

УДК 621. 62-2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИИ МИКРОКРИОГЕННЫХ МАШИН РОТОРНОГО ТИПА

© П. П. Добровольский, И. И. Кремис, В. Н. Федоринин,
В. И. Сидоров

*Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8
E-mail: fedorinin55@mail.ru*

Виброактивность микрокриогенных машин является важным фактором, определяющим ресурсные характеристики матричных фотоприёмных устройств (ФПУ), работающих в ИК-диапазоне спектра. Приводятся амплитудно-частотные характеристики виброактивности ФПУ разных производителей с различными сроками службы. Осуществляются измерения виброактивности с помощью датчика деформации, жёстко связанного с основанием ФПУ. Анализируются влияние центробежных и компрессионных сил на виброактивность ФПУ и возможность их взаимной компенсации.

Ключевые слова: микрокриогенная машина, матричное фотоприёмное устройство.

DOI: 10.15372/AUT20210211

Введение. Современное фотоприёмное устройство (ФПУ) — это высокотехнологичное изделие, в состав которого входит вакуумный криостат, где располагаются матрица фотоприёмных элементов, холодная диафрагма и микрокриогенная машина, обеспечивающая охлаждение матрицы и диафрагмы до температур 80–75 К и стабилизацию температуры в процессе работы [1].

К числу основных показателей, которые декларируются и гарантируются производителями ФПУ, относятся: потребляемая мощность ФПУ, время выхода на режим, количество циклов включения, массогабаритные характеристики. Данные показатели находятся в определённой взаимосвязи и во многом зависят от конструктивных и технологических решений, заложенных при проектировании ФПУ и реализованных в процессе изготовления. Например, потребляемая мощность ФПУ и время выхода на режим зависят от холодопроизводительности микрокриогенной машины, теплоёмкости охлаждаемой массы и величины теплопритоков в вакуумном криостате.

Миниатюризация микрокриогенной машины позволяет снизить массогабаритные характеристики ФПУ, но это приводит к снижению её КПД. Повышение холодопроизводительности при уменьшении массогабаритных характеристик осуществляется за счёт увеличения количества термодинамических циклов за единицу времени. Увеличение частоты термодинамических циклов, как правило, приводит к повышению тепловыделения и к снижению ресурсных показателей ФПУ (таких как время работы на отказ).

Предъявление жёстких требований к вибрационным характеристикам ФПУ определяется условиями эксплуатации. Например, в переносных тепловизионных приборах вибрация ФПУ может сказаться на их пространственном разрешении.

Основные причины повышения виброактивности могут быть связаны с неуравновешенностью сил инерции и моментов вращающихся масс кинематической схемы компрессора, электромагнитными дефектами и дефектами в опорных подшипниках.

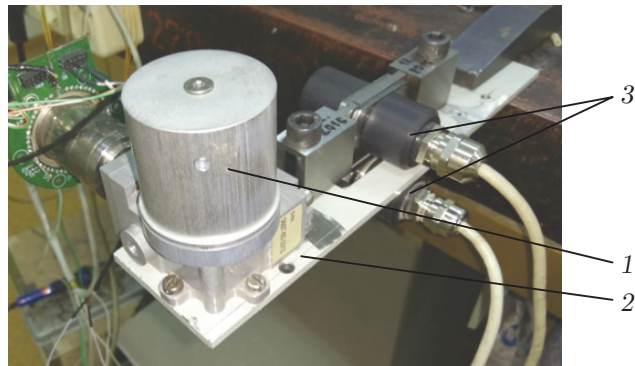


Рис. 1. ФПУ во время испытаний на виброактивность: 1 — ФПУ; 2 — металлическая пластина; 3 — датчики деформации



Рис. 2. ФПУ PLUTON LW с микрокриогенной машиной К 508

Целью проведения анализа амплитудно-частотных характеристик вибрации микрокриогенных машин является определение факторов, влияющих на виброактивность ФПУ, и их изменение в процессе эксплуатации, а также демонстрация метода измерения вибраций с использованием датчика деформации [2, 3] в системе контроля на различных технологических этапах создания микрокриогенных машин.

