

УДК 629.11.012.533

Доцент А.А. Хвостов, профессор С.Г. Тихомиров,
старший преподаватель Д.И. Ребриков

(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра информ. и управл. систем. тел. (473) 255-38-75
E-mail: kafasu@vgta.vrn.ru

преподаватель А.А. Никитченко

(Воен.-воздуш. академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина)
кафедра изыскания и проектирования аэродромов, тел. (473) 226-18-88
E-mail: nik.to77@mail.ru

Associate Professor A.A. Khvostov, professor S.G. Tikhomirov,
senior lecturer D.I. Rebrikov

(Voronezh, Russia. state University of engineering technology.) Department of information and control
systems. phone (473) 255-38-75

E-mail: kafasu@vgta.vrn.ru

lecturer A.A. Nikitchenko

(Military-air academy of a name of professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin)
Department of research and designing of airdromes. Phone, (473) 226-18-88

E-mail: nik.to77@mail.ru

Алгоритм оценки временного окна сигнала «белый шум» в задачах акустической спектрометрии эластомеров

Algorithm for estimating the time window signal "white noise" in the problems of acoustic spectrometry elastomers

Реферат. В статье рассматривается задача о выборе оптимального временного интервала и шага квантования при получении спектральных характеристик исследуемых объектов при помощи сигнала «белый шум» с ограничениями по техническим возможностям регистрации сигнала. При применении в качестве возмущающего сигнала стационарного «белого шума» возникают проблемы с наличием искажений в частотном спектре из-за ограниченности разрешающей способности цифрового регистрирующего устройства. При использовании в экспериментальных исследованиях цифровой техники возникает вероятность искажений из-за ограничений на время сигнала «белого шума» при фиксированном количестве точек сигнала в связи с ограничением памяти регистратора осциллографа. При малых интервалах времени возникают искажения в низкочастотной области спектра, а при больших сигнал искажается в высокочастотной области ввиду снижения частоты дискретизации и, соответственно, потери информации. Для минимизации искажений в спектре излученного сигнала предлагается алгоритм выбора временного окна сигнала типа «белый шум» фиксированного (в смысле количества точек дискретизации) объема выборки для задач акустической спектрометрии на основе оценки параметров линейной функции, аппроксимирующей спектр и характеризующей линейный тренд спектра. Разработанная методика позволяет в автоматическом режиме осуществлять выбор временных интервалов для осуществления исследований эластомеров с использованием методов акустической спектрометрии и сигналов типа «белый шум», обеспечивающих равномерность распределения спектральных составляющих по всему диапазону действующих частот. Рассмотренный подход повышает воспроизводимость и достоверность результатов при исследовании свойств эластомеров методами акустической спектрометрии.

Summary. In article the problem of choice of an optimum time interval and a quantization step at measurement of spectral characteristics of objects with using «white noise» signal with restrictions by technical possibilities of signal registration is considered. In the application of "white noise" as a stationary perturbing signal problems arise with the presence of distortions in the frequency spectrum due to the limited resolution of the digital recording device. When used in experimental studies of digital technology there is the possibility of distortion due to restrictions on the time signal "white noise" for a fixed number of points of the signal due to limited recording memory oscilloscope. For small time intervals distortion occurs in the low frequency region of the spectrum and at large intervals signal is distorted in the high-frequency area due to the lower sampling rate and, accordingly, the loss of information. To minimize distortions in the spectrum of the emitted signal it is proposed selection algorithm of the time window signal type "white noise" fixed (in the sense of the amount of sampling points) in terms of sample tasks for acoustic spectrometry based on the estimation of parameters of a linear function that approximates the spectrum and characterizing the linear trend.

Ключевые слова: белый шум, спектр, временной интервал, шаг квантования.

Keywords: white noise spectrum, time interval, quantization step.

© Хвостов А.А., Тихомиров С.Г., Ребриков Д.И., Никитченко А.А., 2014

Одним из эффективных приложений акустической спектрометрии является её использование для оценки распределений вязкоупругих свойств полимеров и композитов на их основе для оценки показателей качества [1]. Однако при применении в качестве возмущающего сигнала стационарного «белого шума» возникают проблемы с наличием искажений в частотном спектре из-за ограниченности разрешающей способности цифрового регистрирующего устройства. При использовании в экспериментальных исследованиях цифровой техники возникает вероятность искажений из-за ограничений на время сигнала «белого шума» при фиксированном количестве точек сигнала в связи с ограничением памяти регистратора осциллографа. При малых интервалах времени возникают искажения в низкочастотной области спектра, а при больших сигнал искажается в высокочастотной области ввиду снижения частоты дискретизации и, соответственно, потери информации.

