти характеристики определяют выбор модели вибростенда.

Все расчеты требуют знания числовых параметров, которые должен предоставлять изготовитель.

6.2.2 Диапазон частот

Рабочий диапазон частот вибрационной установки, который должен превышать диапазон частот испытаний, зависит от нескольких факторов.

Если вибрационная установка должна работать в диапазоне низких частот, например при испытаниях систем виброизоляции, то необходимо учитывать частотную характеристику усилителя мощности и иногда даже частотную характеристику акселерометра.

Сверху рабочий диапазон частот виброустановки обычно ограничивают значением, приблизительно в 1,1 раз превышающим первую резонансную частоту ее подвижного элемента. Это значение следует принимать только как общую рекомендацию, поскольку в реальности динамическое поведение подвижного элемента вибростенда с установленным на нем испытуемым объектом может приводить к недопустимо большим вибрациям в направлениях, отличных от основного направления возбуждения. В связи с этим изготовители указывают верхний предел рабочего диапазона частот как достижимый для данной вибрационной установки, оставляя решение о возможности работы вблизи этого предела в конкретном испытании за пользователем. В общем случае верхняя граница рабочего диапазона частот будет зависеть от динамического поведения стола, системы крепления объекта испытаний и самого объекта.

6.2.3 Максимальное ускорение

Определенное изготовителем вибростенда максимальное ускорение определяет предел ускорений, при которых работа вибростенда в непрерывном режиме испытаний не приведет к повреждению подвижного элемента или к его чрезмерной перегрузке. Выполнение требования по допустимым уровням ускорения обеспечивает нормальный срок эксплуатации подвижного элемента, который зависит от общего периода работы вибростенда и уровня воспроизводимых ускорений.

Поскольку ускорение и сила, развиваемая вибрационной установкой, пропорциональны выходному току усилителя мощности, то конструкция большинства установок предусматривает применение усилителя мощности минимального размера, необходимого для достижения установленных максимальных значений ускорения и силы. Однако возможны ситуации, когда выходной ток усилителя мощности может существенно превышать необходимый для воспроизведения максимального ускорения и максимальной вынуждающей силы. В этом случае существует опасность работы в режиме со значениями рабочих характеристик вибростенда выше допустимых, что способно существенно сократить срок его эксплуатации, поэтому таких ситуаций следует избегать.

6.2.4 Вынуждающая сила

Развиваемая вибростендом сила F зависит от заданного условиями испытаний ускорения a и общей массы m_z, которую необходимо привести в движение, $m_z = m_e + m_s$, где m_e — масса подвижной системы вибростенда (см. таблицы 1—3), а m_s — масса испытуемого объекта (нагрузки), включая массу устройства крепления объекта на столе:

$$F = m_z a = (m_e + m_s)a. \quad (1)$$

Для режима возбуждения гармонической вибрации максимальную вынуждающую силу F_s определяют по формуле

$$F_s = (m_e + m_s)a_{max}, \quad (2)$$

где a_{max} — максимальное ускорение, заданное в условиях испытаний.

Для режима возбуждения случайной вибрации вынуждающую силу F_r выражают через среднеквадратичное значение ускорения a_r по формуле

$$F_r = (m_e + m_s)a_r, \quad (3)$$

$$a_r = [\Phi_a(f)\Delta f]^{1/2}; \quad (4)$$

где $\Phi_a(f)$ — спектральная плотность мощности ускорения в полосе частот f.

Формула (4) получена в предположении, что в условиях испытаний спектральная плотность мощности ускорения $\Phi_a(f)$ задана в виде равномерного спектра прямоугольной формы в полосе частот Δf.

6.2.5 Масса подвижной системы

Массу подвижной системы m_e определяют исходя из массы испытуемого объекта m_s и максимально допустимой нагрузки вибростенда согласно таблицам 1—3. В качестве первого приближения можно для m_e взять значение массы подвижной системы по соответствующей таблице из строки, в которой указано значение нагрузки, равное массе испытуемого объекта, или указанную в строке ниже.

Другой способ получить оценку m_e основан на знании параметров m_s, a_{max} и a_0 и использовании формулы

$$m_e = m_s \frac{a_{max}}{a_0 - a_{max}}, \quad (5)$$

где a_0 — максимальное ускорение вибростенда без нагрузки ($m_s = 0$), взятое из соответствующей таблицы 1, 2 или 3.

6.2.6 Номинальный ход подвижной системы

Для электродинамической вибрационной установки номинальный ход подвижной системы, определенный как ее максимальное перемещение S_L от положения равновесия вниз при отсутствии нагрузки, зависит от максимального перемещения d_{max}, общей массы m_z и собственной частоты f_z подвижной системы, нагруженной массой m_s:

$$S_L > d_{max} + l_{st} = d_{max} + \frac{g}{4\pi^2 f_z^2}, \quad (6)$$

где l_{st} — статическое перемещение подвижной системы от положения равновесия под нагрузкой;

g — ускорение свободного падения.

