

ОБ ЭФФЕКТЕ НАЛОЖЕНИЯ СПЕКТРОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПОДВИЖНЫХ ШАССИ И МЕТОДАХ ЕГО ИСКЛЮЧЕНИЯ

А. А. Папко, А. В. Поспелов, Н. К. Юрков

Горизонтирование при установке объектов различного назначения на подвижные шасси осуществляется с помощью систем с аналогичным названием.

Неотъемлемой частью систем горизонтирования являются инерциальные системы, предназначенные для измерения углов крена, тангажа и формирования управляющих воздействий для опорно-поворотных устройств установки объектов в заданное положение. При этом эффективность работы систем устройств измерения углов тангажа и крена (УИТК) напрямую связана с точностью измерения названных углов.

В качестве измерителей углов в наземных системах горизонтирования, как правило, используются акселерометры уравнивающего преобразования [1]. В отличие от традиционных датчиков угла, использование акселерометров не требует механической связи между чувствительным элементом и подвижным основанием. Акселерометры измеряют углы наклона конструкций относительно вектора гравитационного ускорения g на основе энергетического взаимодействия с ним. При измерении углов тангажа θ и крена γ два акселерометра устанавливаются на платформу измерительными осями перпендикулярно. При этом они измеряют проекции вектора гравитационного ускорения, равные $g_\theta = g \sin \theta$ и $g_\gamma = g \sin \gamma$. Для каждого из них выходной сигнал без учета смещения нуля $U_{\text{вых}(\theta)}$ будет равен

$$U_{\text{вых}(\theta)} = K_{g\theta} \arcsin \frac{g_\theta}{g}, \quad U_{\text{вых}(\gamma)} = K_{g\gamma} \arcsin \frac{g_\gamma}{g},$$

где $K_{g\theta}$, $K_{g\gamma}$ – коэффициенты преобразования акселерометров каналов θ и γ по гравитационному ускорению.

Особенностями создания акселерометров для систем горизонтирования является выполнение двух противоречивых требований:

- высокой точности, реализуемой за счет увеличения глубины уравнивания и, как следствие, увеличения собственной частоты;

- устойчивости или сохранения метрологических характеристик при воздействии виброускорений в широком частотном диапазоне, возникающих при работе двигателя шасси, опорно-двигательных и технологических устройств объекта, например вентиляторов. При этом следует иметь в виду, что для систем горизонтирования с использованием акселерометров вибрационные помехи являются влияющей величиной, однородной с измеряемым параметром.

Выполнение указанных требований достигается путем формирования частотного диапазона измерений (ЧДИ), верхняя граница которого определяется контролируемой динамикой объекта и скоростью затухания амплитудно-частотной характеристики в первой октаве за верхней границей ЧДИ до 30 дБ/окт. При этом необходимость выполнения требований осложняется также тем, что параметры влияющих вибраций, как любой реальный сигнал, имеют неограниченный спектр, а требования к их частотному диапазону, как правило, задаются весьма приближенно.

В настоящее время для формирования ЧДИ акселерометров эффективно использование ФНЧ высокого порядка на переключаемых конденсаторах (на ПК-фильтрах). Для микросхем ПК-фильтров частота среза (верхняя граница ЧДИ) и частота генерации встроенного генератора, под которой следует понимать частоту дискретизации, связаны соотношением 50:1.

Структурная схема системы с учетом включения ПК-фильтров на входах АЦП микроконтроллера показана на рис. 1.

