

Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 681.2-5

Бакер Альравашдех, М.П. Сергиенко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

МЕТОД ПЛОЩАДЕЙ НА ОСНОВЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

В работе предложен метод площадей для определения постоянной времени и коэффициента затухания акселерометра при анализе его амплитудно-частотной характеристики. Исследована систематические составляющие погрешностей идентификации постоянной времени и коэффициента затухания предложенным методом, рассмотрены пути их уменьшения. Оценены стандартные неопределенности постоянной времени и коэффициента затухания, предложены пути оптимизации измерительного эксперимента для их уменьшения. Даны рекомендации по практическому применению предложенного метода.

Ключевые слова: акселерометр, динамическое звено колебательного типа, динамическая характеристика, амплитудно-частотная характеристика, стандартная неопределенность.

Введение

В настоящее время акселерометры, включающиеся в мехатронные системы для измерения движения, положения, наклона, вибрации и удара, нашли широчайшее применение в сложных технических и информационно-измерительных системах и комплексах различного назначения [1, 2], в том числе автомобилестроении.

Автомобильные акселерометры и многочисленные электронные системы с их использованием (антиблокировочная система, система охранной сигнализации в противоугонных системах, система транспортной навигации и GPS, блок инерциальных измерений для сбора информации от всех инерционных систем автомобиля) применяются для обеспечения безопасности, комфорта пассажиров, динамического контроля автомобиля. Они позволяют решать такие задачи, как обнаружение аварий, активация систем безопасности и контроль разворачивания подушек безопасности; детектирование крена, боковых аварий и опрокидываний; аварийные испытания (в том числе для оснащения манекенов); запись данных об аварии; адаптивный круиз-контроль; защита пешеходов; контроль сцепления; контроль динамической стабильности; контроль активной подвески; электронная парковка тормоза; компенсация измерений уровня; управление фарами; контроль неровности дороги; управление двигателем и трансмиссией; наблюдение за давлением в шинах и др. [2, 3].

В соответствии с [4, 5] основными характеристиками акселерометров, которые представляют собой динамическое звено колебательного типа, являются совокупность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик и нелинейность амплитудной характеристики. При этом на средних частотах частотного диапазона определяется в основном ампли-

тудно-частотная характеристика (АЧХ), и только при использовании акселерометров на частотах, близких к нижним и верхним границам частотного диапазона, или для специальных целей может потребоваться знание их фазочастотных характеристик [5].

На сегодняшний день решение задачи метрологической идентификации динамических характеристик, в том числе и АЧХ, и последующей их коррекции является одним из наиболее эффективных путей повышения быстродействия и точности акселерометров, требования к которым постоянно повышаются.

Целью работы является разработка и исследование метода площадей, получаемых при экспериментальном определении АЧХ для идентификации параметров акселерометров.

Основной раздел

Суть метода

АЧХ акселерометра, описываемого колебательным звеном второго порядка, имеет вид

$$A(\omega) = k / \sqrt{(1 - \omega^2 T^2)^2 + (2\omega \xi T)^2}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота; k – статический коэффициент преобразования акселерометра; T – постоянная времени акселерометра; ξ – коэффициент затухания акселерометра.

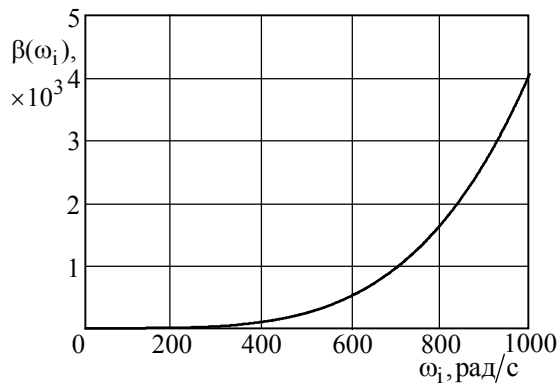
АЧХ (1) может быть получена экспериментально на частотах ω_i , $i = 0, 1, 2, \dots, N_{гр}$, где $N_{гр}$ – порядковый номер граничного значения частоты $\omega_{гр}$. Если значения $A(\omega_i)$ пересчитать в соответствии с выражением

$$\beta(\omega_i) = (k/A(\omega_i))^2, \quad (2)$$

можно получить зависимость, показанную на рис. 1.

