

УДК 004.67

Практическое применение предварительных виброиспытаний

Иванцов Тимофей Сергеевич^()*

TimofeyIvantsov@yandex.ru

Морозов Дмитрий Васильевич

dmitriymorozov@visom.ru

Приборостроительное предприятие АО «Висом», Смоленск, Россия

Аннотация. Рассмотрена практическая применимость предварительных вибрационных испытаний. Произведен анализ рисков, возникающих при переходе от сигнала малого уровня к рабочей нагрузке. Приведены преимущества предварительных испытаний.

Ключевые слова: предварительные виброиспытания, амплитудно-частотная характеристика, сигнал, система управления виброиспытаниями, риски

Practical application of pre-test vibration runs

Ivantsov Timofey Sergeevich^()*

TimofeyIvantsov@yandex.ru

Morozov Dmitriy Vasilievich

dmitriymorozov@visom.ru

Instrumentation Company JSC “Visom”, Smolensk, Russia

Abstract. The practical applicability of preliminary vibration testing is considered. An analysis of risks arising during the transition from a low-level signal to the operating load is performed. The advantages of preliminary testing are presented.

Keywords: pre-test runs, frequency response, signal, vibration control system, risks

Введение. Этап перехода от слабого сигнала к номинальному уровню, установленному программой испытаний, принято называть разгоном или выходом на рабочий режим. Зачастую процесс выхода на требуемый режим является наиболее критичной частью испытания ввиду следующих причин:

при выходе на режим определяются АЧХ и ФЧХ системы «стенд–оснастка–изделие». Если при определении характеристик системы произойдет ошибка, то возникает вероятность превышения уровня вибрационного воздействия над заданным и разрушение объекта испытаний.

АЧХ и ФЧХ могут меняться по мере роста нагрузки. В худшем сценарии такие изменения приводят к резонансным скачкам, способным вывести из строя не только объект, но и дорогостоящий вибростенд [1].

Исторически процесс разгона и вывода вибростенда на заданный режим осуществлялся оператором вручную. Контроль амплитуды проводился визуально с использованием осциллографа, а управление мощностью — путем ступенчатого изменения напряжения на входе усилителя и подстройки спектра сигнала при помощи набора фильтров. Такой подход обладает критиче-

скими недостатками: высокой инерционностью управления и субъективностью оценки, что часто приводило к неконтролируемым резонансам и повреждению объектов испытаний [2].

Таким образом, отсутствие информации о частотных характеристиках системы, полученной в ходе предварительных испытаний, может привести к крайне негативным последствиям. Например, возникает высокая вероятность повреждения объекта испытаний или выхода из строя вибростенда.

Материалы и методы. Внедрение методики предварительных испытаний в практику виброиспытаний позволяет решить множество важных задач, которые напрямую влияют на эффективность и стоимость процесса испытания.

1. Оптимизация времени выхода на рабочий режим

Автоматизированный расчет АЧХ на малых уровнях возбуждения позволяет сформировать точную характеристику управляющего сигнала. В отличие от метода постепенного подбора уровня сигнала, использование данных предварительного виброиспытания позволяет сократить этап разгона с выходом на номинальный уровень в 2–3 раза.

2. Безопасность и сохранность объекта

Предварительный анализ на уровнях 5...10 % от номинала позволяет снизить риски необратимых повреждений объекта испытаний и вибростенда. Практическое применение предварительного виброиспытания позволяет выявить критические резонансы и нелинейности в поведении системы «стенд–оснастка — изделие» раньше, чем амплитуда колебаний достигнет критических значений.

3. Предварительная идентификация характеристик системы

Предварительные виброиспытания выступают в качестве эффективного инструмента самодиагностики всей измерительной цепи, обеспечивая достоверность и безопасность последующих измерений.

Упомянутые выше методы были реализованы в программном обеспечении VisProbe SL. При этом для вычисления АЧХ используются статистические оценки, базирующиеся на быстром преобразовании Фурье (БПФ). Выбор конкретного алгоритма зависит от распределения шумов в измерительных каналах. Используются следующие алгоритмы.