Для минимизации искажений в спектре излученного сигнала предлагается алгоритм выбора временного окна сигнала типа «белый шум» фиксированного (в смысле количества точек дискретизации) объема выборки для задач акустической спектрометрии на основе оценки параметров линейной функции, аппроксимирующей спектр и характеризующей линейный тренд спектра.

Действие алгоритма разбивается на ряд последовательных этапов: получение тестовых спектров на основе излучающих сигналов разной длительности; линейная аппроксимация функции спектра; анализ параметров аппроксимирующей функции и выбор множества временных окон, удовлетворяющих заданному критерию качества.

На первом этапе необходимо получить набор спектров сигнала «белый шум» с разными интервалами времени подачи сигнала. Это позволяет сформировать множество пар спектральных составляющих f и частот ω для каждого i -го интервала времени:

$$\{(f, \omega)_i \in (F \times \Omega)_i\}, i = 1, Kt, \quad (1)$$

где F - множество значений, Ω - множество области определения, Kt - количество интервалов времени.

Для получения спектра используется разложение принимаемой функции времени $S(t)$ в спектр $f(\omega)$ на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье [2] в пакете Mathcad 15 [3]:

$$f_m = \sum_{j=0}^{n-1} S_j \varepsilon^{mj}, \varepsilon^n = 1, \varepsilon^k \neq 1, \quad (2)$$

где f_m - значения дискретного спектра, $m \in \mathbb{N}$; S_j - значения дискретного сигнала, $j \in \mathbb{N}$.
 $t_j = j\Delta t$ $\omega_m = m\Delta\omega$.

Для каждого набора пар значений $(f, \omega)_i$, представляющего спектр сигнала, находится аппроксимирующая линейная функция вида:

$$F_{\text{linfit}}(\omega)_i = L_{1,i}\omega + L_{2,i}, \quad (3)$$

где $L_1, L_2 \in \mathbb{R}$ - параметры i -ого спектра сигнала.

Оценки параметров $L_{1,i}$ находятся, исходя из критерия:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (f_j^{\text{эксн}} - f_j^{\text{анп}})^2 \xrightarrow{L_1, L_2} \min \quad (4)$$

И могут использоваться для косвенной характеристики равномерности спектральных составляющих в исследуемом частотном диапазоне (рисунок 1).

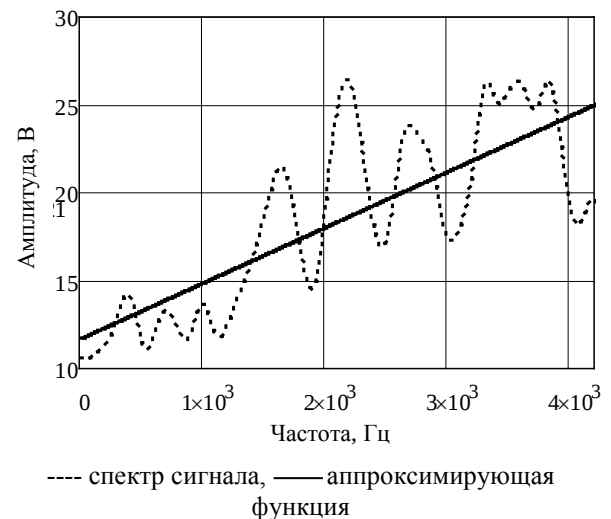


Рисунок 1. Пример аппроксимации спектра сигнала.

Они позволяют получить пары значений параметра линейной аппроксимации спектра $L_{1,i}$ и соответствующего ему интервала времени для i -го спектра.