Площадь под кривой $\beta(\omega_i)$ до любого граничного значения частоты $\omega_{гр}$ определяется по формуле

$$S(\omega_{гр}) = \sum_{i=0}^{N_{гр}} \beta(\omega_i) \cdot [\omega_{i+1} - \omega_i] = \sum_{i=0}^{N_{гр}} \beta(\omega_i) \cdot \Delta\omega_i. \quad (3)$$

Рис. 1. Зависимость $\beta(\omega_i)$

Если значения частот выбрать с одинаковыми интервалами $\Delta\omega_i = \Delta\omega$, то (3) предстанет в виде

$$S(\omega_{гр}) = \Delta\omega \sum_{i=0}^{N_{гр}} \beta(\omega_i). \quad (4)$$

С другой стороны, значения $\beta(\omega_i)$ из выражений (1) и (2) могут быть записаны в виде

$$\beta(\omega) = (1 - \omega^2 T^2)^2 + (2\omega T \xi)^2. \quad (5)$$

Площадь $S(\omega_{гр})$ под этой кривой может быть получена аналитически

$$S(\omega_{гр}) = \int_0^{\omega_{гр}} \beta(\omega) d\omega = \frac{\omega_{гр}}{15} \times [15 - 10T^2\omega_{гр}^2 + 20T^2\xi^2\omega_{гр}^2 + 3T^4\omega_{гр}^4]. \quad (6)$$

Получив по экспериментальным данным в соответствии с выражением (4) два значения площадей $S(\omega_{гр1})$ и $S(\omega_{гр2})$ и введя обозначения

$$T^* = T^2; \quad \xi^* = \xi^2 \quad (7)$$

в выражение (6), можно получить систему уравнений

$$\begin{cases} 15\omega_{гр1} - 10T^*\omega_{гр1}^3 + 20T^*\xi^*\omega_{гр1}^3 + \\ + 3(T^*)^2\omega_{гр1}^5 = 15S(\omega_{гр1}); \\ 15\omega_{гр2} - 10T^*\omega_{гр2}^3 + 20T^*\xi^*\omega_{гр2}^3 + \\ + 3(T^*)^2\omega_{гр2}^5 = 15S(\omega_{гр2}). \end{cases} \quad (8)$$

Выражая из первого выражения системы (8) ξ^*

$$\xi^* = \frac{15S(\omega_{гр1}) - 15\omega_{гр1} + 10T^*\omega_{гр1}^3 - 3(T^*)^2\omega_{гр1}^5}{20T^*\omega_{гр1}^3} \quad (9)$$

и подставляя во второе выражение системы (8), можно получить квадратное уравнение вида

$$3(T^*)^2[\omega_{гр2}^5 - \omega_{гр1}^5] - 10T^*[\omega_{гр2}^3 - \omega_{гр1}^3] + 15[\omega_{гр2} - \omega_{гр1} - S(\omega_{гр2}) + S(\omega_{гр1})] = 0, \quad (10)$$

физически реализуемым решением которого будет

$$T^* = \frac{1}{6[\omega_{гр2}^5 - \omega_{гр1}^5]} \left\{ 10[\omega_{гр2}^3 - \omega_{гр1}^3] + \right. \\ \left. + (100[\omega_{гр2}^3 - \omega_{гр1}^3]^2 - 180[\omega_{гр2}^5 - \omega_{гр1}^5] \times \right. \\ \left. \times [\omega_{гр2} - \omega_{гр1} - S(\omega_{гр2}) + S(\omega_{гр1})])^{1/2} \right\}. \quad (11)$$

