

Алгоритмическое повышение точности определения характеристики преобразования беспроводного цифрового акселерометра

Кессельман М.Г., Чернышов В.И.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: mgkesselman@ciam.ru

Рассмотрены особенности определения характеристики преобразования беспроводного цифрового датчика вибрации во всем рабочем диапазоне частот. Показано влияние дискретизации выходного сигнала на точность оценки амплитуды виброускорения в высокочастотной части диапазона по результатам измерений, полученным беспроводным цифровым акселерометром. Для определения фактической характеристики преобразования датчика предложен модифицированный тригонометрический метод обработки результатов измерений синусоидальной вибрации датчиком в натурном эксперименте.

Ключевые слова: беспроводной цифровой акселерометр, характеристика преобразования датчика, рабочий диапазон частот, обработка результатов измерений, погрешность измерений

Algorithmic improvement of accuracy in determining the conversion characteristic of a wireless digital accelerometer

Kesselman M.G., Chernyshov V.I.

CIAM, Moscow

The article examines specifics of determining conversion characteristics of a wireless digital vibration sensor in the entire operating frequency range. The effect of output signal sampling on the accuracy of estimating the vibration acceleration amplitude in the high-frequency part of the range based on measurement results obtained by a wireless digital accelerometer is shown. A modified trigonometric method for processing measurement results of sinusoidal vibration by the sensor in a full-scale experiment is proposed to determine the actual conversion characteristics of the sensor.

Keywords: wireless digital accelerometer, sensor conversion characteristic, operating frequency range, measurement results processing, measurement error

Введение

Создание интеллектуальных систем автоматического управления, контроля и диагностики перспективных авиационных двигателей связано с применением беспроводных интеллектуальных датчиков в составе информационно-измерительных каналов параметров двигателя. Создание таких беспроводных устройств позволит повысить надежность, уменьшить массу и габариты линий связи, снизить эксплуатационные затраты. Внедрение беспроводных интеллектуальных датчиков на авиационном двигателе будет происходить поэтапно. Вначале

они будут применяться в системах, не являющихся критическими, например в системах контроля и диагностики авиадвигателя. В дальнейшем, с ростом наработки на двигателе, такие датчики будут применяться в системах автоматического управления авиадвигателем [1].

Одним из наиболее распространенных методов контроля технического состояния узлов и трансмиссии авиадвигателя является вибродиагностика. В составе информационно-измерительных каналов вибрации перспективно применение беспроводных интеллектуальных датчиков виброускорения, в которых в качестве первичных преобразователей используются малогабаритные

цифровые акселерометры (ЦА) на основе МЭМС-технологии (микроэлектромеханические системы). Применение цифровых акселерометров обусловлено их достоинствами: диапазон измеряемого ускорения может составлять до ± 400 g, питание – 1,7...3,6 В, сверхмалое энергопотребление, высокая точность и повторяемость результатов измерений, задаваемые пользователем параметры измерения и режимы работы [2].

О важности определения фактической погрешности ЦА сказано в [3; 4]. Предложены методы калибровки и определения погрешности коэффициента статической характеристики. Однако определение коэффициента преобразования в рабочем диапазоне частот (амплитудно-частотной характеристики) ЦА в этих работах не рассмотрено.

При контроле вибросостояния элементов конструкции двигателя важны достоверные измерения высокочастотных гармоник, для чего необходимо определить фактическую характеристику преобразования датчиков вибрации во всем рабочем диапазоне частот [5]. Определение этой характеристики в частотной области производится экспериментально, при измерении датчиком синусоидальной вибрации, задаваемой с помощью вибростенда с постоянной амплитудой ($A_{\text{зад}}$) во всем рабочем диапазоне частот в соответствии с государственным стандартом [6]. По результатам измерений определяется амплитуда сигнала датчика (A), а затем значение коэффициента преобразования $K = A/A_{\text{зад}}$.

При таких экспериментальных исследованиях необходимо учитывать ряд особенностей. Например, характеристика преобразования ЦА определяет характеристику преобразования беспроводного цифрового датчика вибрации в целом, так как его выходной сигнал уже содержит результат измерения вибрации в виде цифрового кода. Для измерения такого сигнала невозможно использовать высокоточные цифровые вольтметры [7] и анализаторы частотных характеристик [8], применяемые для определения характеристики преобразования виброакселерометров с аналоговым выходным сигналом.