Алгоритм H_1 . Используется, когда уровень шумов у выходного сигнала $y(t)$ выше, чем у входного. Расчет ведется через отношение взаимного спектра между входным и выходным сигналами $G_{xy}(f)$ к автоспектру входного сигнала $G_{xx}(f)$:

$$H_1(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)}. \quad (1)$$

Оценка H_1 строится на предположении, что входной сигнал не зашумлен, а весь шум сосредоточен на выходе; $G_{xy}(f)$ — показывает корреляцию между входом и выходом. Шум на выходе, не скоррелированный со входом, при усреднении в этой функции стремится к нулю.

Алгоритм H_2 : применяется, если входной сигнал более зашумлен, чем выходной. Определяется через отношение автоспектра выходного сигнала $G_{yy}(f)$ к взаимному спектру между выходным и входным сигналами $G_{yx}(f)$:

$$H_2(f) = \frac{G_{yy}(f)}{G_{yx}(f)}. \quad (2)$$

Оценка H_2 предполагает обратную ситуацию: выходной сигнал не содержит шума, а шум присутствует на входе (например, помехи в системе возбуждения вибростенда).

Связь между этими двумя оценками выражается через функцию когерентности:

$$\gamma^2(f) = \frac{H_1(f)}{H_2(f)} = \frac{[G_{xy}(f)]^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}. \quad (3)$$

При этом, если $\gamma^2 = 1$, то $H_1 = H_2$, и система идеально линейна и без шумов. Если же $\gamma^2 < 1$, то в система есть шум, нелинейности или задержки.

Алгоритм H_v применяется при наличии шумов в обоих каналах, представляя собой геометрическое среднее между H_1 и H_2 .

В качестве примера расчета значений управляющего сигнала рассмотрим синус. При этом мы не учитываем фазу, а управляем только по амплитуде. Поэтому комплексные числа берутся по модулю и становятся обычными действительными числами.

Пусть мы имеем задание испытания T , выходной сигнал системы управления D , частотные характеристики систем выход контроллера — усилитель — вибростенд — конкретный датчик H_c , где c — индекс канала.

Далее все вычисления идут в системных единицах: T имеет размерность системной единицы, соответствующей тому, что выбрана на вкладке профиля; H_c вычисляется в (системная единица)/В, например (м/с²)/В; D имеет размерность Вольт, В [3, 4]. При этом решение будет зависеть от алгоритма управления.

Нам нужно найти:

- значения A_c , которые будут на каналах при уровне задания T ;
- значение выходного напряжения D , которое будет при отработке заданной команды.

В общем случае T, D — комплексные числа. A_c может быть не только ускорением, но в общем случае любой величиной.

При управлении по среднему нужно решить уравнение:

$$T = D \cdot \sum_{c=1}^N w_c \cdot |H_c|, \quad (4)$$

где N — количество управляющих каналов, w_c — весовой коэффициент канала, приведенный к общему весу, т. е.:

$$w_c = \frac{P_c}{\sum_{i=1}^N P_i}, \quad (5)$$

где P_i — весовой коэффициент канала из окна настроек испытания;
 P_c — весовой коэффициент конкретного канала;
 w_c — весовой коэффициент канала при формировании общего отклика.
 Соответственно из уравнения получается:

$$D = T / (\sum_{c=1}^N w_c \cdot |H_c|). \quad (6)$$

При этом A_c получается в системных единицах, соответствующих размерности канала.

В случае управления по максимуму, напряжение D вычисляется по формуле

$$D = T / (\max_{c=1}^N (w_c \cdot |H_c|)). \quad (7)$$

Необходимо отметить, что вычисления по формулам выше происходят для каждой частоты из диапазона профиля [5]. Для каналов, к которым подключены акселерометры, мы можем получить все три величины (ускорение, скорость, перемещение).

Была проведена апробация описанных выше методов. В качестве объекта испытаний была выбрана длинная текстолитовая пластина, имеющая ярко выраженные резонансы на обоих концах. Данный объект обладает такими же механическими свойствами, как, например, развернутые солнечные батареи.

Далее были выполнены следующие операции для проведения эксперимента.

1. Установка объекта испытания на вибростенд и подключением к СУВ (рис. 1).