Если принять соотношение

$$n = \omega_{гр2} / \omega_{гр1}, \quad (12)$$

выражения для постоянной времени и коэффициента затухания с учетом выражения (7) примут вид

$$T = \left[\frac{10}{6\omega_{гр1}^3(n^5 - 1)} \left\{ \omega_{гр1}(n^3 - 1) + \right. \right. \\ \left. \left. + [\omega_{гр1}^2(n^3 - 1)^2 - 1,8\omega_{гр1}(n^5 - 1) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times [\omega_{гр1}(n - 1) - S(\omega_{гр2}) + S(\omega_{гр1})] \right\}^{1/2} \right]^{1/2}; \quad (13)$$

$$\xi = \frac{1}{20T^2\omega_{гр1}^3} \times \quad (14)$$

$$\times \sqrt{15S(\omega_{гр1}) - 15\omega_{гр1} + 10T^2\omega_{гр1}^3 - 3T^4\omega_{гр1}^5}.$$

Систематическая погрешность метода

Выявлено появление методической погрешности идентификации постоянной времени, связанной с дискретизацией АЧХ, которая на примере акселерометра с $k = 1g = 9,8 м/с^2$, $T = 8$ мс и $\xi = 0,6$ не превысила для постоянной времени 1 %. Однако для ее уменьшения рекомендуется частоту дискретизации $\Delta\omega$ принимать как можно меньше.

Также выявлено, что точность идентификации постоянной времени не зависит от соотношения n между частотами $\omega_{гр1}$ и $\omega_{гр2}$.

Систематическая погрешность идентификации коэффициента затухания, связанная с дискретизацией АЧХ, может быть значительной (до 60 %), поэтому рекомендуется принимать частоту дискретизации $\Delta\omega$ как можно меньше.

Также значение имеет величина соотношения n между частотами $\omega_{гр1}$ и $\omega_{гр2}$. Для рассматриваемого примера для частот дискретизации $\Delta\omega < 10$ рад/с погрешность идентификации коэффициента затухания не превышает 1 % при $n \in (5; 12)$; для частот дискретизации $\Delta\omega > 10$ рад/с такая погрешность идентификации может быть достигнута при условии, что $n \in (80; 85)$.

Оценивание стандартных неопределенностей

Стандартная неопределенность постоянной времени T , определенной в соответствии с выражением (14) в предположении независимости входящих в него переменных, может быть оценена как

$$u(T) = \left[\left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \omega_{rp1}} \right)^2 u^2(\omega_{rp1}) + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial n} \right)^2 u^2(n) + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial S(\omega_{rp1})} \right)^2 \times \right. \\ \left. \times u^2[S(\omega_{rp1})] + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial S(\omega_{rp1})} \right)^2 u^2[S(\omega_{rp1})] \right]^{1/2} \quad (15)$$

где коэффициенты чувствительности определяются путем дифференцирования выражения (14);

стандартные неопределенности частот $u(\omega_{rp1})$, $u(\omega_{rp2})$ зависят от метрологических характеристик средств измерительной техники, при помощи которых они задаются и/или измеряются; стандартная неопределенность соотношения частот n оценивается как

$$u(n) = \frac{1}{\omega_{rp1}} \sqrt{(-n)^2 u^2(\omega_{rp1}) + u^2(\omega_{rp2})} \quad (16)$$

и, если $u(\omega_{rp1}) = u(\omega_{rp2}) = u(\omega)$,

$$u(n) = (u(\omega)/\omega_{rp1}) \cdot \sqrt{n^2 + 1}; \quad (17)$$

стандартная неопределенность площади $S(\omega_{rp1})$ в соответствии с выражениями (2) и (3)

$$u[S(\omega_{rp1})] = \left[\left(\frac{\partial S(\omega_{rp1})}{\partial \omega_{i+1}} \right)^2 u^2(\omega_{i+1}) + \left(\frac{\partial S(\omega_{rp1})}{\partial \omega_i} \right)^2 \times \right. \\ \left. \times u^2(\omega_i) + \left(\frac{\partial S(\omega_{rp1})}{\partial A(\omega_i)} \right)^2 u^2[A(\omega_i)] \right]^{1/2} \quad (18)$$

где коэффициенты чувствительности определяются путем дифференцирования выражения (3);

стандартные неопределенности АЧХ $u[A(\omega_j)]$ зависят от метрологических характеристик средств измерительной техники, при помощи которых они измеряются;