Формулу (6) можно также записать через собственную частоту f_e подвижной системы без нагрузки в виде

$$S_L > d_{max} + l_{st} = d_{max} + l_1 + l_2 = d_{max} + \frac{(1 + m_s / m_e)g}{4\pi^2 f_e^2} \quad (7)$$

или

$$S_L > d_{max} + \frac{a_0}{a_{max}} \frac{g}{4\pi^2 f_e^2}, \quad (8)$$

где l_1 — статическое перемещение подвижной системы под собственным весом;

l_2 — дополнительное статическое перемещение подвижной системы под нагрузкой.

Для гидравлической вибрационной установки номинальный ход подвижной системы (ход поршня) S_L зависит от размаха перемещения:

$$S_L > 2d_{max} = \frac{2a_{max}}{4\pi^2 f_L^2}, \quad (9)$$

где f_L — нижний предел диапазона частот.

Вышеприведенный вывод справедлив только для случая жесткой установки вибростенда на основание. Если вибростенд установлен, например, на виброизоляторах, то номинальный ход подвижной системы должен быть меньше рассчитанного на значение перемещения d_b корпуса вибростенда:

$$d_b = d_{max} \frac{m_z}{m_b},$$

где m_b — масса корпуса вибростенда.

Примечание 1 — Если вибростенд имеет устройство компенсации смещения подвижной системы под нагрузкой, то $S_L = d_{max}$.

Примечание 2 — Если диапазон частот испытаний включает в себя резонансную частоту системы виброизоляции, а масса испытуемого объекта велика, то это приведет к значительным колебаниям корпуса вибростенда, что сильно затруднит работу системы управления испытаниями.

6.2.7 Максимальная скорость

Для электродинамической и гидравлической вибрационных установок амплитуду максимальной скорости v_{max} определяют исходя из амплитуды максимального перемещения d_{max} и частоты перехода от области постоянного перемещения к области постоянной скорости f_t (около 20 Гц) по формуле

$$v_{max} = 2\pi f_t d_{max}. \quad (10)$$

Обычно эта величина не превышает 2 м/с.

Примечание — Для определения амплитуды перемещения *d* и скорости *v* целесообразно использовать номограмму зависимости перемещения, скорости и ускорения от частоты.

6.3 Выбор элементов вибрационной установки

6.3.1 Общие положения

Для обеспечения требуемых параметров воспроизводимой вибрации следует соответствующим образом выбрать и другие элементы вибрационной установки, помимо вибростенда, такие как усилитель мощности для электродинамической вибрационной установки и гидравлическую систему питания для гидравлического вибростенда.

Все расчеты требуют знания числовых параметров или графических зависимостей (см. рисунки 7—9), которые должен предоставлять изготовитель.

6.3.2 Выбор усилителя мощности

6.3.2.1 Общие положения

Усилитель мощности служит для питания электродинамического вибростенда током. Выходная мощность усилителя мощности, требуемая для развития вынуждающей силы от десятков до сотен тысяч ньютонов, изменяется от десятков ватт до сотен киловатт.

Нагрузкой усилителя мощности служит комплексный импеданс подвижной катушки вибростенда, зависящий от частоты.

Основными требованиями, предъявляемыми к усилителю мощности, являются:

- создание выходной мощности, обеспечивающей требуемую вынуждающую силу вибростенда в заданном диапазоне частот;
- малый уровень нелинейных искажений (менее 1 %, иногда 2 %);
- малый уровень шума (отношение сигнал/шум менее 50 дБ);
- возможность длительной непрерывной работы (обычно в течение 8 ч);
- устойчивость работы при повреждении подвижной катушки вибростенда.

6.3.2.2 Выходная мощность

Кажущуюся мощность *P*, В·А, усилителя мощности в первом приближении можно вычислить по формуле

$$P = UI, \tag{11}$$

где U — напряжение на клеммах подвижной катушки, В;

I — ток в подвижной катушке, А.

Выходное напряжение U определяют по формуле

$$U = E_c + (R + j\omega L)I, \tag{12}$$

где E_c — противоэлектродвижущая сила, $E_c = Blv$;

R — электрическое сопротивление подвижной катушки;

ω — угловая частота;

L — индуктивность подвижной катушки;

B — магнитная индукция в рабочем зазоре подвижной катушки;

l — общая длина проводника подвижной катушки;

v — скорость движения подвижной катушки.

На практике максимальную выходную мощность усилителя мощности необходимо знать для того, чтобы убедиться в способности вибрационной установки развить необходимую силу на частоте перехода между областями постоянной скорости и постоянного ускорения, которая обычно находится в диапазоне от 30 до 100 Гц.

Примечание — Частоте перехода 30 Гц соответствуют значения v_{max} = 2 м/с, a_{max} = 400 м/с^2; частоте перехода 80 Гц – v_{max} = 2 м/с, a_{max} = 1000 м/с^2; частоте перехода 100 Гц – v_{max} = 1,7 м/с, a_{max} = 1000 м/с^2.