Для оценки равномерности спектра используется мера близости области значений параметра линейной аппроксимации спектра $L_{1,i}$ (тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой) к заданной окрестности около нулевого значения. Можно приближенно считать, что все удовлетворяющие условию близости параметра $L_{1,i}$ к нулевому значению диапазоны времени регистрации сигнала спектры могут

считаться равномерными и пригодными для дальнейших исследований в задачах акустической спектрометрии, а соответствующие временные диапазоны принять рабочими:

$$\Delta t_i \in \Delta t_{\text{раб}}, \forall |L_{1,i}| \leq \varepsilon \quad (5)$$

Алгоритм определения временного интервала воздействия сигнала «белый шум» представляется блок-схемой (рисунок 2).

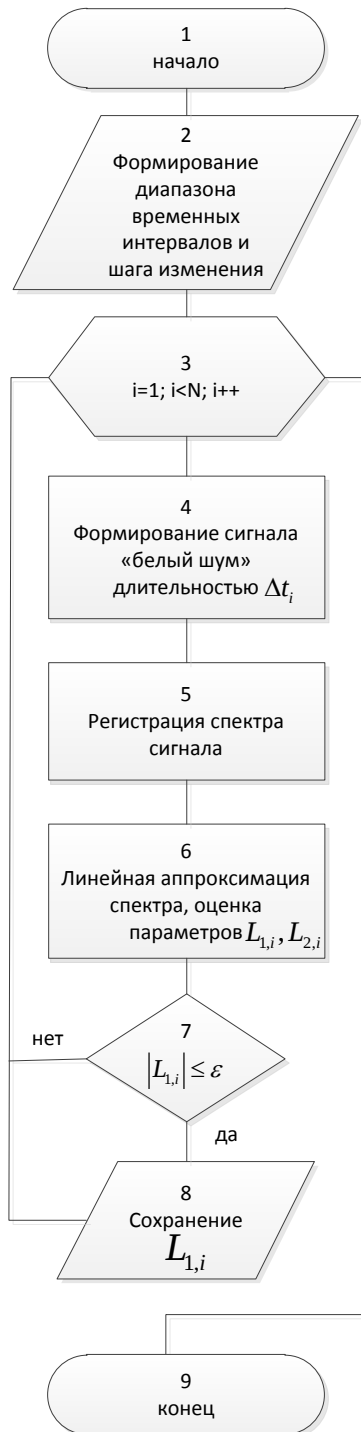


Рисунок 2. Алгоритм поиска времени воздействия сигнала «белый шум».

Рассмотрим пример использования предлагаемого алгоритма поиска времени воздействия «белого шума» для исследования свойств эластомеров с использованием цифрового генератора НЮКИ 7076, регистрирующего цифрового осциллографа RIGOL DS 1102 и пьезоэлектрических ультразвуковых преобразователей П-112-0.6 с рабочей частотой 0,6 МГц.

Для исследования выбирался диапазон временных интервалов от $1 \cdot 10^{-3}$ до 200 мс при фиксированной максимальной разрешающей способности регистратора 800 точек. Далее, в соответствии с алгоритмом на рисунке 2, осуществлялось генерирование сигнала «белый шум» с заданной длительностью, происходила регистрация спектра излученного сигнала, осуществлялась линейная аппроксимация спектра и происходило запоминание параметров аппроксимации. После этого формировалось множество пар параметра $L_{1,i}$ линейной функции аппроксимации спектра и значения временного интервала Δt_i для каждого i -го интервала времени. На рисунке 3 представлена зависимость параметра линейно аппроксимирующей i -й спектр функции $L_{1,i}$ от временного интервала воздействия сигнала «белый шум» Δt_i , мс.

Из представленных на рисунке 3 данных хорошо видно, что весь диапазон временных интервалов, в течение которых подавался сигнал «белый шум» можно разделить на три отчетливо различающихся интервала по критерию близости области значений параметра линейной аппроксимации спектра $L_{1,i}$ к заданной окрестности около нулевого значения.

