

М.В. Антонова, А.В. Корнюхин

**ВИБРОИСПЫТАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО  
ИНЕРЦИАЛЬНОГО БЛОКА НА БАЗЕ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ**

*Рассмотрены вопросы обеспечения виброустойчивости бесплатформенного инерциального блока на базе волоконно-оптических гироскопов. Приведены результаты расчета собственных частот нескольких вариантов конструкции прибора, а также результаты вибрационных испытаний, подтверждающие эффективность выработанных при моделировании конструктивных решений.*

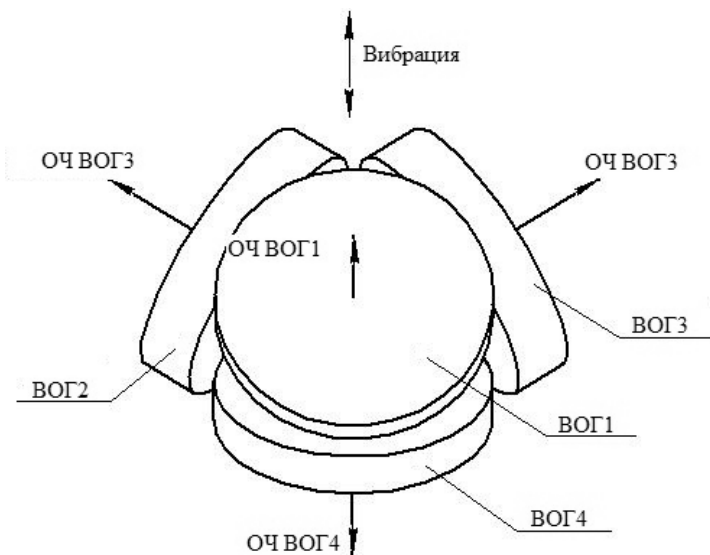
**E-mail: antonova.mariya.v@gmail.com, 03@niipm.ru.**

**Ключевые слова:** бесплатформенный инерциальный блок, волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), вибрационные испытания.

В филиале ФГУП «ЦЭНКИ» НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова разработан бесплатформенный инерциальный блок (далее — прибор) на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и маятниковых кварцевых акселерометров (МА). С помощью такого прибора решаются задачи измерения векторов угловой скорости и кажущегося линейного ускорения объекта, а также вычисления параметров его ориентации и накопленной кажущейся скорости. Прибор состоит из следующих функциональных структур и устройств: восемь измерительных каналов (четыре гироскопических канала и четыре акселерометрических канала); два модуля обмена и управления; четыре опорных генератора; четыре вторичных источника питания. Чувствительные элементы устанавливаются на общем основании и образуют блок чувствительных элементов (БЧЭ). Для снижения вибрационных и ударных нагрузок в прибор включена система виброударной защиты (БЧЭ расположен в корпусе на трех резино-металлических амортизаторах).

Прибор предназначен для использования в системах управления средств выведения и в космических аппаратах. Использование ВОГ для таких систем подразумевает его работу на этапе выведения в условиях значительных возмущений. Целью статьи является экспериментальное исследование влияния вибрационных нагрузок на ВОГ в составе бесплатформенного инерциального блока и поиск мер по снижению этого влияния.

Для достижения поставленных целей были проведены вибрационные испытания прибора при различных вариантах виброн нагружений: широкополосная случайная вибрация (ШСВ) со спектром, близким к спектру, ожидаемому в полете; сканирующая по частоте синусоидальная вибрация постоянной интенсивности. Прибор при испытаниях устанавливали на плиту стенда штатно (на трех опорах) так, чтобы ось чувствительности (ОЧ) ВОГ4 совпадала с линией действия вибрации, а



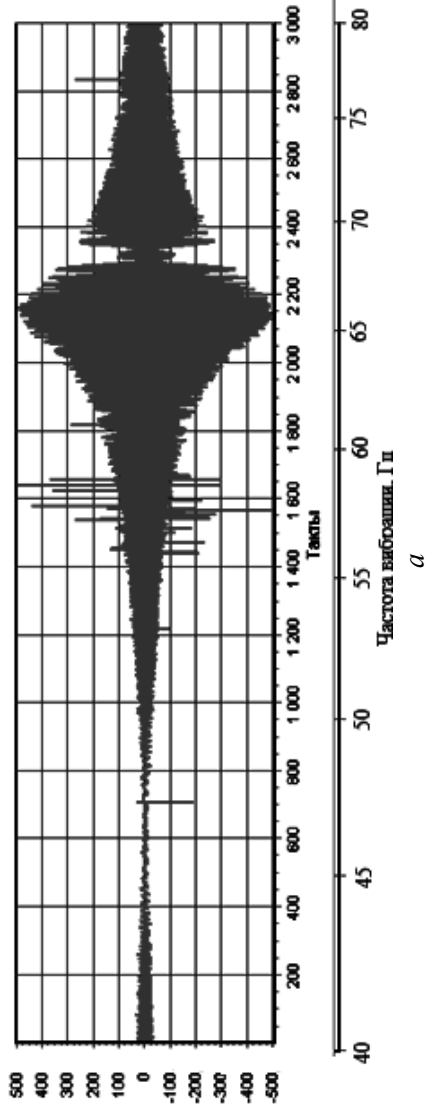
**Рис. 1. Ориентация БЧЭ при испытаниях относительно линии действия вибрации**

оси чувствительности остальных ВОГ были направлены по отношению к ней под углом  $70^\circ$  (рис. 1).