Другой особенностью является дискретизация выходного сигнала ЦА, ограничивающая рабочий диапазон беспроводного датчика вибрации частотой Найквиста $f_{\text{max}} = f_{\text{д}}/2$, где $f_{\text{д}}$ – частота дискретизации ЦА [9]. В низкочастотном диапазоне датчика число измерений на период сигнала вибрации (относительная частота дискретизации) $n_{\text{пер}} = 50 \dots 100$, и график сигнала ЦА аналогичен графику сигнала датчика с аналоговым выходом. На высоких же частотах рабочего диапазона $f < f_{\text{max}}$ число измерений $n_{\text{пер}} = 2 \dots 5$, при котором вероятность регистрации амплитудного значения сигнала весьма мала. Кроме того, на этих частотах при малом $n_{\text{пер}}$ на оценку амплитуды сигнала значительное влияние оказывают шумы в результатах измерений.

Методическая ошибка в определении характеристики преобразования беспроводного цифрового датчика вибрации в дальнейшем может увеличить систематическую составляющую погрешности измерений вибрации на двигателе.

Невозможность применения стандартной методики определения в эксперименте фактической характеристики преобразования беспроводного цифрового датчика вибрации в рабочем диапазоне частот делает актуальным получение искомой характеристики датчика с требуемой точностью посредством цифровой обработки данных, полученных в натурном эксперименте.

Решение поставленной задачи сводится к идентификации параметров нелинейной модели синусоидального типа по дискретной выборке результатов измерения виброускорения. В статье при выборе метода обработки данных учтено соответствие требованию оценивания параметров модели синусоидального сигнала с использованием дополнительной информации из эксперимента о точности применяемых средств измерений и параметрах шумов. Предложен метод, удовлетворяющий указанному выше критерию, позволяющий определять параметры модели сигнала при обработке данных с помощью тригонометрических соотношений. Выполнено исследование возможности применения предлагаемого тригонометрического метода для оценки амплитуды виброускорения по результатам измерения синусоидального виброускорения ЦА, значения которых были сгенерированы методом математического моделирования в широком диапазоне частот с фиксированной частотой дискретизации при разном уровне случайных шумов. Показано повышение помехоустойчивости тригонометрического метода путем регуляризации алгоритма обработки данных. Эффективность определения характеристики преобразования ЦА в рабочем диапазоне частот с помощью модифицированного тригонометрического метода показана при обработке результатов измерений синусоидальной вибрации в натурном эксперименте.

Методы цифровой обработки результатов измерений для оценки амплитуды виброускорения

Для примера, рассмотрим результаты измерения виброускорения беспроводным цифровым акселерометром при экспериментальном определении его характеристики преобразования в рабочем диапазоне частот. Синусоидальная вибрация задавалась на частотах $f_{\text{зад}} = 100, 1000$ и 2000 Гц с постоянной амплитудой виброускорения $A_{\text{зад}} = 1,0$ g, а измерения вибрации выполнялись датчиком с частотой дискретизации $f_{\text{д}} = 5000$ Гц. По полученным выборкам данных необходимо определить фактическое значение амплитуды (A) сигнала датчика.

Анализ полученных данных показал, что на частоте 100 Гц максимальные значения виброускорения с учетом шумов составляют около 1,0 g при числе измерений на период $n_{\text{пер}} = 50$. На 1000 Гц максимальные значения виброускорения составляют от 0,7 до 1,05 g при $n_{\text{пер}} = 5$. При 2000 Гц максимальные значения виброускорения составляют от 0,3 до 0,9 g, так как регистрация амплитудного значения виброускорения при числе измерений на период $n_{\text{пер}} = 2,5$ маловероятна.