Схема измерительного стенда. На рис. 1 приведён общий вид ФПУ во время испытаний на виброактивность.

Измерение амплитудно-частотных характеристик вибраций, возникающих в действующих ФПУ, осуществлялось путём регистрации изменения деформации металлической пластины, на которой крепилось ФПУ. Воздействие переменных механических колебаний, распространяющихся вдоль металлической пластины, регистрировалось оптическим датчиком деформации. Величина измеряемой деформации пропорциональна изменению базы датчика ΔL в результате сжатия (растяжения) несущей металлической пластины: $\Delta L = LF/E$, где L — база датчика, F — силы, действующие на корпус в направлении установки датчика, E — модуль упругости (модуль Юнга).

Источником механических колебаний является возникающее в опорах микрокриогенной машины переменное давление.

Сравнительный анализ виброактивности микрокриогенных машин был выполнен на трёх образцах ФПУ.

Виброактивность ФПУ измерялась для случаев, когда ориентация «охлаждаемого пальца» совпадала с направлением вектора измерения деформации.

На рис. 2 показан общий вид ФПУ PLUTON LW с микрокриогенной машиной К 508 (Франция) [4].

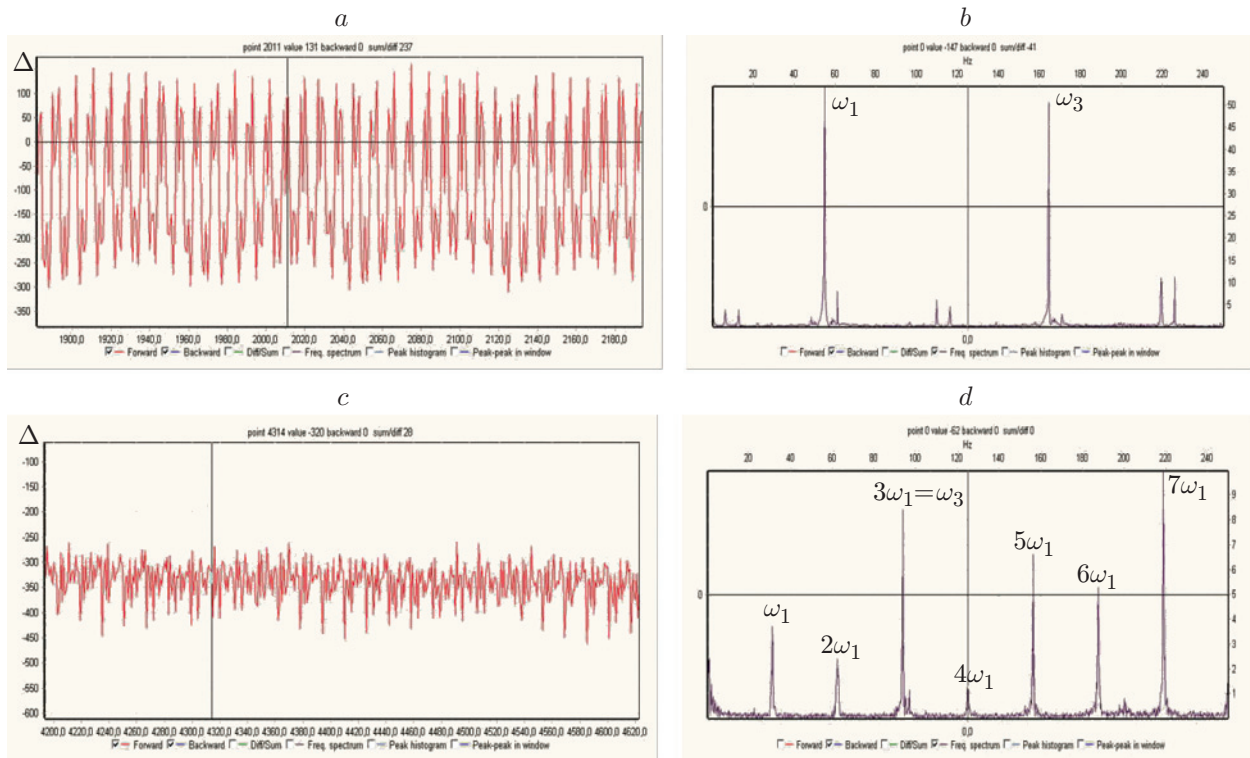


Рис. 3. Результаты измерения виброактивности ФПУ PLUTON LW с микрокриогенной машиной К 508: *a* — фрагмент диаграммы деформации, возбуждаемой ФПУ в металлической пластине на этапе первичного охлаждения; *b* — частотный спектр (*a*) возбуждаемой деформации ($\omega_1 = 54,9$ Гц — частота вращения ротора микрокриогенной машины, $\omega_3 = 