

Теоретичні аспекти

УДК 681.2-5

Бакер Аль-Равашдех, Лейт Ахмед Мустафа Аль Равашдех, М.П. Сергиенко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ОЦЕНИВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

В работе предложен метод идентификации амплитудно-частотных характеристик средств измерительной техники, моделируемых динамическим звеном колебательного типа, применяемых при испытаниях автотранспортных средств. Рассмотрены преимущества и недостатки, предложены способы оптимизации метода. Осуществлена оценка стандартных неопределенностей получаемых в результате идентификации параметров средств измерительной техники – постоянной времени и коэффициента затухания. Предложены способы их уменьшения.

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

Введение

В настоящее время в связи с постоянным ужесточением требований к безопасности автотранспортных средств (АТС) повышаются требования к средствам измерительной техники (СИТ), применяемым при испытаниях АТС, в частности к их метрологическим характеристикам. Одной из групп метрологических характеристик, подлежащих нормированию, являются динамические характеристики (ДХ) [1 – 3], отражающие инертные свойства СИТ, то есть описывающие реакцию СИТ на какое-либо внешнее воздействие. Метрологическая идентификация ДХ СИТ, состоящая в определении параметров СИТ и их неопределенностей с заданным уровнем доверия, является важным этапом на пути повышения точности и достоверности получаемых с помощью данных СИТ результатов измерений.

В результате измерительного эксперимента могут быть получены непосредственно временные характеристики (переходная и импульсная) и частотные характеристики (амплитудно-частотная и фазочастотная), остальные ДХ могут быть определены путем пересчета из указанных ДХ. Основным преимуществом частотных характеристик является возможность их измерения в «установившемся» режиме, когда входной сигнал с заданными параметрами подается на СИТ в течение необходимого времени (временные характеристики определяются по характеристическому воздействию ограниченной длительности, что является дополнительным источником неопределенности).

При испытаниях АТС в составах комплексных систем измерений нашли широкое применение датчики, обладающие динамическими свойствами, влияющими на результаты получаемых данных.

К датчикам первого порядка (апериодического типа) относятся, например, датчики температуры. Для идентификации их динамических характеристик применимы методы, описанные в [4, 5]. К датчикам второго порядка (колебательного типа) относятся акселерометры и инклинометры, применяемые соответственно для измерения разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением и измерения угла наклона объекта относительно гравитационного поля Земли. Методы для идентификации динамических характеристик таких датчиков существуют ([4]), однако на сегодняшний день их недостаточно для решения существующих задач. К тому же ситуация усугубляется отсутствием или ограниченностью информации о точности получаемых в результате идентификации параметров СИТ.

Целью работы является разработка метода метрологической идентификации амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) СИТ, моделируемых динамическим звеном колебательного типа.

Метод идентификации АЧХ СИТ

АЧХ СИТ, моделируемого динамическим звеном колебательного типа, имеет вид

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

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

Это выражение можно преобразовать к виду

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

где ω и k известны, а значения $A(\omega)$ могут быть измеренными.

Неизвестные параметры могут быть выражены из (2) следующим образом

$$T = \frac{1}{\omega} \sqrt{1 + 2\xi^2 \pm \sqrt{4\xi^2(\xi^2 - 1) + \frac{k^2}{A^2(\omega)}}}; \quad (3)$$

$$\xi = \frac{1}{2\omega T} \sqrt{\frac{k^2}{A^2(\omega)} - (1 - \omega^2 T^2)^2}. \quad (4)$$

Если экспериментально получить два наблюдения АЧХ $A(\omega_1)$ и $A(\omega_2)$ на разных частотах, можно получить системы уравнений

$$\begin{cases} T = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{1 + 2\xi^2 \pm \sqrt{4\xi^2(\xi^2 - 1) + \frac{k^2}{A^2(\omega_1)}}}; \\ \xi = \frac{1}{2\omega_1 T} \sqrt{\frac{k^2}{A^2(\omega_1)} - (1 - \omega_1^2 T^2)^2}, \end{cases} \quad (5)$$

решая которые подстановкой одного уравнения в другое, находим постоянную времени

$$T = \sqrt[4]{\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2 + \frac{k^2}{A^2(\omega_2)} \omega_1^2 - \frac{k^2}{A^2(\omega_1)} \omega_2^2}{\omega_1^2 \omega_2^2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}}. \quad (6)$$

Коэффициент затухания можно получить, подставив T во второе уравнение системы (5).