Для определения фактического значения амплитуды сигнала рассмотрим возможность использования метода усреднения сигнала [10], применяемого при измерении среднеквадратичного значения (СКЗ) аналоговых синусоидальных сигналов вибродатчиков. Применение алгоритма вычисления значения амплитуды (A) с использованием СКЗ [7]:

$$A = \text{СКЗ} \cdot \text{CF}, \quad (1)$$

где СКЗ – среднеквадратичное значение сигнала, полученное усреднением за период; CF – пик-фактор, который для синусоидальных сигналов равен $2^{0,5}$, показало, что значения амплитуды виброускорения (A) на частотах 100, 1000 и 2000 Гц составляют:

$$A_{100} = 1,0 \text{ g}; \quad A_{1000} = 0,95 \text{ g}; \quad A_{2000} = 0,75 \text{ g}. \quad (2)$$

С учетом того, что погрешность измерения заданной амплитуды виброускорения аппаратурой вибростенда, задающего вибрацию, не превышает $\pm 5\%$, погрешность полученной оценки амплитуды (2) на высоких частотах нельзя признать удовлетворительной.

Применение методов цифровой обработки сигнала ЦА будем рассматривать при идентификации параметров модели сигнала следующего вида:

$$y(t_i) = A \sin(2\pi f t_i + c) + \varepsilon(t_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где $y(t_i)$ – результат измерения виброускорения в момент времени $t_i = \Delta t i$; $f_d = 1/\Delta t$ – частота дискретизации; A, f, c – амплитуда, частота и фаза синусоидальной вибрации – неизвестные параметры, подлежащие оцениванию; $\varepsilon(t_i)$ – значение центрированной, нормально распределенной случайной величины (шума) в момент времени t_i .

Обработка данных с помощью метода дискретного преобразования Фурье [9] в низкочастотном диапазоне датчика при числе точек на период 100...200 обеспечивает требуемую точность оценки амплитуды (A) сигнала. Вместе с тем в высокочастотном диапазоне при $n_{\text{пер}} = 3 \dots 5$ при наличии шумов измерений применение метода неэффективно.

Применение метода наименьших квадратов [11] для обработки данных с целью определения параметров модели (3) в силу ее нелинейности по параметрам f и c приводит к системе нелинейных уравнений, решить которую аналитически не представляется возможным.

В рассматриваемой задаче для определения характеристики преобразования беспроводного ЦА целесообразно применить метод, ориентированный на оценку параметров нелинейной модели синусоидального вида (3) с использованием дополнительной информации из эксперимента о точности применяемых средств измерений, параметрах шумов и т.п.

В соответствии с этим требованием представляется интересным подход к оценке параметров синусоиды (3), вычисляемым по трем ее равноотстоящим значениям y_{k-1}, y_k и y_{k+1} , с помощью тригонометрических выражений (тригонометрический метод), предложенный в [12]:

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{\delta(n-2)} \sum_{k=2}^{n-1} \arccos \frac{y_{k+1} + y_{k-1}}{2y_k}; \\ c &= \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \arctg \frac{y_k \sin(bx_{k+1}) - y_{k+1} \sin(bx_k)}{y_{k+1} \cos(bx_k) - y_k \cos(bx_{k+1})}; \\ A &= \frac{\sum_{k=1}^n y_k \sin(bx_k + c)}{\sum_{k=1}^n y_k \sin^2(bx_k + c)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где в соответствии с (2) $\delta = 1$, $b = 2\pi f / f_d$, $x_i = i$.

В работе [12] показано, что для малых регулярных отклонений в измерениях y_k от $\sin(t)$ усреднением по соседним тройкам измерений можно получить оценку A с погрешностью около 1,5%. Вместе с тем не рассмотрено применение метода для обработки данных измерений, отягощенных случайной помехой, что характерно для работы информационно-измерительных каналов на авиадвигателе.

Для исследования возможности применения тригонометрического метода для определения характеристики преобразования ЦА проведено математическое моделирование результатов измерений синусоидальных виброускорений вида (3) с амплитудой $A_{\text{зад}} = 1,0 \text{ g}$ на частотах 100, 1000 и 2000 Гц с частотой дискретизации $f_d = 5000 \text{ Гц}$. Обработка данных проводилась на персональном компьютере в соответствии с формулами (4). В расчетных исследованиях уровень случайного шума составлял: 0; 0,5; 1; 5 и 10%. Результаты исследований приведены в табл. 1. На рис. 1 показаны графики изменения относительной погрешности оценки амплитуды (δA) в зависимости от уровня шумов измерений ($\Delta Y_{\text{ш}}$).