164,5$ Гц — частота пульсации электромагнитного поля двигателя, $\omega_3 = 3 \omega_1$); *c* — фрагмент диаграммы деформации, возбуждаемой ФПУ в металлической пластине на этапе стабилизации охлаждения; *d* — частотный спектр (*c*) возбуждаемой деформации ($\omega_1 = 31,2$ Гц — частота вращения ротора микрокриогенной машины, $\omega_3 = 3\omega_1 = 93,61$ Гц — частота пульсации электромагнитного поля двигателя)

На рис. 3 представлены результаты измерения виброактивности ФПУ PLUTON LW. Общий вид ФПУ ФУК-151 с микрокриогенной машиной — аналог К 508 (Россия) — приведён на рис. 4.

На рис. 5 приведены результаты измерения виброактивности ФПУ ФУК-151.

Результаты измерения виброактивности ФПУ ФУК-151 с микрокриогенной машиной К 508 после проведения ресурсных испытаний (Россия) приведены на рис. 6.

На рис. 3, 5, 6 представлены диаграммы изменения деформации в металлической пластине, измеренные на различных этапах цикла работы микрокриогенных машин (начальный этап — первичное охлаждение до выхода на постоянный режим работы, установившийся этап — микрокриогенная машина работает в режиме стабилизации температуры). Ось *X* — время, представленное числом измеренных данных с интервалом считывания 2 мс, ось *Y* — величина деформации в условных единицах Δ .

Коэффициент *k* пересчёта значения деформации металлической пластины, определённой в условиях действия стационарной силы *F*: $k = F/\Delta$. Значение коэффициента $k = 0,37 \cdot 10^{-3}$ кг/у. е.

Случайная составляющая сигнала в измерениях (шум) равна 15 у. е.