В случае, когда $E_c >> (R + j\omega L)I$, выполняется приближенное равенство

$$U \approx E_c = Blv = \frac{Fv}{I}, \tag{13}$$

где F — вынуждающая сила V;

R — электрическое сопротивление подвижной катушки;

ω — угловая частота;

L — индуктивность подвижной катушки;

B — магнитная индукция в рабочем зазоре подвижной катушки;

l — общая длина проводника подвижной катушки;

v — скорость движения подвижной катушки.

Тогда требуемую максимальную кажущуюся мощность можно вычислить по формуле

$$P = UI = Fv. \quad (14)$$

Все параметры, входящие в формулу (14), выражены через свои среднеквадратичные значения. Обычно скорость и силу, развиваемую вибростендом, выражают через их пиковые значения v_{peak} и F_{peak} соответственно. Тогда

$$P = 0{,}5F_{peak}v_{peak}. \quad (15)$$

6.3.2.3 Ток в подвижной катушке

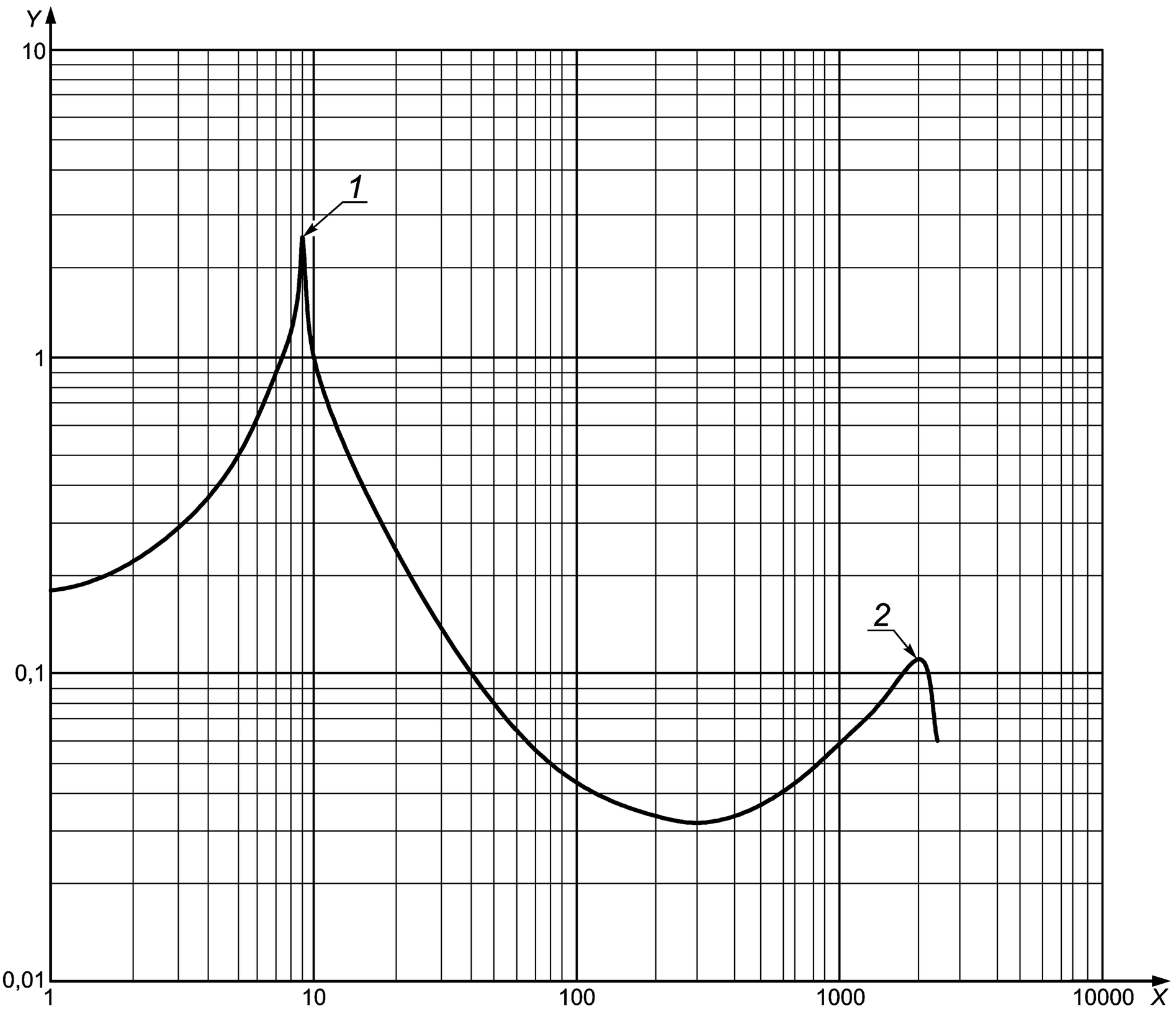
Ток в подвижной катушке вычисляют по формуле

$$I = 0{,}5\,\frac{F_{peak}v_{peak}}{U}. \quad (16)$$

Напряжение на выходе усилителя мощности U ограничивается напряжением питания используемых элементов в выходном каскаде усилителя. Если такими элементами являются транзисторы, то для них максимальное электрическое напряжение равно от 50 до 150 В.