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии погрешности измерений тригонометрический метод позволяет получить фактические значения характеристики преобразования акселерометра. Однако при увеличении уровня погрешности измерений ($\Delta Y_{\text{ш}}$) относительная погрешность оценки величины амплитуды виброускорения (δA) значительно растет, что обусловлено увеличением погрешности оценки параметра b (или f).

Табл. 1. Оценка параметров модели сигнала виброускорения (3) тригонометрическим методом

$f_{\text{зад}}, \text{Гц}$	$\Delta Y_{\text{ш}}, \%$	A, g	$\delta A, \%$	$f, \text{Гц}$	$c, ^\circ$
100	0	1,0	0	100,0	0
	0,5	0,99	-1,0	112,8	-23,9
	1	0,90	-10,0	128,7	-30,9
	5	0,55	-45,0	299,1	-4,3
	10	0,27	-73,0	366,3	-3,8
1000	0	1,0	0	1000,0	-0,06
	0,5	0,99	-1,0	998,7	4,87
	1	0,98	-2,0	997,5	9,3
	5	0,81	-19,0	979,5	39,9
	10	0,11	-89,0	956,4	1,1
2000	0	1,0	0	2000,0	-0,06
	0,5	0,97	-3,0	2005,1	-18,0
	1	0,96	-4,0	2009,7	-19,4
	5	0,94	-6,0	1995,6	33,3
	10	0,13	-87,0	1983,9	2,34

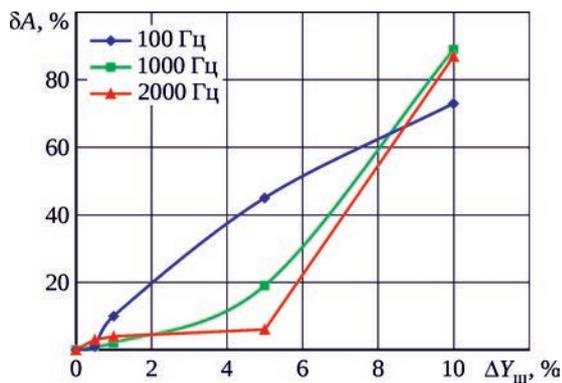


Рис. 1. Относительная погрешность оценки амплитуды тригонометрическим методом в зависимости от уровня шумов измерений

В проведенных исследованиях установлено, что низкая помехоустойчивость метода [12] связана с функцией $\arccos(z)$, значения аргумента которой $z = |1|$ являются критическими, так как в них производная функции $-1/(1-z^2)^{0,5} = -\infty$. При попадании аргумента z в область критических значений оценка параметра b имеет высокую чувствительность к помехе измерений, которая может вызывать значительное смещение оценки. Такая ошибка в оценке параметра b при нелинейных преобразованиях в вычислении параметра A приводит к катастрофическим ошибкам в оценке амплитуды синусоидального сигнала. Применение метода усреднения, рекомендуемого в [12], не обеспечивает компенсации этих ошибок.

Для решения проблемы предлагается регуляризация алгоритма. Она предусматривает введение ограничения на возможные значения b из (4) в виде допуска,

который формируется на основе априорной информации из рассматриваемого эксперимента:

$$b \leq b_p \pm \Delta_p, \quad (5)$$

где $b_p = 2\pi f' / f'_d$ – альтернативная расчетная оценка параметра b ; f' – измеренное значение частоты виброускорения в эксперименте; f'_d – измеренное значение частоты дискретизации микроконтроллера беспроводного датчика; Δ_p – допустимое отклонение в оценке параметра b .

Если вычисленное значение параметра b удовлетворяет условию (5), то оно принимается. В противном случае за оценку параметра b принимается альтернативная оценка b_p , которая используется при оценке амплитуды A .

Значения b_p , рассчитанные для рассматриваемых частот:

$$b_{p100} = 0,12566; b_{p1000} = 1,25664; b_{p2000} = 2,51327. \quad (6)$$

В расчетных исследованиях минимальное значение Δ_p ограничивалось удвоенной погрешностью применяемого частотомера – 0,01%.