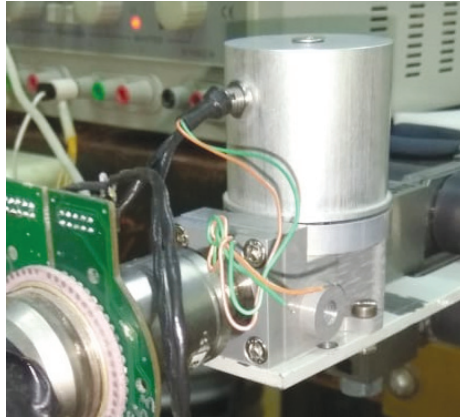


Рис. 4. ФПУ ФУК-151 с микрокриогенной машиной — аналог К 508

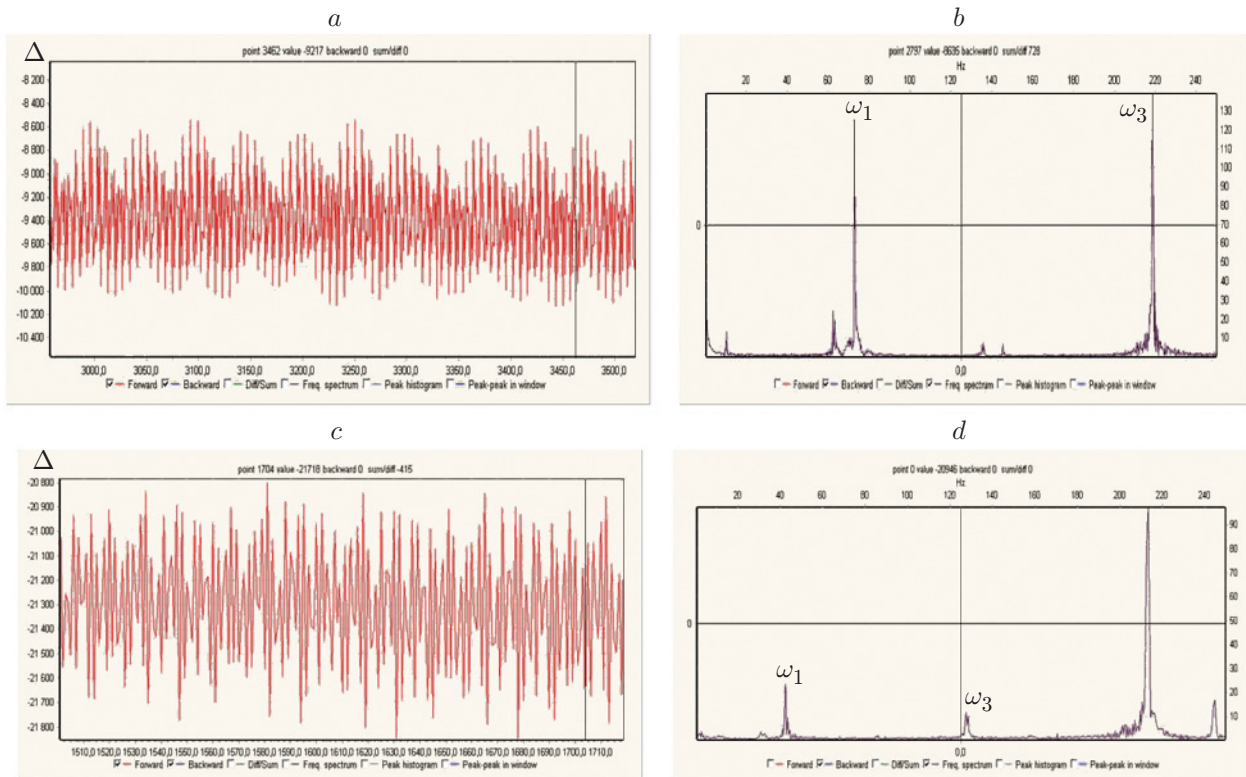


Рис. 5. Результаты измерения виброактивности ФПУ ФУК-151 с микрокриогенной машиной — аналог К 508: *a* — фрагмент диаграммы деформации, возбуждаемой ФПУ в металлической пластине на этапе первичного охлаждения; *b* — частотный спектр (*a*) возбуждаемой деформации ($\omega_1 = 72,5$ Гц — частота вращения ротора микрокриогенной машины, $\omega_3 = 218,0$ Гц — частота пульсации электромагнитного поля двигателя, $\omega_3 = 3\omega_1$); *c* — фрагмент диаграммы деформации, возбуждаемой ФПУ в металлической пластине на этапе стабилизации охлаждения; *d* — частотный спектр (*c*) возбуждаемой деформации ($\omega_1 = 42,0$ Гц — частота вращения ротора микрокриогенной машины, $\omega_3 = 3\omega_1 = 126,0$ Гц — частота пульсации электромагнитного поля двигателя)