Если измерения проводить на частотах ω_1 и $\omega_2 = n\omega_1$, формулы для вычисления постоянной времени и коэффициента затухания будут иметь вид

$$T = \sqrt[4]{\frac{n^2 - 1 + \frac{k^2}{A^2(\omega_2)} - n^2 \frac{k^2}{A^2(\omega_1)}}{n^2 \omega_1^4 (n^2 - 1)}}; \quad (7)$$

$$\xi = \frac{1}{2n\omega_1 T} \sqrt{\frac{k^2}{A^2(\omega_2)} - (1 - n^2 \omega_1^2 T^2)^2}. \quad (8)$$

Стандартная неопределенность постоянной времени и коэффициента затухания

1. Частоты ω_1 и ω_2 произвольные. Для постоянной времени, определяемой по формуле (6), стандартную неопределенность с учетом некоррелированности рассматриваемых параметров можно оценить в соответствии с выражением

$$u(T) = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial \omega_1} \right)^2 u^2(\omega_1) + \left(\frac{\partial T}{\partial \omega_2} \right)^2 u^2(\omega_2) + \right. \quad (9)$$

$$\left. + \left(\frac{\partial T}{\partial A(\omega_1)} \right)^2 u^2[A(\omega_1)] + \left(\frac{\partial T}{\partial A(\omega_2)} \right)^2 u^2[A(\omega_2)] \right]^{1/2},$$

где $u(\omega_1)$, $u(\omega_2)$ – стандартные неопределенности установки частот ω_1 и ω_2 ; $u[A(\omega_1)]$, $u[A(\omega_2)]$ – неопределенности измерения выходного сигнала СИТ.

Коэффициенты чувствительности, входящие в выражение (9), определяются по формулам:

$$\frac{\partial T}{\partial \omega_1} = \frac{1}{2T^3 \omega_1^3 \omega_2^2 (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2} \left[\frac{k^2}{A^2(\omega_2)} \omega_1^4 + \frac{k^2}{A^2(\omega_1)} \omega_2^2 (\omega_2^2 - 2\omega_1^2) - (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 \right]; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \omega_2} = \frac{1}{2T^3 \omega_1^2 \omega_2^3 (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2} \left[\frac{k^2}{A^2(\omega_1)} \omega_2^4 + \frac{k^2}{A^2(\omega_2)} \omega_1^2 (\omega_1^2 - 2\omega_2^2) - (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2 \right]; \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial A(\omega_1)} = \frac{1}{2T^3 A^3(\omega_1) \omega_1^2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}; \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial A(\omega_2)} = \frac{1}{2T^3 A^3(\omega_2) \omega_2^2 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}. \quad (13)$$

Для современных измерительных генераторов погрешность установки частоты не превышает 1%, следовательно, $u(\omega_{1,2}) \leq 0,01\omega_{1,2}$. Погрешность акселерометров может достигать 2%, то есть $u[A(\omega_{1,2})] \leq 0,02A(\omega_{1,2})$.

На рис. 1 показана зависимость $u(T)$ от $u(\omega)$ при максимальных стандартных неопределенностях $u[A(\omega_{1,2})]$. Для расчета были взяты значения частот $\omega_1 = 50$ рад/с, $\omega_2 = 120$ рад/с, статический коэффициент преобразования $k = 1g = 9,8 м/с^2$, постоянная времени $T = 8$ мс, значения выходного сигнала, рассчитанные по формуле (1), $A(\omega_1) = 1,034 g = 10,13 м/с^2$, $A(\omega_2) = 0,866 g = 8,49 м/с^2$. Зависимость $u(T)$ от $u[A(\omega)]$ при максимальных стандартных неопределенностях $u(\omega_{1,2})$ показана на рис. 2. Для коэффициента затухания, определяемого из системы (5), $u(\xi)$ можно оценить по формуле

$$u(\xi) = \left[\left(\frac{\partial \xi}{\partial \omega_2} \right)^2 u^2(\omega_2) + \left(\frac{\partial \xi}{\partial T} \right)^2 u^2(T) + \left(\frac{\partial \xi}{\partial A(\omega_2)} \right)^2 u^2[A(\omega_2)] \right]^{1/2}, \quad (14)$$