6.3.2.4 Нагрузка усилителя мощности

Выходная мощность так же, как и выходные ток и напряжение, зависят от нагрузки усилителя, т. е. подвижной катушки вибростенда, чей импеданс изменяется в зависимости от частоты, как показано на рисунке 7.



X — частота, Гц; *Y* — импеданс, Ом; *1* — механический резонанс подвески подвижного элемента; *2* — первый резонанс подвижного элемента

Рисунок 7 — Пример импеданса нагрузки усилителя мощности

Импеданс нагрузки определяется электрическими параметрами катушки и параметрами ее движения по формуле

$$Z = U/I = R_c + j\omega L_c + Z_m, \quad (17)$$

где R_c — электрическое сопротивление катушки;

L_c — индуктивность катушки;

ω — угловая частота;

Z_m — дополнительная емкостная нагрузка, вносимая за счет движения катушки, $Z_m = 0{,}5F_{peak}v_{peak}/I^2$;

F — вынуждающая сила;

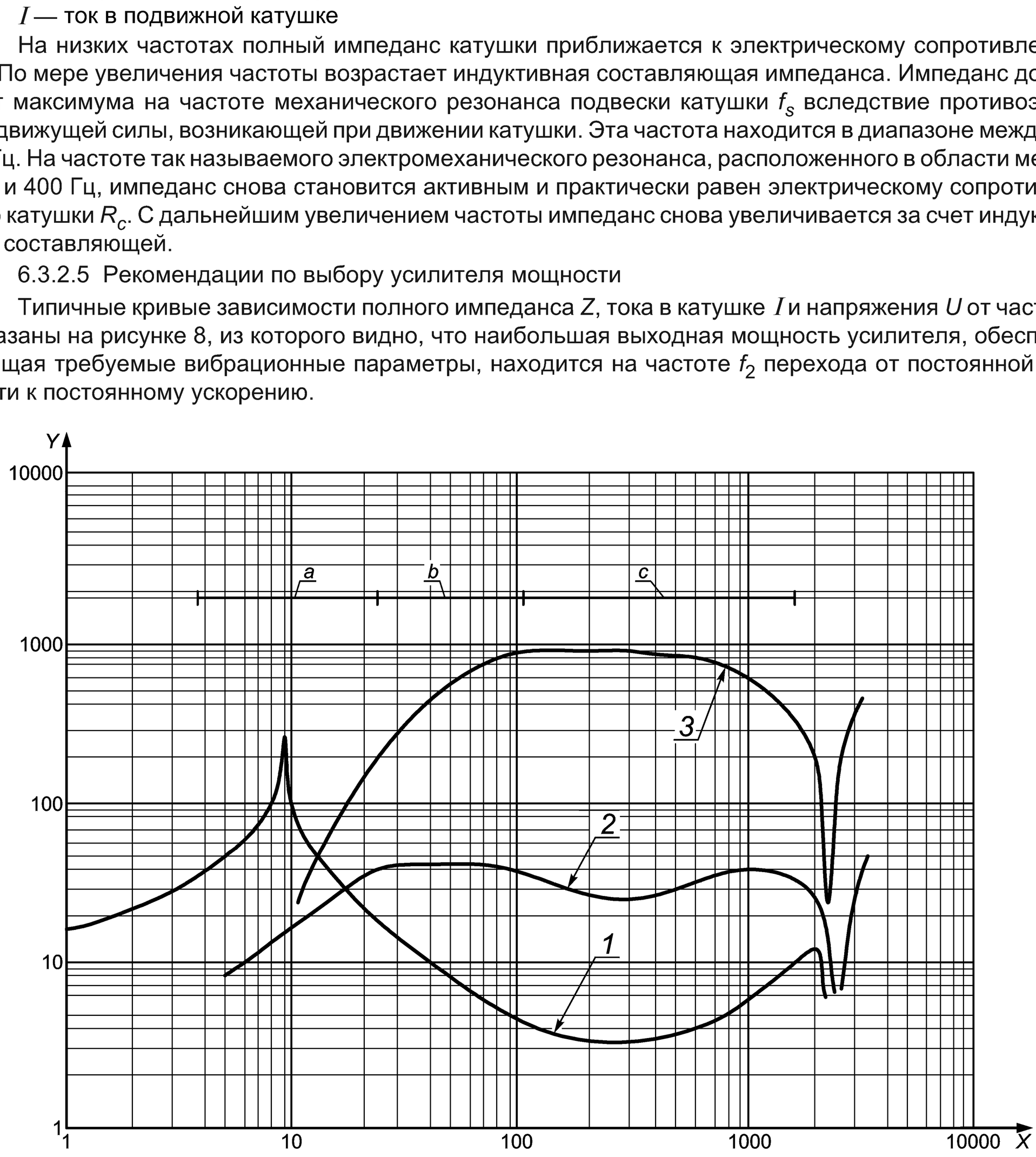
v — скорость движения катушки;

I — ток в подвижной катушке

На низких частотах полный импеданс катушки приближается к электрическому сопротивлению R_c. По мере увеличения частоты возрастает индуктивная составляющая импеданса. Импеданс достигает максимума на частоте механического резонанса подвески катушки f_s вследствие противоэлектродвижущей силы, возникающей при движении катушки. Эта частота находится в диапазоне между 7 и 60 Гц. На частоте так называемого электромеханического резонанса, расположенного в области между 200 и 400 Гц, импеданс снова становится активным и практически равен электрическому сопротивлению катушки R_c. С дальнейшим увеличением частоты импеданс снова увеличивается за счет индуктивной составляющей.