Результаты расчета параметров модели (3) с использованием в формулах (4) значений b_p из (6) для модельных значений зашумленного синусоидального сигнала при варьировании уровня случайных помех ($\Delta Y_{\text{ш}}$) от 0 до 10% и относительной частоты дискретизации от 50,0 до 2,5 измерений на период приведены в табл. 2. На рис. 2 показаны графики изменения относительной погрешности оценки амплитуды в зависимости от уровня шумов измерений.

Проведенные расчетные исследования показали, что применение модифицированного тригонометрического

Табл. 2. Оценка параметров модели сигнала виброускорения (3) модифицированным тригонометрическим методом

$f_{\text{зад}}, \text{Гц}$	$\Delta Y_{\text{ш}}, \%$	A, g	$\delta A, \%$	$f, \text{Гц}$	$c, ^\circ$
100	0	0,998	-0,2	100	-0,11
	0,5	0,998	-0,2	100	-0,06
	1	0,998	-0,2	100	-0,06
	5	0,998	-0,2	100	-0,23
	10	0,997	-0,3	100	-0,17
1000	0	0,998	-0,2	1000	0,06
	0,5	0,998	-0,2	1000	0,06
	1	0,998	-0,2	1000	0,06
	5	0,996	-0,4	1000	-0,11
	10	0,994	-0,6	1000	0,17
2000	0	0,998	-0,2	2000	-0,06
	0,5	0,997	-0,3	2000	-0,06
	1	0,997	-0,3	2000	-0,06
	5	0,994	-0,6	2000	-0,06
	10	0,993	-0,7	2000	-0,06

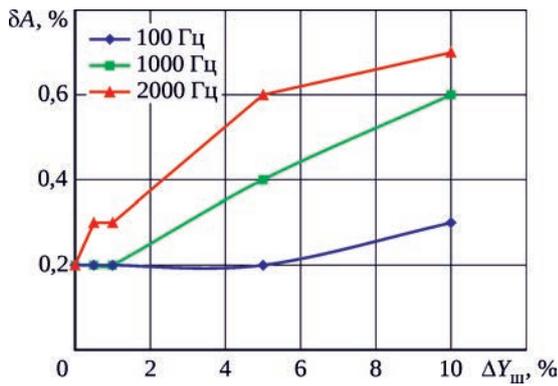


Рис. 2. Относительная погрешность оценки амплитуды тригонометрическим методом в зависимости от уровня шумов измерений

кого метода для обработки данных модельных измерений синусоидального сигнала с уровнем случайных помех 10% и относительной частотой дискретизации 2,5 измерений на период позволяет оценить амплитуду сигнала с относительной погрешностью менее 1%.

Определение характеристики преобразования в натурном эксперименте

Применим модифицированный тригонометрический метод для обработки результатов натурных измерений цифровым акселерометром синусоидальной вибрации. Исходными данными являются: заданная амплитуда виброускорения $A_{зад} = 1,0 \text{ g}$ на частотах 100, 1000 и 2000 Гц, частота дискретизации $f_d = 5000 \text{ Гц}$.

Результаты оценки параметров модели сигнала (3) A, f и c , а также погрешность оценки амплитуды при-

Табл. 3. Оценка параметров модели сигнала виброускорения (3) модифицированным тригонометрическим методом по результатам натурных измерений

$f_{зад}, \text{ Гц}$	$A, \text{ g}$	$\delta A, \%$	$f, \text{ Гц}$	$c, ^\circ$
100	0,990	-1,0	100	27,5
1000	0,968	-3,2	1000	73,3
2000	0,978	-2,2	2000	-6,9

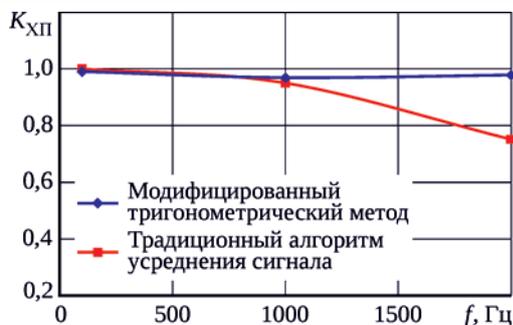


Рис. 3. Характеристика преобразования $K_{ХП}(f)$ беспроводного цифрового акселерометра

ведены в табл. 3. Относительная погрешность оценки амплитуды виброускорения синусоидальной вибрации в рассматриваемом диапазоне частот не превышает 3,2%.