в которой коэффициенты чувствительности определяются по формулам

$$\frac{\partial \xi}{\partial \omega_2} = \frac{1 - \omega_2^4 T^4 - \frac{k^2}{A^2(\omega_2)}}{4\omega_2^3 T^2 \xi}; \quad (15)$$

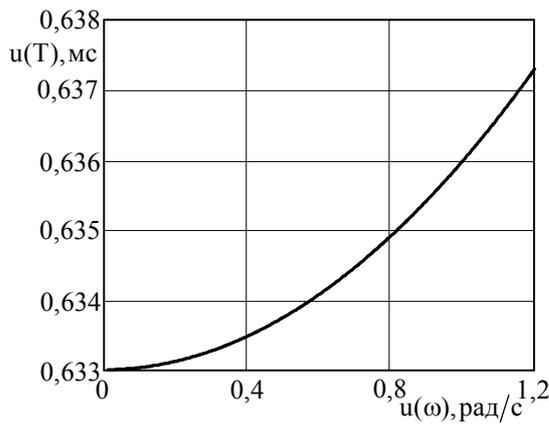


Рис. 1. Зависимость $u(T)[u(\omega)]$ при $u[A(\omega_{1,2})] = 0,02A(\omega_{1,2})$

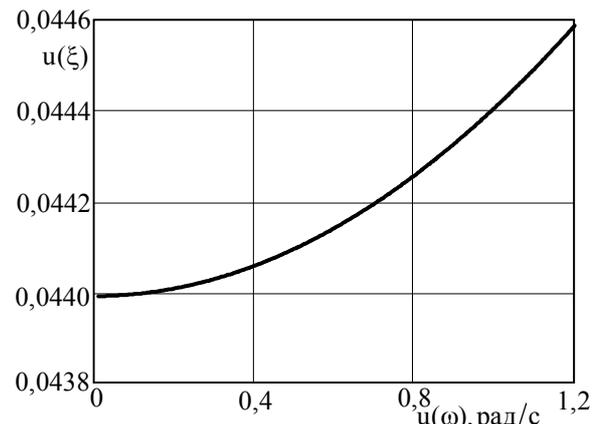


Рис. 3. Зависимость $u(\xi)[u(\omega)]$ при $u[A(\omega_{1,2})] = 0,02A(\omega_{1,2})$

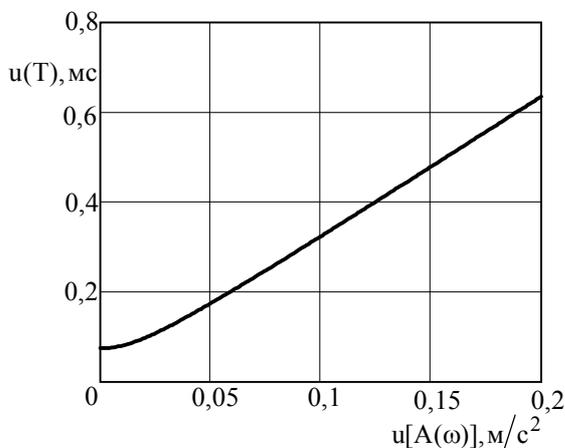


Рис. 2. Зависимость $u(T)[u[A(\omega)]]$ при $u(\omega_{1,2}) = 0,01\omega_{1,2}$

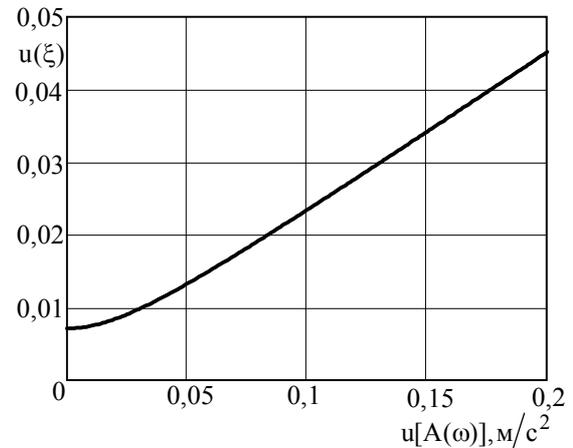


Рис. 4. Зависимость $u(\xi)[u[A(\omega)]]$ при $u(\omega_{1,2}) = 0,01\omega_{1,2}$

$$\frac{\partial \xi}{\partial T} = \frac{1 - \omega_2^4 T^4 - \frac{k^2}{A^2(\omega_2)}}{4\omega_2^2 T^3 \xi}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial A(\omega_2)} = \frac{-k^2}{4\omega_2^2 T^2 \xi A^3(\omega_2)}. \quad (17)$$