6.3.2.5 Рекомендации по выбору усилителя мощности

Типичные кривые зависимости полного импеданса Z, тока в катушке I и напряжения U от частоты показаны на рисунке 8, из которого видно, что наибольшая выходная мощность усилителя, обеспечивающая требуемые вибрационные параметры, находится на частоте f_2 перехода от постоянной скорости к постоянному ускорению.



X — частота, Гц; *Y* — импеданс (кривая *1*), ток (кривая *2*) или напряжение (кривая *3*) в условных единицах; *a* — область постоянного перемещения; *b* — область постоянной скорости; *c* — область постоянного ускорения

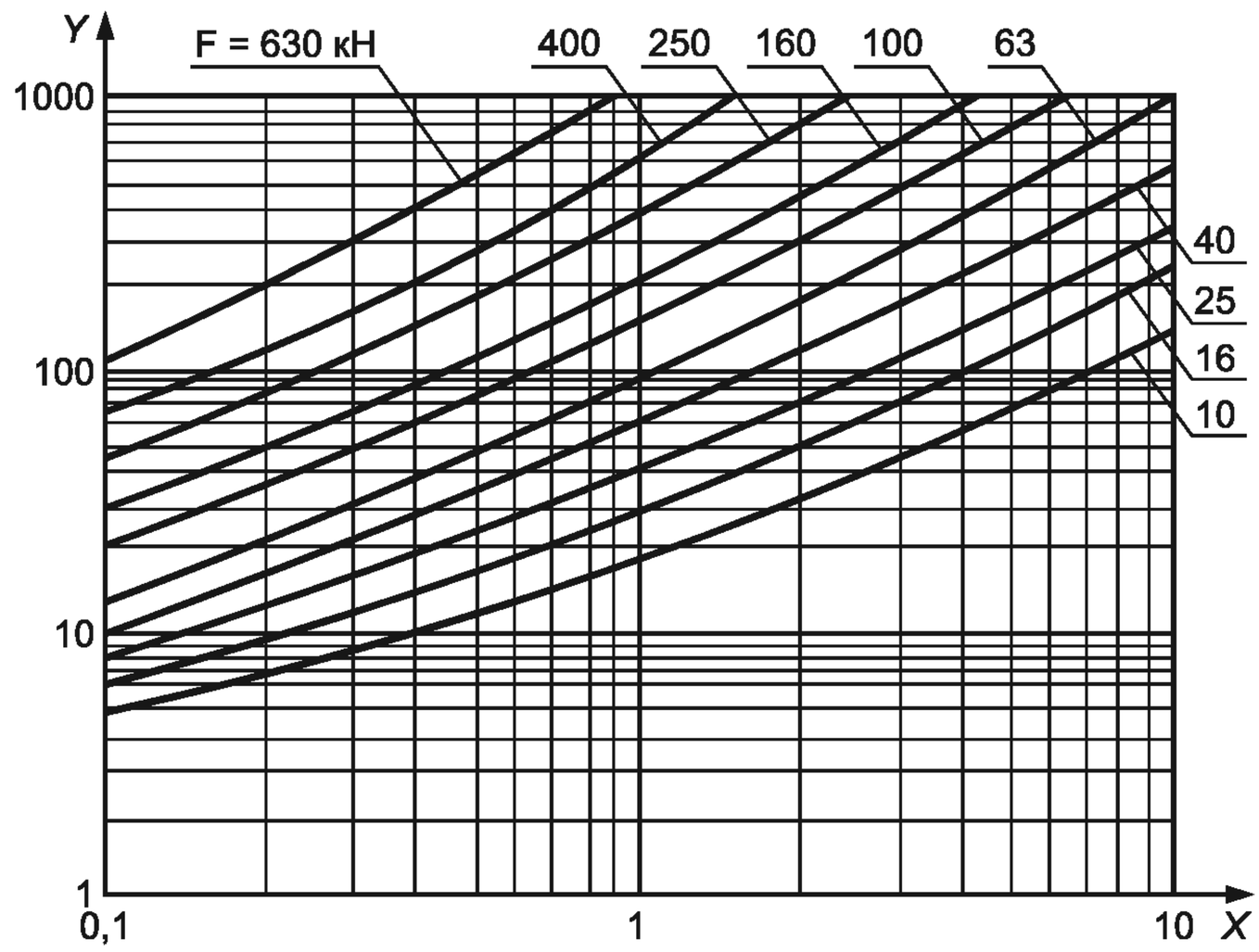
Рисунок 8 — Типичные зависимости импеданса, тока и напряжения от частоты

Для эффективного использования усилителя мощности его выходные параметры должны быть согласованы с импедансом вибростенда посредством согласующего трансформатора. Для современных транзисторных усилителей, как правило, согласующий трансформатор не требуется. Большинство вибростендов электродинамического типа можно непосредственно подключать к усилителям мощности.