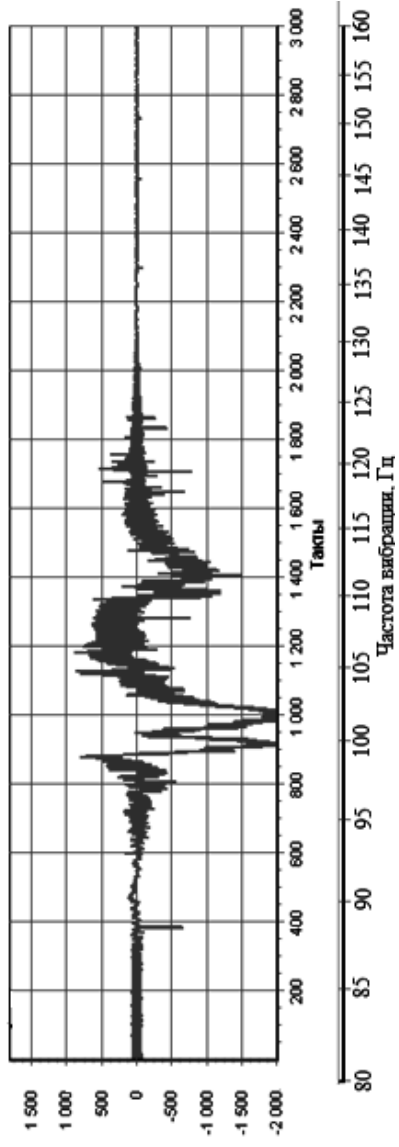
На БЧЭ около каждого амортизатора, на плите вибростенда около опор прибора и на корпусе прибора были установлены вибродатчики, ОЧ которых направлены вдоль линии действия вибрации.

При испытаниях были записаны выходные сигналы ВОГ и МА до, во время и после вибровоздействий, запись производилась при частоте опроса 4 мс. В процессе вибрации также регистрировали амплитуды и фазы колебаний по показаниям вибродатчиков.

Испытания показали, что при воздействии ШСВ в показаниях ВОГ появляются ошибки измерения угловой скорости, переменная и постоянная составляющие которых достигают сотен градусов в час. При воздействии сканирующей по частоте вибрации выделяются резонансные частоты примерно 65 и 110 Гц, при которых в показаниях ВОГ резко возрастает переменная составляющая сигнала, причем на второй частоте это сопровождается возникновением значительной постоянной составляющей ошибки измерения угловой скорости. На рис. 2 приведены зависимости изменения выходного сигнала ВОГ3 (измеренной угловой скорости) в диапазонах значений частоты 40...80 Гц (рис. 2, а) и 80...160 Гц (рис. 2, б). Математическое моделирование с помощью средств ANSYS упругомассовой системы, состоящей из корпуса прибора (с блоком электроники) и амортизированного БЧЭ, показало, что эти резонансные частоты близки к нижним собственным частотам угловых и линейных колебаний конструкции соответственно (при испытаниях по показаниям вибродатчиков собственная частота линейных колебаний БЧЭ на амортизаторах составляет 105 Гц).



*a*



*b*

Рис. 2. Зависимости изменения угловой скорости по каналу ВОГЗ при сканировании от частоты в диапазоне значений 40...80 Гц (*a*) и 80...160 Гц (*b*)