Зависимость стандартной неопределенности коэффициента затухания $u(\xi)$ от неопределенности установки частоты $u(\omega)$ при максимальных стандартных неопределенностях $u[A(\omega_{1,2})]$ показана на рис. 3.

Зависимость стандартной неопределенности коэффициента затухания $u(\xi)$ от неопределенности наблюдений $u[A(\omega)]$ при максимальных стандартных неопределенностях $u(\omega_{1,2})$ показана на рис. 4.

При максимальных стандартных неопределенностях $u(\omega_{1,2})$, $u[A(\omega_{1,2})]$ наблюдаются максимумы стандартных неопределенностей $u(T) = 0,637$ мс и $u(\xi) = 0,045$.

2. Частота ω_2 кратна частоте ω_1 (то есть $\omega_2 = n\omega_1$). В этом случае постоянная времени и коэффициент затухания могут быть определены по формулам (7) и (8) соответственно.

Стандартная неопределенность постоянной времени $u(T)$ будет выражаться формулой

$$u(T) = \left[\left(\frac{\partial T}{\partial \omega_1} \right)^2 u^2(\omega_1) + \left(\frac{\partial T}{\partial A(\omega_1)} \right)^2 u^2[A(\omega_1)] + \left(\frac{\partial T}{\partial A(\omega_2)} \right)^2 u^2[A(\omega_2)] \right]^{1/2}, \quad (18)$$

где коэффициенты чувствительности определяются в соответствии с выражениями

$$\frac{\partial T}{\partial \omega_1} = -\frac{T}{\omega_1}; \quad (19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial [A(\omega_1)]} = \frac{k^2}{2\omega_1^4 T^3 (n^2 - 1) A^3(\omega_1)}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial [A(\omega_2)]} = -\frac{k^2}{2n^2 \omega_1^4 T^3 (n^2 - 1) A^3(\omega_2)}. \quad (21)$$

Зависимость $u(T)$ от соотношения n между ω_1 и ω_2 при максимальных стандартных неопределенностях $u(\omega_1)$ и $u[A(\omega_{1,2})]$ показана на рис. 5.

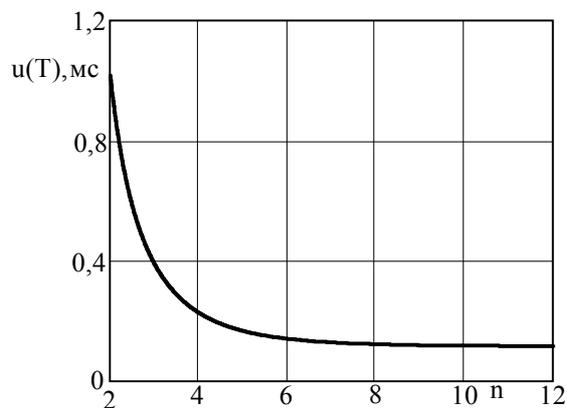


Рис. 5. Зависимость $u(T)[n]$ при $u(\omega_1) = 0,01\omega_1$ и $u[A(\omega_{1,2})] = 0,02A(\omega_{1,2})$

Очевидно, что с ростом n $u(T)$ уменьшается, начиная с 18 мс при $n=1,1$, становясь уже при $n=5,47$ меньше 0,15 мс и стремясь с дальнейшим ростом n к 0,113 мс.

Для коэффициента затухания $u(\xi)$ будет определяться в соответствии с выражениями (14 – 17) с подстановкой $\omega_2 = n\omega_1$. График зависимости $u(\xi)$ от n показан на рис. 6.