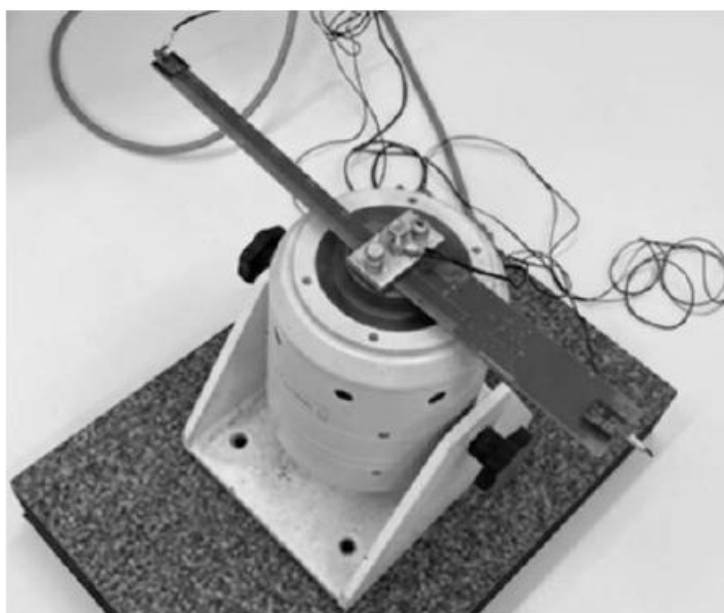


Рис. 1. Установленный объект испытаний на вибростенд

2. Задание профиля испытания (рис. 2).

Профиль	Расписание	Предтест	Управление	Ограничения	Каналы	Анализ				
№	Нач. частота, Гц	Нач. ампл., $g^2/Гц$	Кон. частота, Гц	Кон. ампл., $g^2/Гц$	Наклон, дБ/окт	Откл.(-) дБ	Пред.(-) дБ	Пред.(+) дБ	Откл.(+) дБ	Δ
1	5,00	0,0006480025	30,00	0,02304381	6,0000	6,00	3,00	3,00	6,00	
2	30,00	0,02304381	200,00	0,02304381	0,0000	6,00	3,00	3,00	6,00	

Рис. 2. Задание профиля испытания в ПО VisProbe SL

График профиля испытания с ограничениями показан на рис. 3.

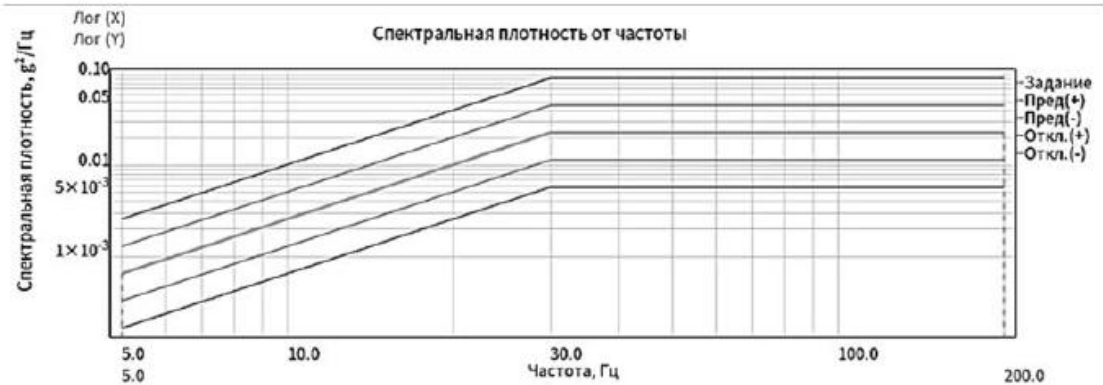


Рис.3. График профиля испытания

3. Выполнение процедуры предварительного виброиспытания (рис. 4).

Текущие значения					Расчётные значения				
Команда					Выполнять 00:01:00 чч:мм:сс 100%				
Выход					Напряжение				
Выход 1					0,47 В СКЗ				
Канал	Тип	Значение	Скорость	Перемещение					
Отклик	--	20,00 m/s^2 СКЗ	0,28 м/с пик	2,82 мм пик					
D1_ось_x	Измерительный	5,11 m/s^2 СКЗ	0,05 м/с пик	0,27 мм пик					
D1_ось_y	Измерительный	8,47 m/s^2 СКЗ	0,04 м/с пик	0,14 мм пик					
D1_ось_z	Измерительный	36,76 m/s^2 СКЗ	0,88 м/с пик	5,63 мм пик					
D2_ось_x	Измерительный	17,68 m/s^2 СКЗ	0,11 м/с пик	0,82 мм пик					
D2_ось_y	Измерительный	4,87 m/s^2 СКЗ	0,04 м/с пик	0,29 мм пик					
D2_ось_z	Измерительный	26,16 m/s^2 СКЗ	0,54 м/с пик	4,79 мм пик					
Управляющий	Управляющий	20,00 m/s^2 СКЗ	0,28 м/с пик	2,82 мм пик					