стандартная неопределенность площади $S(\omega_{rp2})$

$$u[S(\omega_{rp2})] = \left[\left(\frac{\partial S(\omega_{rp2})}{\partial \omega_{i+1}} \right)^2 u^2(\omega_{i+1}) + \left(\frac{\partial S(\omega_{rp2})}{\partial \omega_i} \right)^2 \times \right. \\ \left. \times u^2(\omega_i) + \left(\frac{\partial S(\omega_{rp2})}{\partial A(\omega_i)} \right)^2 u^2[A(\omega_i)] \right]^{1/2} \quad (19)$$

где коэффициенты чувствительности определяются путем дифференцирования выражения (3).

Для рассматриваемого акселерометра зависимости стандартной неопределенности постоянной времени $u(T)$ от стандартной неопределенности частоты $u(\omega)$ в диапазоне частот от 0 до $\omega_{rp2} = 10^4$ рад/с и соотношении частот $n = 200$ (т.е. $\omega_{rp1} = 50$ рад/с) и $n = 82$ (т.е. $\omega_{rp1} \approx 122$ рад/с, при которой наблюдается минимум $u(T)$, что совпало с минимумом систе-

матической погрешности идентификации коэффициента затухания) при частоте дискретизации $\Delta\omega = 10$ рад/с и $\Delta\omega = 100$ рад/с показаны на рис. 2 и 3.

Уменьшение $u(T)$ с ростом частоты дискретизации объясняется уменьшением количества используемой информации, обладающей собственной неопределенностью. При этом зависимости $u(T)$ от стандартной неопределенности АЧХ $u[A(\omega)]$ не наблюдается. Из рис. 2 и 3 также очевидно, что за счет выбора оптимального соотношения n стандартная неопределенность $u(T)$ была уменьшена в 1,2...2,5 раза.

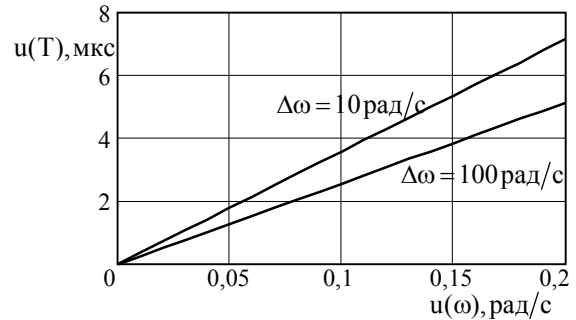


Рис. 2. Зависимости $u(T)$ от $u(\omega)$ при $n = 200$

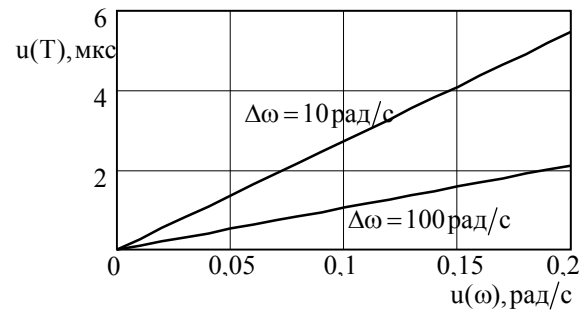


Рис. 3. Зависимости $u(T)$ от $u(\omega)$ при $n = 82$

Стандартная неопределенность коэффициента затухания, определенного по формуле (14) оценивается в соответствии с формулой

$$u(\xi) = \left[u^2[S(\omega_{rp1})] + \left(\frac{\partial \xi}{\partial S(\omega_{rp1})} \right)^2 + \left(\frac{\partial \xi}{\partial \omega_{rp1}} \right)^2 u^2(\omega_{rp1}) + \left(\frac{\partial \xi}{\partial T} \right)^2 u^2(T) \right]^{1/2} \quad (20)$$

где коэффициенты влияния определяются путем дифференцирования выражения (14); стандартная неопределенность площади $S(\omega_{rp1})$ оценивается по формуле (18); стандартная неопределенность постоянной времени T оценивается по формуле (15).