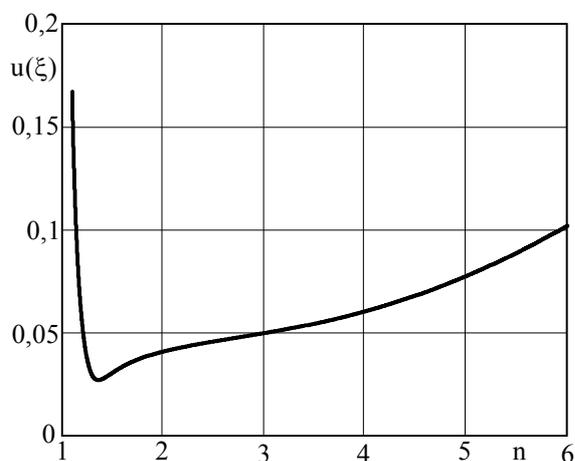


Рис. 6. Зависимость $u(\xi)[n]$ при $u(\omega_1) = 0,01\omega_1$ и $u[A(\omega_{1,2})] = 0,02A(\omega_{1,2})$

Данная зависимость имеет выраженный минимум $u(\xi) = 0,026754$, соответствующий $n = 1,36$, что в 1,7 раза меньше значения, полученного ранее, и в 6,2 раз меньше, чем при $n = 1,1$. При увеличении n неопределенность $u(\xi)$ неограниченно возрастает.

Выводы

В работе предложен новый метод идентификации АЧХ СИТ, моделируемых динамическим звеном колебательного типа. Оценены стандартные неопределенности постоянной времени и коэффициента затухания, исследован характер изменения и предложены способы их уменьшения путем регулирования соотношения n между частотами входного сигнала. На примере измерения акселерометром ускорения при испытаниях АТС показано, что стандартная неопределенность постоянной времени может быть уменьшена путем увеличения n , стандартная неопределенность коэффициента затухания может быть уменьшена путем предварительного анализа условий измерительного эксперимента и выбора оптимального соотношения n .

Развитием метода может стать применение регрессионного анализа и метода наименьших квадратов для уменьшения неопределенности результатов измерений за счет большего числа наблюдений и повышения их достоверности.

Список литературы

1. ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 38 с.
2. ГОСТ 8.256-77 ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения. – М.: Изд-во станд., 1980. – 8 с.
3. ГОСТ 8.508-84 ГСИ. Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 53 с.
4. Захаров И.П. Метрологическая идентификация динамических характеристик средств ИТ: учеб. пос. / И.П. Захаров, М.П. Сергиенко. – Х.: ХНУРЭ, 2012. – 231 с.
5. Быкова Т.В. Методы обработки результатов динамических измерений [Текст]: учеб. пос. / Т.В. Быкова, Г.А. Черепашук. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 175 с.

Поступила в редакцию 28.03.2014

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

ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ КОЛИВАЛЬНОГО ТИПУ

Бакер Альравашдех, Лейт Ахмед Мустафа Аль Равашдех, М.П. Сергієнко

В роботі запропоновано метод ідентифікації амплітудно-частотних характеристик засобів вимірювальної техніки, що моделюються динамічною ланкою коливального типу, використовуваних під час випробувань автотранспортних засобів. Розглянуті переваги та недоліки, запропоновані шляхи оптимізації метода. Здійснено оцінку стандартних невизначеностей отримуваних в результаті ідентифікації параметрів засобів вимірювальної техніки – сталої часу та коефіцієнту затухання. Запропоновані шляхи їх зменшення.

Ключові слова: засіб вимірювальної техніки, динамічна ланка коливального типу, динамічна характеристика, амплітудно-частотна характеристика, стандартна невизначеність.

THE EVALUATION OF GAIN-FREQUENCY CHARACTERISTICS IDENTIFICATION UNCERTAINTIES FOR OSCILLATING MEASURING DEVICES

Baker Alravashdeh, Lejt Ahmed Mustafa Al Ravashdeh, M.P. Sergienko

In this article there has been suggested a gain-frequency characteristics identification method for measuring devices which could be modelled with an oscillating type dynamic link and which are used for vehicle testing. Both the advantages and disadvantages of this method have been considered. There have been suggested some optimizations for this method. Also there have been estimated the uncertainties which took place during the measuring devices parameters identification such as time constant and attenuation factor. The ways of reducing these uncertainties have been suggested.

Keywords: *measuring device; oscillating type dynamic link; dynamic characteristic; gain-frequency characteristic; standard uncertainty.*