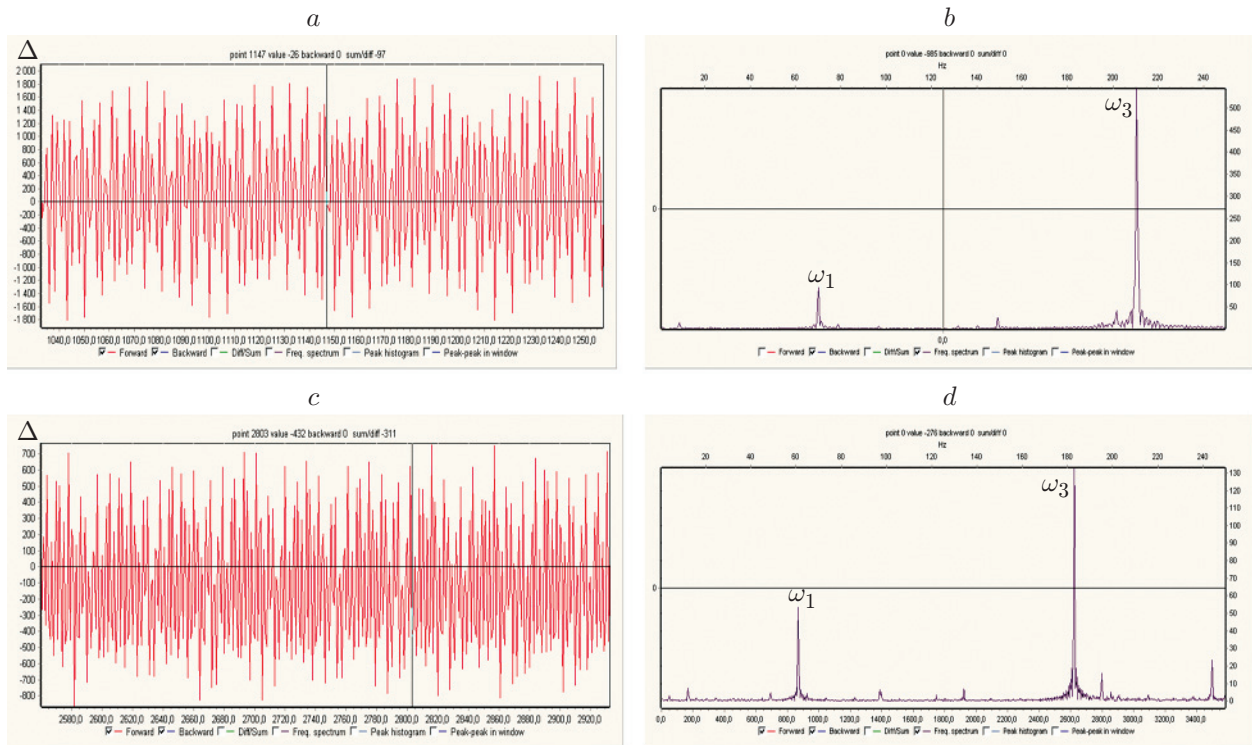


Рис. 6. Результаты измерения виброактивности ФПУ ФУК-151 с микрокриогенной машиной К 508 после проведения ресурсных испытаний: *a* — фрагмент диаграммы деформации, возбуждаемой ФПУ в металлической пластине на этапе первичного охлаждения; *b* — частотный спектр (*a*) возбуждаемой деформации ($\omega_1 = 70,0$ Гц — частота вращения ротора микрокриогенной машины, $\omega_3 = 210,0$ Гц — частота пульсации электромагнитного поля двигателя, $\omega_3 = 3\omega_1$); *c* — фрагмент диаграммы деформации, возбуждаемой ФПУ в металлической пластине на этапе стабилизации охлаждения; *d* — частотный спектр (*c*) возбуждаемой деформации ($\omega_1 = 61,0$ Гц — частота вращения ротора микрокриогенной машины, $\omega_3 = 3\omega_1 = 183,0$ Гц — частота пульсации электромагнитного поля двигателя)

Представленные результаты измерения дают возможность оценить действия центробежных и компрессионных сил на виброактивность ФПУ.

Значения неуравновешенности центробежных сил вращающихся масс и сил давления, развивающихся в компрессоре, определим путём рассмотрения следующей упрощённой модели.

Значение деформации, возбуждаемой на частоте вращения ротора ω , представим как сумму действия двух независимых сил:

$$C e^{-i\omega t} = A e^{-i\omega t} + B e^{-i\omega t + \delta}, \quad (1)$$

где C — амплитуда колебания регистрируемой деформации, A — амплитуда колебаний деформации, возбуждаемая центробежными силами вследствие неуравновешенности масс, B — амплитуда колебания деформации, возбуждаемая действием компрессионных сил, δ — рассогласование фаз между действием вектора компрессионных сил и направлением вектора регистрации (предполагаем несогласованность направлений векторов может принимать значения, близкие к 0 или 180 °). Амплитуды деформации, возбуждаемые центро-

Таблица 1

| Параметры | ФПУ PLUTON LW | ФПУ ФУК-151 | ФПУ ФУК-151 (после ресурсных испытаний) |
|----------------------------|---------------|-------------|--|
| ω_1 , Гц | 54,8 | 72,5 | 70,0 |
| ω_2 , Гц | 31,2 | 42 | 61,0 |
| $C(\omega_1)$ | 55 | 125 | 95 |
| $C(\omega_2)$ | 4 | 28 | 55 |
| $A(\omega_1)$ | 75,5 | 146,0 | 165 |
| $A(\omega_2)$ | 24,5 | 49,0 | 126 |
| $B(\omega_1), B(\omega_2)$ | -20,5 | -21,0 | -70 |

Примечание. Значения амплитуд деформации, возникающих на основной частоте вращения ротора, приведены для сравнения в относительных единицах и не нормировались.