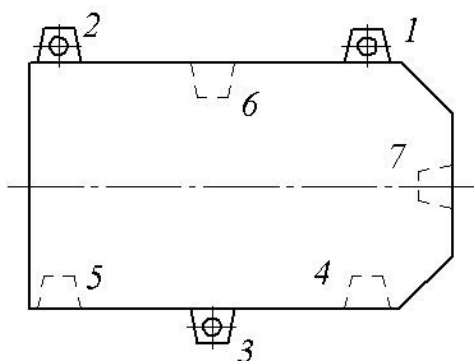
Увеличение переменной составляющей сигнала связано с тем, что вследствие массово-жесткостной несимметрии реальной конструкции линейные колебания БЧЭ неизбежно сопровождаются угловыми колебаниями. Так, при различии частоты амортизаторов в 1 Гц, что вполне реально при подборе их в комплект, полученные при моделировании вибрации прибора на частоте 100 Гц с виброускорением 0,6g амплитуды угловых колебаний  $\alpha$  составляют единицы угловых секунд. При  $\alpha = 1'$  и частоте вибрации 100 Гц амплитудное значение угловой скорости колебаний равно 628 град/ч. Это значение вполне согласуется с наблюдаемыми значениями переменной составляющей выходных сигналов углоизмерительных каналов бесплатформенного инерциального блока при воздействии ШСВ. Таким образом, при испытаниях на вибростенде прибор реагирует на угловые колебания БЧЭ, сопровождающие линейную вибрацию. При этом неясен механизм возникновения постоянной составляющей измеренной угловой скорости в некоторых резонансных зонах. Причиной могут быть нелинейные эффекты в оптических компонентах ВОГ (в частности, в результате колебаний интенсивности излучения источника света) и в схемах (алгоритмах и циклограммах) формирования выходной информации измерительных каналов. Параллельно с исследованиями таких эффектов, для минимизации виброчувствительности прибора конструктивными мерами следует максимально увеличить резонансные частоты. С этой целью проведен расчет собственных частот и моделирование форм колебаний корпуса с БЧЭ, установленным вместо амортизаторов на стойках из титанового сплава ВТ1-0, с различным креплением прибора к установочной плите: штатном (три опоры) и при креплении прибора на шести и семи опорах. Значения шести собственных частот колебаний БЧЭ, Гц, для трех вариантов крепления прибора приведены ниже:

Крепление прибора  
на опорах:

трех .....	296,77	364,57	387,16	414,25	499,05	516,74
шести .....	390,72	409,82	445,52	463,87	554,05	561,89
семи .....	410,14	442,38	461,10	551,68	558,68	632,16

Моделирование показало, что при креплении прибора на семи опорах значения собственной частоты колебаний БЧЭ, установленно-го в корпусе, превышают 410 Гц, а линейные и угловые перемещения корпуса и БЧЭ намного меньше аналогичных перемещений при штатном варианте крепления прибора. Кроме того, в модель были внесены изменения конструкции крепления ВОГ в БЧЭ, направленные на увеличение ее жесткости, что позволило повысить нижнюю частоту собственных колебаний БЧЭ относительно корпуса с 800 до 1 700 Гц.

Параллельно с моделированием проведены испытания прибора с БЧЭ, установленным на стойках из титанового сплава, при креплении



**Рис. 3. Схема расположения штатных и дополнительных опор прибора (1—7 — опоры)**

ШСВ на прибор со штатным креплением эффективная амплитуда перегрузки на корпусе в 2 раза превышает амплитуду, заданную на плите вибростенда, а при креплении на шести и семи опорах оказывается заметно ниже этой амплитуды. В то же время ошибки измерения угловой скорости, вызванные воздействием ШСВ, при указанных вариантах крепления прибора уменьшились незначительно по сравнению с ошибками измерения угловой скорости при штатном креплении прибора.

Под воздействием сканирующей по частоте вибрации при креплении прибора на трех опорах постоянная составляющая сигнала резко возрастает в показаниях ВОГ2 и ВОГ3 на частоте примерно 300 Гц, при креплении прибора на шести опорах — только в показаниях ВОГ3 на частоте около 315 Гц, при креплении на семи опорах постоянная составляющая не изменяется. На резонансных частотах в показаниях ВОГ увеличивается только переменная составляющая сигнала, отражающая реакцию ВОГ на угловую скорость, в данном случае вибрационной природы\*.

**Заключение.** Проведены вибрационные испытания бесплатформенного инерциального блока в штатной конфигурации (БЧЭ установлен на амортизаторах, прибор крепится к вибростенду на трех опорах). Выполнено моделирование конструкции прибора с более жестким корпусом и измененным креплением ВОГ в основании БЧЭ при установке блока в корпус на стойках из титанового сплава и трех вариантах крепления прибора — на трех, шести и семи опорах. Образец прибора, в котором амортизаторы БЧЭ заменены на стойки, был подвергнут виброиспытаниям при штатном варианте крепления и с имитацией дополнительных опор корпуса. На основании полученных результатов даны следующие рекомендации:

\* Анализ результатов виброиспытаний прибора КИНД34-059. Отчет КИНД. Э001.3112 ФГУП «ЦЭНКИ». 2011.

прибора к плите вибростенда на трех опорах (рис. 3, опоры 1—3), при имитации крепления на шести (опоры 1—6) и семи (опоры 1—7) опорах по той же методике, по которой испытан прибор при штатном креплении. Имитация дополнительных опор прибора проводилась путем установки на клей металлических прокладок в зазор между корпусом прибора и плитой вибростенда.

Сравнение показаний вибродатчиков при испытаниях прибора показало, что при воздействии

- увеличить число опор крепления прибора до семи;
- сделать крепление ВОГ в БЧЭ и конструкцию корпуса прибора более жесткими;
- провести испытания прибора или его чувствительных элементов при воздействии ударных нагрузок, предусмотренных условиями эксплуатации, в целях подтверждения работоспособности при отказе от амортизации БЧЭ.

Статья поступила в редакцию 4.07.2012