Потребитель имеет возможность выбрать усилитель мощности одного из двух основных типов: линейный или коммутируемый. Последний имеет больший коэффициент полезного действия (от 85 % до 90 % против от 40 % до 55 % для линейного усилителя при той же выходной мощности), что существенно снижает эксплуатационные расходы, особенно для усилителей, мощность которых превышает несколько десятков киловатт.

6.3.3 Выбор гидравлической системы питания

Основным параметром гидравлической системы питания является средний поток масла Q_m, который зависит от максимальной скорости $v_{max,\ L}$ и номинальной силы F при заданном давлении P потока масла в гидравлической системе. Эта зависимость является эмпирической и может незначительно изменяться в зависимости от модели вибрационной установки. Информацию о соотношении между указанными величинами для данной модели (в виде таблиц или графиков) обычно предоставляет изготовитель. Определение Q_m по значениям скорости v и номинальной силы F проиллюстрировано на рисунке 9. Номограммы подобного вида позволяют определить требуемое значение среднего потока масла Q_m.



X – v_{peak}, м/с; Y – Q_m, л/мин

Рисунок 9 — Пример номограммы для оценки среднего потока масла Q_m (P = 28 МПа)

Приближенный расчет Q_m может быть выполнен следующим образом. Обычно часть развиваемой силы (а, следовательно, и давления) расходуется на противодействие силе тяжести. Таким образом, максимальную силу F и давление P можно разделить на динамические (F_{peak}, P_{peak}) и статические (F_{st}, P_{st}) составляющие, связанные между собой соотношениями:

$$F_{peak} = a_{max} m_z = S_p P_{peak}; \tag{18}$$

$$F_{st} = g m_z = S_p P_{st}, \tag{19}$$

где S_p — площадь рабочей поверхности поршня исполнительного устройства;
g — ускорение свободного падения.

Предполагая потери давления в системе питания незначительными, оценку среднего потока масла Q_m можно получить по формуле

$$Q_m = \frac{2}{\pi} v_{peak} S_p. \quad (20)$$

Совместное использование формул (18)—(20) приводит к формуле

$$Q_m = \frac{2}{\pi} \frac{(a_{max} + g) v_{peak} F_{peak}}{a_{max} P}. \quad (21)$$

Если модель имеет устройство компенсации силы тяжести, то формула (21) преобразуется к виду

$$Q_m = \frac{2}{\pi} \frac{v_{peak} F_{peak}}{P}. \quad (22)$$

Чтобы учесть потери в системе питания, результат, полученный по формуле (21) или (22), умножают на коэффициент, значения которого находятся в интервале от 1,1 до 1,2.

Приложение А
(справочное)

Примеры

А.1 Общие положения

Следует иметь в виду, что формализация процедуры определения требований к характеристикам вибрационной установки неизбежно связана с некоторыми упрощениями. В то время как для правильного выбора вибростенда необходим учет всех особенностей, связанных с конкретным объектом испытаний, что требует соответствующего опыта и знаний.

В приведенных в настоящем приложении примерах предполагается, что испытуемые объекты представляют собой массы простой симметричной формы, что редко встречается на практике. В этих примерах рассматриваются только основные характеристики вибрационной установки. В них не учитываются, например, такие факторы, как предельно допустимая нагрузка опоры, поперечная жесткость или резонансы системы виброизоляции, поскольку это привело бы к значительному усложнению примеров.

А.2 Выбор электродинамического вибростенда

А.2.1 Условия испытаний

Вибростенд должен удовлетворить следующим условиям испытаний: m_s = 80 кг; a_{max} = 40 м/с^2; d_{max} = = 12,5 мм; f_L = 20 Гц; f_H = 2000 Гц; $\Phi_a(f)$ = 0,5 (м/с^2)^2/Гц.

А.2.2 Определение требований к вибрационной установке

Характеристики вибрационной установки рассчитывают в соответствии с 6.2 и 6.3:

- масса подвижной системы (по таблице 1): m_e = 4 кг;
- общая масса: $m_z = m_e + m_s$ = 84 кг;
- вынуждающая сила (гармоническое возбуждение): $F_s = m_z a_{max}$ = 3,36 кН;
- вынуждающая сила (случайное возбуждение): $a_r = \sqrt{\Phi_a(f)(f_H - f_L)}$ = 31,5 м/с^2; $F_r = m_z a_r$ = 2,65 кН;
- ход подвижной системы (в предположении f_e = 20 Гц): мм (при наличии устройства компенсации силы тяжести);

$S_L = d_{max} + \dfrac{(1 + m_s / m_e)}{4\pi^2 f_e^2} g$ = 25,5 мм (при наличии устройства компенсации силы тяжести $S_L = d_{max}$);

- максимальная скорость (в предположении f_t = 25 Гц): $v_{max} = 2\pi f_t d_{max}$ = 2,0 м/с (см. 6.2.7);
- выходная мощность усилителя мощности: $P \approx 0{,}5 F_s v_{max}$ = 3360 ВА;
- ток в подвижной катушке (в предположении U = 50 В): $I = P/U$ = 67,2 А;
- нагрузка усилителя мощности: $Z = U/I$ = 0,74 Ом (в окрестности f_t имеет активный характер).