Для рассматриваемого акселерометра зависимости стандартной неопределенности коэффициента затухания $u(\xi)$ от стандартной неопределенности частоты $u(\omega)$ в диапазоне частот от 0 до $\omega_{rp2} = 10^4$ рад/с и соотношении частот $n = 200$ (т.е. $\omega_{rp1} = 50$ рад/с) и $n = 82$ т.е. $\omega_{rp1} \approx 122$ рад/с, при которой наблюдает-

ся минимум систематической погрешности идентификации коэффициента затухания) при частоте дискретизации $\Delta\omega = 10$ рад/с и $\Delta\omega = 100$ рад/с для разных стандартных неопределенностей $u[A(\omega)]$ показаны на рис. 4 и 5/ Из рис. 4 и 5 очевидно, что за счет выбора оптимального соотношения n стандартная неопределенность $u(\xi)$ была уменьшена в 1,2...3,5 раза.

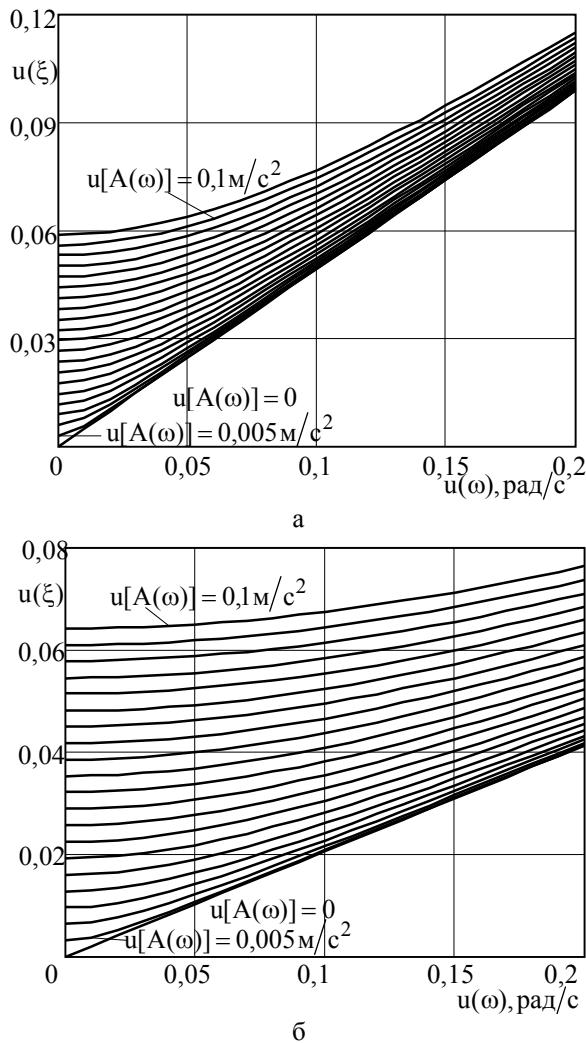


Рис. 4. Зависимости $u(\xi)$ от $u(\omega)$ при $n = 200$:
а – $\Delta\omega = 10$ рад/с ; б – $\Delta\omega = 100$ рад/с

Выводы

Предложен метод идентификации АЧХ СИТ, моделируемых динамическим звеном колебательного типа, основанный на расчете площадей под АЧХ с последующим определением постоянной времени и коэффициента затухания СИТ.

На примере акселерометра оценены стандартные неопределенности постоянной времени и коэффициента затухания в зависимости от стандартных неопределенностей частоты и АЧХ.

Показано, что указанные стандартные неопределенности могут быть уменьшены путем подбора оптимального соотношения между граничными частотами площадей в 1,2...3,5 раза.