Характеристика преобразования $K_{ХП}(f) = A(f)/A_{зад}(f)$ беспроводного цифрового акселерометра в рассматриваемом диапазоне частот, полученная модифицированным тригонометрическим методом, показана на рис. 3. Для сравнения там же приведена характеристика преобразования, полученная с помощью традиционного алгоритма усреднения сигнала по данным из (2).

Таким образом, применение модифицированного тригонометрического метода для обработки результатов измерений синусоидальной вибрации с реальным уровнем помех, полученных цифровым акселерометром в рабочем диапазоне частот от 100 до 2000 Гц с частотой дискретизации 5000 Гц, позволяет определить характеристику преобразования датчика с погрешностью не более 3%, по сравнению с погрешностью 25% при применении традиционного алгоритма усреднения сигнала.

Заключение

Для включения в состав информационно-измерительного канала вибрации двигателя беспроводного цифрового акселерометра необходимо определить его фактическую характеристику преобразования во всем рабочем диапазоне частот.

Недостаточная точность определения характеристики преобразования цифрового датчика вибрации в диапазоне частот близких к частоте Найквиста связана, с одной стороны, с невозможностью применения высокоточных цифровых вольтметров и анализаторов частотных характеристик, используемых для определения амплитуды вибрации с помощью датчиков с аналоговым сигналом, а с другой стороны, обусловлена значительной методической ошибкой в оценке амплитуды дискретного сигнала при обработке с помощью методов усреднения результатов 3...5 измерений на период.

Для обработки результатов измерений, полученных посредством цифрового акселерометра, выбран метод, позволяющий определять параметры нелинейной модели сигнала синусоидального вида с помощью тригонометрических соотношений. Расчетными исследованиями установлена работоспособность тригонометрического метода в определении амплитуды синусоидальной вибрации во всем диапазоне рабочих частот акселерометра при уровне случайных шумов измерений 0,5...1,0%.

Показана возможность повышения помехоустойчивости тригонометрического метода: регуляризация алгоритма обработки результатов измерений цифровым акселерометром синусоидальной вибрации позволила определить в натурном эксперименте характеристику преобразования датчика с погрешностью не более 3%.

Литература

1. Беспроводная демонстрационная система управления и контроля газотурбинного двигателя / О.С. Гуревич, А.С. Трофимов, М.Г. Кессельман, В.И. Чернышов, А.А. Семин // Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями / под ред. О.С. Гуревича. М. : Торус Пресс, 2010. С. 46–58.
2. Калачев А.В. Акселерометры STMicroelectronics: определяя любое движение // Новости электроники. 2014. № 6. С. 13–17.
3. Горянина К.И., Катин О.И., Федотов О.В. Калибровка цифрового MEMS-акселерометра методом наименьших квадратов // Pandia : site. URL: <https://pandia.ru/text/80/582/81489.php>.
4. Васюков С.А. Разработка алгоритмов обработки информационного сигнала и реализация комбинированного датчика удара, наклона и движения на основе 3-осевого MEMS-акселерометра // Радиооптика : сетевое научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 6. С. 47–63. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27809934>. DOI 10.7463/rdopt.0616.0850702.
5. ГОСТ Р ИСО 8042-99. Вибрация и удар. Датчики инерционного типа для измерений вибрации и удара. Устанавливаемые характеристики. М. : Госстандарт России, 2000. II, 6 с.
6. ГОСТ Р ИСО 16063-1-2009. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Ч. 1. Основные положения. М. : Стандартиформ, 2010. III, 24 с.
7. Agilent 34410A/11A. Цифровые мультиметры с разрешением 6 ½ разрядов : руководство по эксплуатации / Agilent Technologies. 3-я ред. 2006. 146 с.
8. 1250 series. Frequency response analysers / Solartron Analytical. 2 p. Rev 0122. URL: https://www.ameteksi.com/-/media/ameteksi/download_links/documentations/1250e/model-1250a.pdf?revision=538e4719-c1c8-46b0-9a8b-29876ee027f1.
9. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов : пер. с англ. под ред. А.А. Бритова. М. : Бином, 2006. 656 с.
10. Харт Х. Введение в измерительную технику : пер. с нем. М.М. Гельмана ; с предисл. В.А. Кузнецова. М. : Мир, 1999. 391 с.
11. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд., доп. и испр. М. : Физматгиз, 1962. 349 с.
12. Величко Е.В. Определения параметров синусоиды по ее значениям в системе точек // Наукові вісті Дніпровського університету. 2014. № 11. URL: http://filelibsnu.at.ua/naukovi/Naukovi_visti/pdf_11_2014/9.pdf.