Рис.4. Результаты выполнения предварительного испытания

Для анализа полученного результата было выполнено предварительное испытание и на его основе рассчитан теоретический отклик системы на управляющее воздействие (пунктирная линия) и снят реальный отклик с датчиков (сплошная линия) (рис. 5).

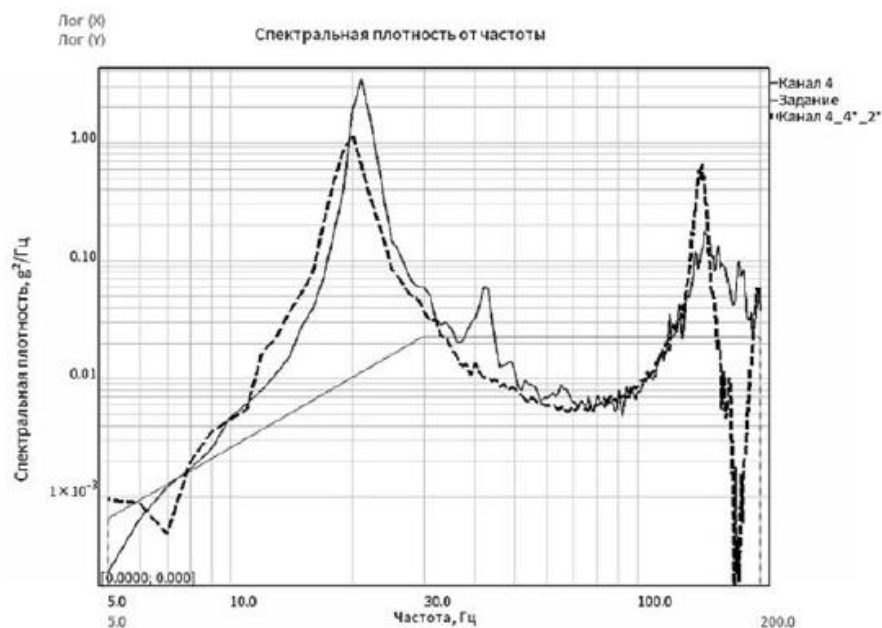


Рис. 5. Графики спектральной плотности от частоты теоритического и реального испытаний

Результаты. В результате выполнения испытания с предварительным виброиспытанием и без такового было получено 2 графика ускорения от времени соответственно (рис. 6, 7), на которых можно увидеть, как происходил выход на требуемый режим работы.

Сравнивая полученные графики, можно заметить, что с предварительным испытанием система достигает требуемый уровень нагружения примерно за 10...11 с. Подъем происходит плавно без резких скачков. Во втором испытании выход на требуемый режим имеет ступенчатый вид, а выход на требуемый режим происходит примерно через 40 с.