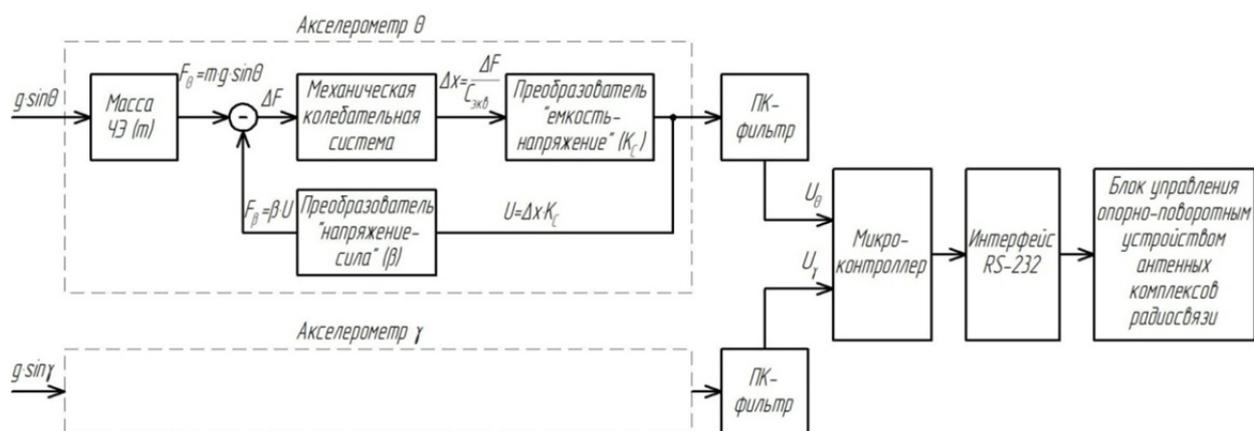


Рис. 1. Структурная схема системы горизонтирования: g – модуль вектора гравитационного ускорения; θ , γ – углы тангажа и крена соответственно; m – масса инерционного элемента; Δx – смещение инерционного элемента под действием измеряемой и уравнивающей сил F_0 (F_γ), F_β ; $C_{\text{экв}}$ – жесткость подвеса, формируемая электромеханической обратной связью

Согласно структурной схеме проекции гравитационного ускорения на измерительные оси акселерометров каналов θ и γ преобразовываются в них в выходные напряжения, которые подаются на ПК-фильтры и входы АЦП микроконтроллера.

В настоящее время в АО НИИФИ разработана система горизонтирования типа УИТК. Ее отличительной особенностью является использование акселерометров собственной разработки с применением отечественной комплектации, включая ПК-фильтр, микроконтроллер и приемопередатчик, а также высокая стабильность метрологических характеристик, нормируемая в виде среднеквадратического значения абсолютной погрешности, которое в условиях эксплуатации не превышает ± 20 угловых секунд (табл. 1). Для примера, эталонные средства горизонтирования типа поплавковых и электронных уровней имеют сопоставимую погрешность, но при неизменной температуре окружающей среды и отсутствии влияющих ускорений.

Несмотря на положительные результаты разработки и высокий уровень экспериментальной отработки УИТК, при ее пробной эксплуатации на подвижном шасси автомобиля «Тигр-М» системой записан спектр низкочастотного сигнала частотой до 2 Гц, который невозможно интерпретировать в качестве записей вибрации, воспроизведенной работой двигателя автомобиля. В режиме холостого хода автомобиля возможно наложение вибропроцессов от работы различных узлов двигателя, но их нижняя частотная граница, как правило, не бывает менее 300 Гц. Анализ вибрационных составляющих, возникающих при работе двигателя внутреннего сгорания [2, 3], показал, что причиной появления низкочастотной составляющей в спектре УИТК не может являться биение сигналов с незначительно отличающимися частотами в связи с тем, что биение как линейный процесс не может быть источником новых частотных компонент.

Таблица 1

| | |
|--|------------------------|
| Диапазоны измерений, град. | от ± 3 до ± 90 |
| ЧДИ, Гц | 0 – 4 |
| Среднеквадратическое значение абсолютной погрешности в условиях эксплуатации, угл. с | ± 20 |
| Время непрерывной работы, ч, не более | 15 |
| Представление выходной информации | кодировка ASCII |
| Интерфейс | RS-232 |
| Напряжение питания, В | 23–34 |
| Ток потребления, мА, не более | 100 |
| Температура окружающей среды, °С | минус 50 – + 70 |
| Виброускорение в направлениях измерительных осей, $\text{м/с}^2/\text{Гц}$ | 0,5/5–500 |
| Виброускорение в поперечном направлении, $\text{м/с}^2/\text{Гц}$ | 5/5–500 |
| Масса с корпусом из стали, кг | 1,7 |
| Габаритные размеры, мм × мм × мм | 100 × 150 × 54 |

Дальнейшие исследования показали, что появление в спектре выходного сигнала УИТК низкочастотной составляющей объясняется эффектом наложения спектров вибрационного сигнала и частоты дискретизации примененного ПК-фильтра. Указанный эффект характеризуется следующими признаками [4–6]:

- нарушением условия нахождения анализируемого сигнала (в рассматриваемом случае вибрационного) в зоне Найквиста или нарушением критерия дискретизации Котельникова, согласно которому частота дискретизации должна быть как минимум вдвое больше частоты исследуемого или влияющего сигнала;
- формированием в ПК-фильтре паразитного сигнала или низкочастотного образа реального сигнала, отображаемого в частотном диапазоне измерений системы и воспринимаемого АЦП и микроконтроллером в качестве измеряемого угла наклона (рис. 2).