бежными силами, и их изменения связаны с изменением частоты вращения соотношением

$$A(\omega_1)/A(\omega_2) = (\omega_1/\omega_2)^2. \quad (2)$$

Изменения амплитуды деформации, вызванные действиями компрессионных сил, остаются постоянными и не зависят от частоты вращения.

Решение системы уравнения позволяет выделить центробежную и компрессионную составляющие деформации:

$$\begin{aligned} C(\omega_1) &= A(\omega_1) + B(\omega_1); & C(\omega_2) &= A(\omega_2) + B(\omega_2); \\ A(\omega_1)/A(\omega_2) &= (\omega_1/\omega_2)^2; & B(\omega_1) &= B(\omega_2), \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_1 — частота вращения при начальном охлаждении, ω_2 — частота вращения в режиме стабилизации.

В табл. 1 представлены исходные данные и результаты определения величины деформации, вызываемой действиями центробежных и компрессионных сил.

Заключение. По результатам проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

1. Повышенные значения виброактивности приёмника ФУК-151 относительно PLUTON LW на основной частоте связаны лишь с более высокой частотой вращения. Следует предположить, что в данном приёмнике наблюдается более высокий уровень теплопритоков, для чего требуется увеличение производительности микрокриогенной машины.

2. Результаты измерений показывают, что значительный вклад в виброактивность машины наблюдается на частоте $3\omega_1$, совпадающей с частотой модуляции магнитного потока, и имеет электромагнитную природу. Виброактивность на частоте модуляции магнитного потока определяется дефектами сборки электродвигателя и системой управления (причины возникновения электромагнитных дефектов не рассматриваются в данной работе, описание дефектов подробно изложено в материалах по вибродиагностике электродвигателей [5, 6]).

3. Результаты измерений виброактивности ФПУ, прошедшего ресурсные испытания, показывают десятикратное увеличение виброактивности на частоте модуляции магнитного потока, что позволяет говорить о формировании неконтролируемых зазоров в опорах.

Анализ результатов виброактивности ФПУ, прошедшего ресурсные испытания, даёт основание предположить, что увеличение частоты термодинамических циклов в ФПУ в установленном режиме работы обусловлено снижением холодопроизводительности микрокриогенной машины и является следствием увеличения гидросопротивления в сечении регенератора. Увеличение гидросопротивления в сечении регенератора может возникнуть вследствие осаждения в его холодной части продуктов газовой выделености, износа, остатков влаги. Данное заключение косвенно подтверждается значительным ростом компрессионной составляющей силы $B(\omega_1)$, $B(\omega_2)$ вибросигнала, наблюдаемого у ФПУ ФУК-151, прошедшего ресурсные испытания (см. табл. 1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волф У., Цисис Г.** Справочник по инфракрасной технике. Т. 3. М.: Мир, 1999. 472 с.
2. **Пат. 2157513 РФ.** Эллипсометрический датчик /В. Н. Федоринин. Опубликовано: 10.10.2000; Бюл. № 28.
3. **Датчик деформации.** Вибродиагностика. Прибор. 2020. URL: <http://datchikdeform.ru/> (дата обращения: 04.09.2020).
4. **Lynred** by Sofradir & Ulis. 2020. URL: <https://www.lynred.com/> (дата обращения: 04.09.2020).
5. **Гольдин А. С.** Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 2000. 344 с.
6. **Русов В. А.** Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам. Пермь: Изд-во «Вибро-Центр», 2012. 252 с.

Поступила в редакцию 04.09.2020

После доработки 28.01.2021

Принята к публикации 04.02.2021