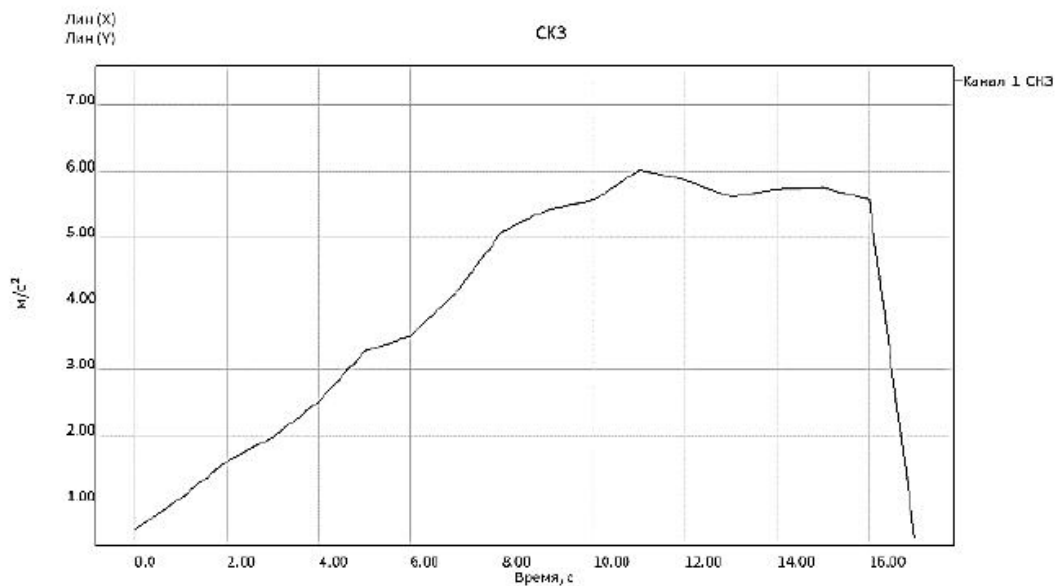


Рис. 6. График ускорения от времени выхода на требуемый режим работы с предварительным виброиспытанием с канала 1

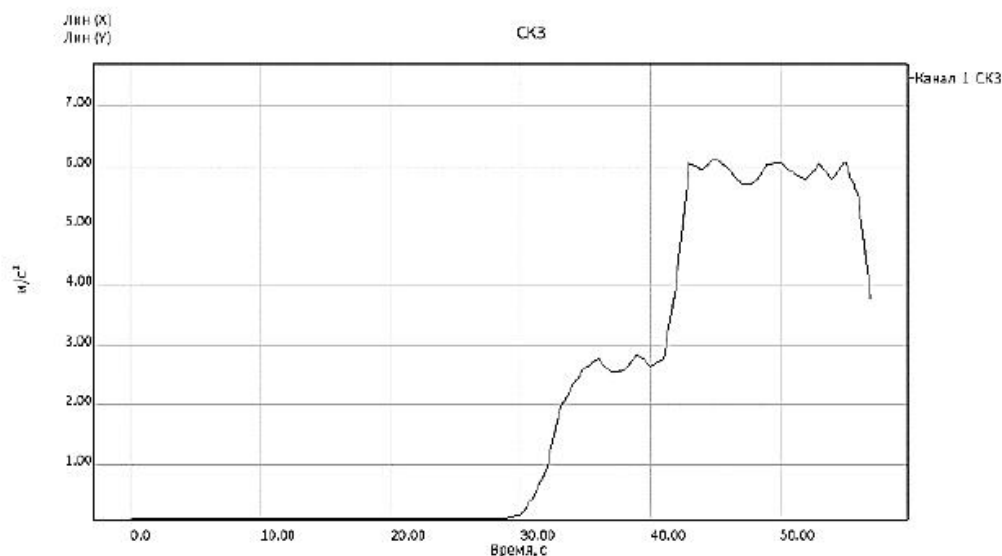


Рис. 7. График ускорения от времени выхода на требуемый режим работы без предварительного испытания с канала 1

Заключение. Таким образом, внедрение предварительных вибрационных испытаний позволяет заранее получить АЧХ системы, на основе которой обеспечивается более плавный разгон. Благодаря этому достигается минимизация ударов на объект испытаний, способных привести к его повреждению или разрушению. Дополнительно было установлено, что обеспечивается более быстрый выход на рабочую нагрузку.

Кроме того, предварительное тестирование позволяет на раннем этапе выявить дефекты фиксации датчиков, оценить уровень фоновых помех и верифицировать динамическую жесткость всей системы «стенд — оснастка — объект». Возможность оперативной корректировки программы испытаний и расположения контрольных точек без прерывания штатного цикла превращает предварительное испытание в полноценный диагностический инструмент инженерного анализа.

Список источников

- [1] Harris C.M., Peedles R.D. Harris' Shock and Vibration Handbook. McGraw-Hill Education, 2020, 1200 p.
- [2] Кузнецов А.А. Вибрационные испытания элементов и устройств автоматики. Москва, Энергия, 1976, 119 с.
- [3] Bendat J.S., Piersol A.G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley, 2010. 640 p.
- [4] Луценко Г.М. Статистическое исследование систем автоматического управления вибрационными испытаниями. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1989, 16 с.
- [5] Петрухин В.В., Петрухин С.В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. Москва, Инфра-Инженерия, 2010, 168 с.