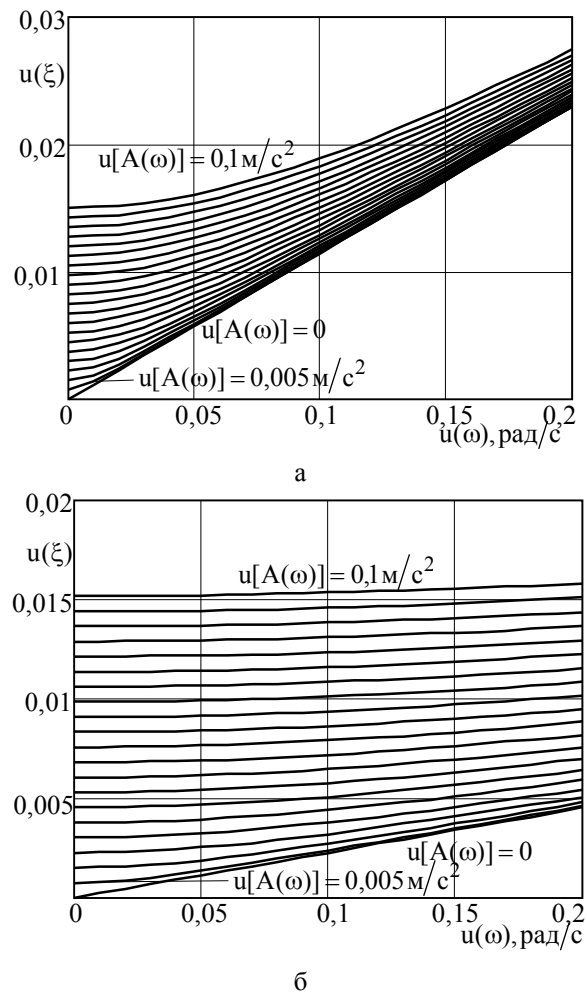


Рис. 5. Зависимости $u(\xi)$ от $u(\omega)$ при $n = 82$:
а – $\Delta\omega = 10$ рад/с ; б – $\Delta\omega = 100$ рад/с

Список литературы

1. Седалищев В.Н. Методы и средства измерений неэлектрических величин [Текст]: учеб. пособ. / В.Н. Седалищев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 392 с.
2. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Ч. 1. Автомобильные акселерометры – важнейший сегмент в конъюнктуре современного рынка автомобильных датчиков / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 8. – С. 15-21.
3. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Ч. 1. Автомобильные акселерометры – ключевые фигуры систем безопасности и комфорта / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 9. – С. 18-22.
4. ДСТУ ГОСТ 18955:2009 Акселерометры низкочастотные линейные. Термины и определения [Текст]. – Введ. 1974-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1973. – 12 с.
5. ГОСТ ИСО 5347-0-95 Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Общие положения [Текст]. – Введ. 1997-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 29 с.

Поступила в редколлегию 2.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

**МЕТОД ПЛОЩ НА ОСНОВІ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ**

Бакер Альравашдех, М.П. Сергієнко

У роботі запропоновано метод площ для визначення постійної часу і коефіцієнту затухання акселерометра при аналізі його амплітудно-частотної характеристики. Досліджені систематичні складові похибок ідентифікації постійної часу і коефіцієнту затухання запропонованим методом, розглянуті шляхи їх зменшення. Оцінені стандартні невизначеності постійної часу і коефіцієнта затухання, запропоновані шляхи оптимізації вимірювального експерименту для їх зменшення. Надані рекомендації щодо практичного застосування запропонованого метода.

Ключові слова: акселерометр, динамічна ланка коливального типу, динамічна характеристика, амплітудно-частотна характеристика, стандартна невизначеність.

**THE AREA METHOD BASED ON AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS
FOR IDENTIFICATION OF ACCELEROMETERS PARAMETERS IDENTIFICATION**

Baker Alravashdeh, M.P. Sergiienko

In this article the usage of an area method was offered for determination of both time constant and attenuation constant of an accelerometer during its amplitude-frequency characteristic analysis. The systematic error of an identification of a time constant as well as of an identification of an attenuation constant was investigated. The ways of reducing such errors were considered. The standard deviation of both time constant and attenuation constant were estimated. There were offered ways of measurement optimization for reducing these standard deviation values. The recommendations on practical usage of the offered method were given.

Keywords: accelerometer, dynamic element of periodic type, dynamic characteristic, amplitude-frequency characteristic, standard deviation.