В этой связи фактические измерения низкочастотной составляющей при установке УИТК на автомобиль «Тигр-М» объясняются отображением частот выше частоты дискретизации ПК-фильтра в полосу частот полезного сигнала, находящуюся в диапазоне частот от 0 до верхней границы ЧДИ [7, 8].

Из анализа признаков наложения спектров, а также учитывая, что эффект наложения в цифровом сигнале полностью производится на первом этапе цифроаналогового преобразования, а в данном случае – в ПК-фильтре, и то, что для любого реального сигнала спектр является бесконечным, следует, что для его исключения при работе УИТК необходимо принятие специальных мер.

К их числу относятся:

- увеличение частоты дискретизации ПК-фильтра, что связано с нежелательным расширением верхней границы ЧДИ;
- использование более предпочтительного решения в виде ограничения спектра измеряемого сигнала путем дополнительной аналоговой фильтрации выходного сигнала акселерометров.

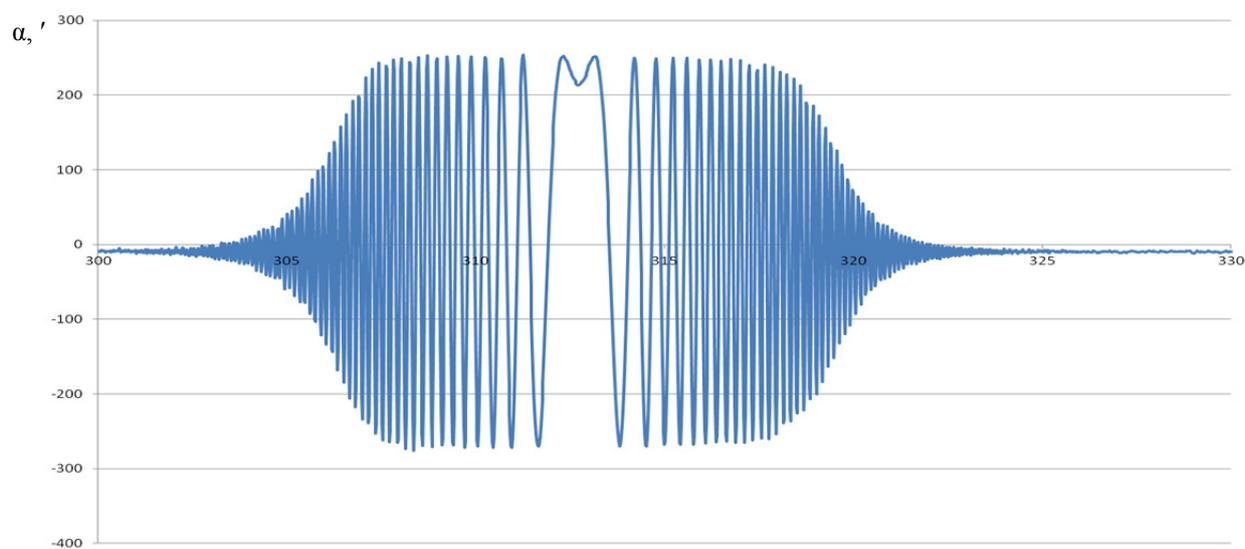


Рис. 2. Запись выходного сигнала УИТК при наложении спектров с частотой воздействия вибрации, близкой к частоте дискретизации

Реализация этого решения и его экспериментальное подтверждение позволили решить достаточно сложную проблему наложения спектра включением пассивного интегрирующего звена первого порядка на вход ПК-фильтра с частотой среза, превышающей верхнюю границу ЧДИ в (5–10) раз.

Таким образом, для правильной интерпретации результатов измерений систем горизонтирования на основе акселерометров в процессе эксплуатации необходимо не только фильтровать анализируемый сигнал до начала дискретизации, но и обращать особое внимание на достоверность представления частотного диапазона вибрационных помех, возникающих при работе шасси, опорно-поворотных и технологических устройств объектов горизонтирования.

Кроме этого, представляется целесообразным нормирование частоты наложения спектров в КД системы на основе экспериментального исследования при воздействии влияющих вибраций в интервале частот, верхняя граница которого превышает на порядок максимальную частоту вибраций, установленную в техническом задании.

Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Разработка методов и средств создания высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и транспортной техники нового поколения» (Соглашение № 15-19-10037 от 20 мая 2015 г.) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

Список литературы

1. Мокров, Е. А. Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники / Е. А. Мокров, А. А. Папко. – Пенза : ПАИИ, 2004. – 164 с.
2. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. / Р. Лайонс. – 2-е изд. – М : Бином-Пресс, 2006.
3. Куприянов, М. С. Цифровая обработка сигналов : процессоры, алгоритмы, средства проектирования / М. С. Куприянов, Б. Д. Матюшкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2000. – 592 с.
4. ГОСТ 32108–2013. Измерения вибрации, передаваемой машиной через упругие изоляторы. Двигатели внутреннего сгорания поршневые высокоскоростные и среднескоростные. – URL: <http://docs.cntd.ru/>
5. ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – URL: <http://standartgost.ru/>
6. Болознев, В. В. Методы и средства радиоволновой вибродиагностики двигателей летательных аппаратов / В. В. Болознев, М. Ю. Застела, Ф. Н. Мирсаитов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 102–108.
7. Лушпа, И. Л. Модели интенсивности отказов виброизоляторов для электронных средств / И. Л. Лушпа, В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 50–57.

Папко Антонина Алексеевна

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 9)
E-mail: inercial@niifi.ru

Поспелов Алексей Владимирович

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 9)
e-mail: enpho@yandex.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки интеллектуальной системы горизонтирования устройств измерения тангажа и крена, предназначенной для горизонтирования объектов, эксплуатируемых на подвижных шасси. Показано, что в отличие от традиционных датчиков использование акселерометров не требует механической связи между чувствительным элементом и подвижным

Papko Antonina Alekseevna

doctor of technical sciences, professor,
senior research manager,
Research Institute for Physical Measurements
(440026, 9 Volodarskiy street, Penza, Russia)

Pospelov Aleksei Vladimirovich

design-engineer,
Research Institute for Physical Measurements
(440026, 9 Volodarskiy street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment
design and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Abstract. Presents the results of the development of the intellectual system of leveling of the pitch and roll measurement device designed for leveling the objects used on movable chassis. It is shown that unlike traditional sensors use accelerometers requires no mechanical connection between sensor element and moving base that provides high accuracy implemented by increasing the depth of trim and stability (preserve metrological

основанием, что обеспечивает высокую точность, реализуемую за счет увеличения глубины уравновешивания и, устойчивость (сохранения метрологических характеристик) при воздействии виброускорений в широком частотном диапазоне, что значительно упрощает их применение. Рассмотрены условия возникновения эффекта наложения спектров при эксплуатации устройств измерения углов тангажа и крена и методы его исключения. Дана структурная схема системы горизонтирования, в которой проекции гравитационного ускорения на измерительные оси акселерометров каналов θ и γ преобразовываются в выходные напряжения, которые подаются на ПК-фильтры и входы АЦП микроконтроллера. Показано, что при правильной интерпретации результатов измерений систем горизонтирования на основе акселерометров в процессе эксплуатации необходимо не только фильтровать анализируемый сигнал до начала дискретизации, но и обращать особое внимание на достоверность представления частотного диапазона вибрационных помех, возникающих при работе шасси, опорно-поворотных и технологических устройств объектов горизонтирования.

Ключевые слова: углы тангажа и крена, акселерометр уравновешивающего преобразования, микроконтроллер, опорно-поворотное устройство, спектр, наложение спектров, низкочастотный образ реального сигнала.

УДК 629.73.018

Папко, А. А.

Об эффекте наложения спектров в интеллектуальной системе горизонтирования при эксплуатации на подвижных шасси и методах его исключения / А. А. Папко, А. В. Поспелов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 56–60. DOI 10.21685/2307-4205-2016-3-9.

characteristics) when exposed to vibration over a wide frequency range, which greatly simplifies their use. Reviewed by conditions that cause aliasing effects you use angular measurements of pitch and roll and the methods of its deletion. Dana structural scheme of the leveling system, in which the projection of the gravitational acceleration on the measuring axis accelerometers channels θ and γ are the output voltages, which can be enjoyed on the PC-filters and ADC inputs of the microcontroller. It is shown that a correct interpretation of the measurement results of accelerometers based leveling systems during operation must not only filter the signal being analyzed prior to the sampling rate, but pay particular attention to the accuracy of the presentation frequency range vibration disturbances occur in the chassis, musculo-turning device and process objects leveling.

Key words: pitch angles and a tilt, an accelerometer of the balance transformation, the microcontroller, the support-rotating device, a spectrum, superimposition of spectrums, a low-frequency fashion of a real signal.