А.3 Проверка возможностей электродинамического вибростенда

А.3.1 Условия испытаний

Проверяемый вибростенд должен удовлетворять следующим условиям испытаний на гармоническую вибрацию: m_s = 35 кг (включая 25 кг устройства крепления); f_L = 5 Гц; f_H = 500 Гц; d_{max} = 10,0 мм в диапазоне частот от 5 до 19,49 Гц; a_{max} = 40 м/с^2 в диапазоне частот от 19,49 до 500 Гц.

А.3.2 Проверяемый вибростенд

Вибростенд, предлагаемый для проведения испытаний по А.2.1, обладает следующими характеристиками:

- масса подвижной системы: m_e = 12 кг;
- номинальная вынуждающая сила (в режиме гармонического возбуждения): F_s = 10 кН;
- номинальный ход подвижной системы: S_L = 25,4 мм;
- номинальная скорость: $v_{max,\ s}$ = 2,0 м/с;
- максимально допустимое ускорение: $a_{max,\ s}$ = 750 м/с^2.

А.3.3 Определение требований к вибрационной установке

Характеристики вибростенда рассчитывают в соответствии с 6.2 и 6.3:

- общая масса: $m_z = m_e + m_s$ = 47 кг;
- вынуждающая сила: $F_s = m_z a_{max}$ = 7,05 кН;
- максимальная скорость: $v_{max} = 2\pi f_t d_{max}$ = 1,225 м/с (или $v_{max} = \sqrt{a_{max} d_{max}}$ = 1,225 м/с);
- ход подвижной системы (в предположении f_e = 15 Гц):

$S_L = d_{max} + \dfrac{(1 + m_s / m_e)}{4\pi^2 f_e^2} g$ = 14,3 мм (при наличии устройства компенсации силы тяжести $S_L = d_{max}$ = 10 мм).

А.3.4 Заключение

Характеристики проверяемого вибростенда по развиваемой силе, ускорению, скорости и ходу подвижной системы существенно превосходят требования испытаний. Это позволит испытывать объекты не только типа простой массы, но и с более сложным динамическим поведением и, кроме того, позволит удлинить период между операциями по техническому обслуживанию вибростенда.

А.4 Выбор гидравлического вибростенда

А.4.1 Условия испытаний

Вибростенд должен удовлетворить следующим условиям испытаний: m_z = 1000 кг; a = 40 м/с^2; f_L = 6 Гц; f_H = 60 Гц.

А.4.2 Определение требований к вибрационной установке

Характеристики вибрационной установки должны удовлетворять следующим требованиям:

- вынуждающая сила (в режиме гармонического возбуждения): $F = m_z a$ = 40 кН;
- максимальное перемещение: $d_{max} = a/(4\pi^2 f_L^2) = 28$ мм;
- ход подвижной системы: $S_L = 2d_{max} = 56$ мм;
- максимальная скорость: $v_{max\,L} = a/(2\pi f_L) = 1{,}06$ м/с; $v_{max\,H} = a/(2\pi f_H) = 0{,}106$ м/с;
- средний поток масла (в предположении, что для данной модели используется номограмма, изображенная на рисунке 9): Q_m = 60 л/мин.

Приложение В
(справочное)

Условия вибрационных испытаний в международных стандартах МЭК

В.1 Общие положения

Степень жесткости испытаний на вибропрочность и виброустойчивость обычно устанавливают как совокупность диапазона частот испытаний, продолжительности испытаний и энергетических характеристик вибрации.

Для испытаний всех видов, стандартизованных МЭК, справедливы следующие общие требования:

- коэффициент гармонических искажений: менее 32 %;
- поперечная вибрация: менее 25 % — в диапазоне до 500 Гц и менее 50 % — в диапазоне выше 500 Гц;
- неравномерность распределения вибрации по столу в точках крепления испытуемого объекта: менее 25 % — в диапазоне до 500 Гц и менее 50 % в диапазоне выше 500 Гц.