References

1. Gurevich O.S., Trofimov A.S., Kessel'man M.G., Chernyshov V.I., Semin A.A. Besprovodnaia demonstratsionnaia sistema upravleniia i kontroliia gazoturbinnogo dvigatel'ia [Wireless demonstrational control and monitoring system of a gas turbine engine]. Sistemy avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigatel'iami [Automatic control systems of aviation gas turbine engines] edited by O.S. Gurevich. Moscow: Torus Press, 2010. P. 46–58.
2. Kalachev A.V. Akselerometry STMicroelectronics: opredeliiaa liuboe dvizhenie [STMicroelectronics accelerometers: determining any movement]. Novosti elektroniki [Electronics News]. 2014. No 6. P. 13–17.
3. Gorianina K.I., Katin O.I., Fedotov O.V. Kalibrovka tsifrovogo MEMS-akselerometra metodom naimen'shikh kvadratov [Calibration of the digital MEMS-accelerometer by the method of the latest squares]. Pandia: site. URL: <https://pandia.ru/text/80/582/81489.php>.
4. Vasiukov S.A. Razrabotka algoritmov obrabotki informatsionnogo signala i realizatsiia kombinirovannogo datchika udara, naklona i dvizheniia na osnove 3-osevogo MEMS-akselerometra [Data signal processing algorithms and combined shock, tilt, and motion sensor implementation based on the 3-axis MEMS-accelerometer]. Radiooptika [Radiooptics]: electronic journal of the Bauman MSTU. 2016. No 6. P. 47–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27809934>. DOI 10.7463/rdopt.0616.0850702.
5. ISO 8042:1988. Shock and vibration measurements – Characteristics to be specified for seismic pick-ups. International Organization for Standardization. 1988. 4 p.
6. ISO 16063-1:1998. Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic concepts. International Organization for Standardization. 1998. 24 p.
7. Agilent 34410A/11A. 6 ½ Digit Multimeter: user's guide. Agilent Technologies. 3rd ed. 2006. 146 p.

-
8. 1250 series. Frequency response analysers / Solartron Analytical. 2 p. Rev 0122. URL: https://www.ameteksi.com/-/media/ameteksi/download_links/documentations/1250e/model-1250a.pdf?revision=538e4719-c1c8-46b0-9a8b-29876ee027f1.
 9. Lyons R.G. Understanding digital signal processing. 2nd ed. Pearson Education, 2004. 667 p.
 10. Hart H. Einführung in die Meßtechnik. 5. durchgesehene Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik, 1989. 379 p.
 11. Linnik Iu.V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nabliudenii [The method of least squares and basics of the mathematical and statistical theory of observation processing]. 2nd edition expanded and corrected. Moscow: Fizmatgiz, 1962. 349 p.
 12. Velichko E.V. Opredeleniia parametrov sinusoidy po ee znacheniiam v sisteme toчек [Determination of parameters of a sinusoidal functions by its values in a system of points]. Naukovi visti Dalivs'kogo universitetu [Scientific news of Dahl university]. 2014. No 11. 5 p. URL: http://filelibsnu.at.ua/naukovi/Naukovi_visti/pdf_11_2014/9.pdf.

Материалы получены редакцией 27.01.2022