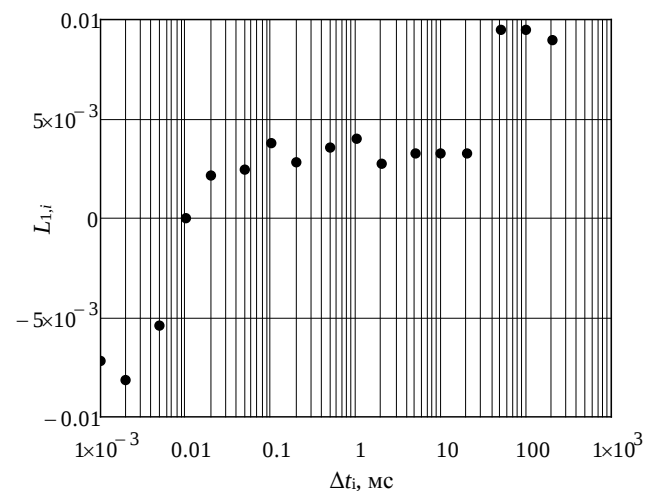


Рисунок 3. зависимость параметра линейно аппроксимирующей i -й спектр функции от временного интервала воздействия сигнала «белый шум».

В области малых (от 0,001 до 0,01 мс) и больших (от 25 до 100 мс) значений временных интервалов, вследствие ощутимых искажений из-за недостаточной длины интервала и ограничения объема выборки искажения, видны сильные отклонения от окрестности около нулевого значения $\pm \varepsilon$. Таким образом, используя предложенный алгоритм и критерий (3), можно осуществлять классификацию спектров сигналов типа «белый шум» и выбирать обоснованный диапазон интервалов воздействия

сигнала в условиях ограниченной разрешающей способности приемника в задачах акустической спектрометрии эластомеров. На рисунке 4 представлены спектры, зафиксированные при генерировании сигнала «белый шум», преобразовании его в акустический сигнал с использованием пьезоэлектрического преобразователя П-112-0.6, обратного преобразования в электрический сигнал с помощью пьезоэлектрического преобразователя и регистрации цифровым осциллографом RIGOL DS 1102.

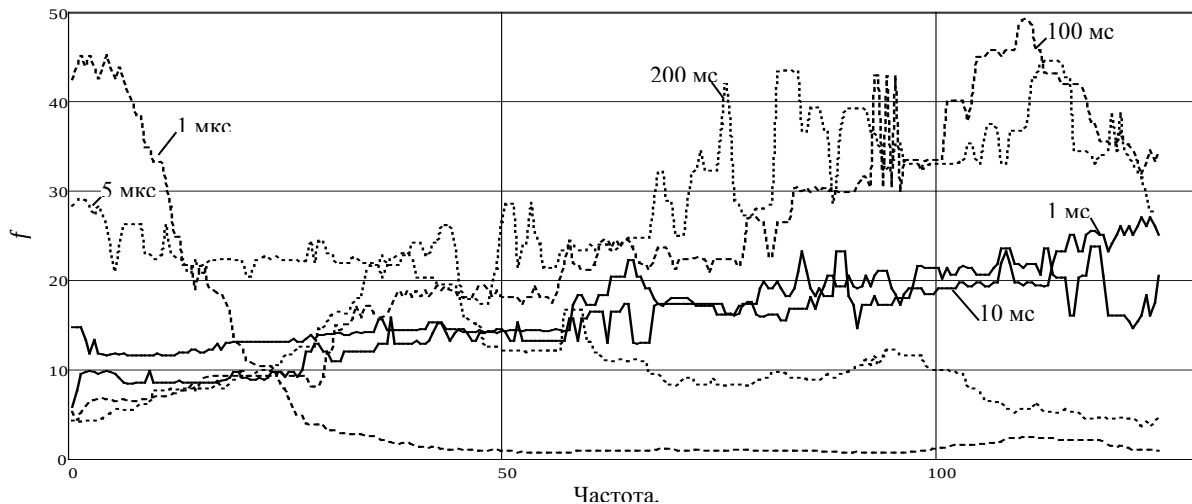


Рисунок 4. Излученные спектры сигнала «белый шум» с различным временем регистрации.

Из представленных данных видно, что спектры, отобранные из множества имеющихся в соответствии с критерием (4) (1 мс и 10 мс) обладают минимальным линейным трендом и размахом по амплитуде в пределах всего рассмотренного частотного диапазона.