В.2 Гармоническая вибрация (по [1])

Условия испытаний включают в себя:

- диапазон частот испытаний, Гц: от 1 до 5000 (выбирают из следующего ряда: от 1 до 35, от 1 до 100, от 10 до 55, от 10 до 150, от 10 до 500, от 10 до 2000, от 10 до 5000, от 55 до 500, от 55 до 2000, от 55 до 5000, от 100 до 2000);
- амплитуда перемещения, мм: от 0,035 до 100 (значения от 35 мм и выше применяют только для возбуждения в диапазоне частот от 1 до 10 Гц);
- амплитуда ускорения, $м/с^2$: от 1 до 500;
- продолжительность испытаний по каждому направлению возбуждения, выражаемую через число циклов качания частоты, выбирают из ряда: 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100;
- допустимые отклонения амплитуды вибрации от номинального значения, %: $\pm$ 15.

В.3 Случайная вибрация (по [4])

Условия испытаний включают в себя:

- диапазон частот испытаний, Гц: от 1 до 5000 (выбирают из следующего ряда: от 1 до 100, от 5 до 500, от 20 до 2000, от 50 до 5000);
- спектральная плотность мощности ускорения $\Phi_a(f)$, $(м/с^2)^2/Гц$: от 0,05 до 100;
- среднеквадратичное значение ускорения a, $м/с^2$: рассчитывают по спектральной плотности мощности $\Phi_a(f)$ по формуле

$$a = \left[\int_F \Phi_a(f)df\right]^{1/2} \approx [\Phi_a \Delta f]^{1/2},$$

где F — диапазон частот испытаний;
f — ширина F, Гц;

- допустимое отклонение от заданной формы спектральной плотности мощности ускорения, дБ: $\pm$ 3;
- допустимые отклонения среднеквадратичного значения ускорения от номинального значения, %: $\pm$ 10.

В.4 Воспроизведение акселерограммы процесса (по [2])

Условия испытаний включают в себя:

- диапазон частот испытаний, Гц: от 0,1 до 2000 (выбирают из следующего ряда: от 0,1 до 10, от 1 до 35, от 1 до 100, от 5 до 35, от 10 до 100, от 10 до 150, от 10 до 500, от 10 до 2000, от 55 до 2000);
- спектр отклика:
  - ускорение нулевого периода (максимальное ускорение на столе вибростенда), $м/с^2$: обычно выбирают из ряда 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200…;
  - максимальное ускорение отклика, $м/с^2$: превышает ускорение нулевого периода в 2,24—6,5 раз в зависимости от выбранного коэффициента демпфирования и назначения испытаний;
- число и длительность реализаций акселерограммы:
  - число реализаций: выбирают из ряда 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50…;
  - длительность реализации, с: выбирают из ряда 1, 2, 5, 10, 20, 50…;
  - длительность значимой части акселерограммы, процент общей длительности реализации: 25, 50, 75;
  - число больших пиков отклика (на уровне 70 %): от 3 до 20.

В.5 Воспроизведение последовательности синусоидальных импульсов с заполнением (по [3])

Условия испытаний включают в себя:

- диапазон частот испытаний, Гц: от 0,1 до 100 (выбирают из следующего ряда: от 0,1 до 10, от 1 до 35, от 1 до 100, от 5 до 35, от 10 до 100);
- максимальные значения перемещения *s* и ускорения *a*: выбирают в зависимости от значения частоты перехода в соответствии с таблицей В.1;

Таблица В.1

Параметр	Частота перехода, Гц																	
	0,8				1,6						8,0							
s, мм	40	80	120	200	10	20	30	50	100	200	0,4	0,8	1,2	2	4	8	12	20
a, м/с^2	1	2	3	5	1	2	3	5	10	20	1	2	3	5	10	20	30	50

- число циклов заполнения в импульсе: выбирают из ряда 3, 5, 10, 20;
- число импульсов в последовательности: выбирают из ряда 1, 2, 5, 10, 20, 50…

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации и действующим в этом качестве межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
ИСО 2041	—	*
ИСО 5344	—	*
ИСО 8626	—	*
ИСО 15261	—	*

* Соответствующий национальный стандарт отсутствует. До его утверждения рекомендуется использовать перевод на русский язык данного международного стандарта. Перевод данного международного стандарта находится в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

Библиография

[1] МЭК 60068-2-6:1995 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание Fc. Вибрация (гармоническая)

[2] МЭК 60068-2-57:1999 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание Ff. Вибрация. Метод воспроизведения акселерограммы процесса

[3] МЭК 60068-2-59:1990 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2. Испытания. Испытание Fe. Вибрация. Метод воспроизведения синусоидальных импульсов с заполнением

[4] МЭК 60068-2-64:1993 Испытания на воздействие внешних факторов. Часть 2. Методы испытаний. Испытание Fh. Широкополосная случайная вибрация (с цифровым управлением) и руководство по проведению испытаний

УДК 534.322.3.08:006.354 ОКС 17.160 Т34

Ключевые слова: вибрационные испытания, вибрационная установка, вибростенд, выбор, тип, модель, характеристики

Редактор *Б.Н. Колесов*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *Л.Я. Митрофанова*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 09.07.2012. Подписано в печать 05.09.2012. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,80. Тираж 121 экз. Зак. 755.

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru
Набрано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» на ПЭВМ.
Отпечатано в филиале ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» — тип. «Московский печатник», 105062 Москва, Лялин пер., 6.