На рисунке 5 представлены спектры сигналов, пропущенных через образец резины на основе каучука СКД толщиной 2 мм при описанных выше условиях. В практическом плане использование при исследованиях

свойств резин методов акустической спектрометрии позволяет выявить зоны в частотном диапазоне измерений, наиболее чувствительные к изменениям свойств полимера [4]. Из рисунка 5 видно, что спектры сигнала «белый шум», прошедшего через исследуемый образец, соответствующие критерию (3) (выделены жирным на рисунке 5) также обладают минимальным линейным трендом и размахом по амплитуде в пределах всего рассмотренного частотного диапазона.

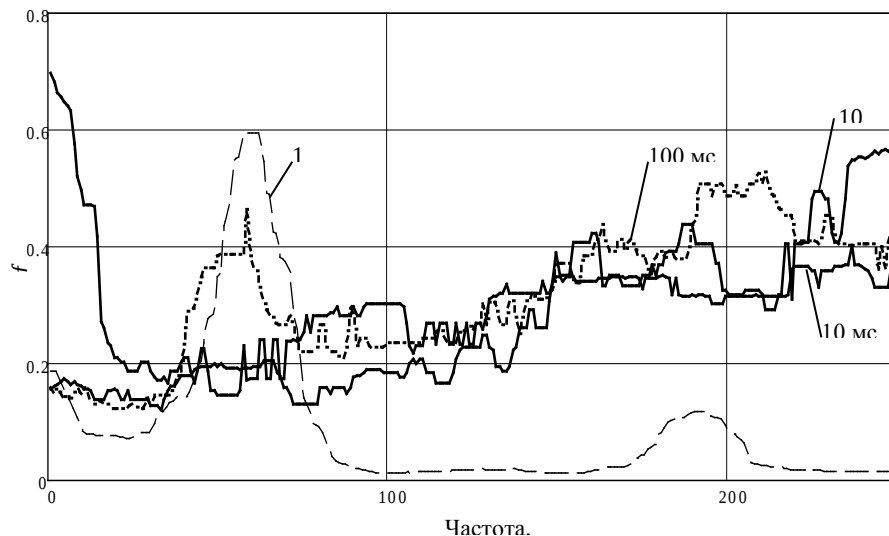


Рисунок 5. Принятые спектры сигнала «белый шум» с различным временем регистрации.

Таким образом, разработанная методика позволяет в автоматическом режиме осуществлять выбор временных интервалов для осуществления исследований эластомеров с использованием методов акустической спектрометрии и сигналов типа «белый шум», обеспечивающих

равномерность распределения спектральных составляющих по всему диапазону задействованных частот. Рассмотренный подход повышает воспроизводимость и достоверность результатов при исследовании свойств эластомеров методами акустической спектрометрии.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы приложения. СПб.: Профессия, 2007. 500 с.
- 2 Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. 316 с.
- 3 Дьяконов В. Mathcad 2001: учебный курс. СПб: Питер, 2001. 621 с.
- 4 Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хвостов А.А., Зайчиков М.А. Оценка показателей качества полимера по частотному спектру модуля упругости // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 1(31). С. 124-126.
- 5 Honerkamp J., Roths T., Maier D., Friedrich C. et al. Determination of the relaxation time spectrum from dynamic moduli using an edge preserving regularization method. *Rheologica Acta*, 2000, vol. 3, no. 2, pp. 163-173.

REFERENCES

- 1 Malkin A.Ia., Isaev A.I. *Reologiya: kontseptsii, metody prilozheniya* [Rheology: concepts, application methods]. Sent-Petersburg, Professiya, 2007. 500 p. (In Russ.).
- 2 Dzhenskii G., Vatts D. *Spektralnyi analiz i ego prilozheniya* [Spectral analysis and its applications]. Moscow, Mir, 1971. 316 p. (In Russ.).
- 3 D'iakonov V. *Mathcad 2001* [Mathcad 2001]. Sent-Petersburg, Piter, 2001. 621 p. (In Russ.).
- 4 Bitiukov V.K., Tikhomirov S.G., Khvostov A.A., Zaichikov M.A. Estimation of polymer quality parameters with frequency spectra of strength module. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*. [Control systems and Information technology], 2008, no. (31), pp. 124-126. (In Russ.).
- 5 Honerkamp J., Roths T., Maier D., Friedrich C. et al. Determination of the relaxation time spectrum from dynamic moduli using an edge preserving regularization method. *Rheologica Acta*, 2000, vol. 3, no. 2, pp. 163-173.