

УДК 004.67: 681.518.2: 681.2.088

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2219-380415201686303>С. В. Шантырь¹, доцент, к. т. н., А. С. Шантырь² доцент, к. т. н.

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИ СТРУКТУРНОМ АНАЛИЗЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА

En

It was shown experimentally that the digital processing implementation of the infinite random sequence a priori known signal structure of limited duration, its classification signs disappear.

In theory, it is proved that for the recovery of the classification characteristic in the signal spectrum it is necessary to limit the volume of the sample to a level commensurate with the duration of the signal structure. The numerical simulation results confirming the validity of the provisions were proved. It is shown experimentally that the proven provision is applicable for identifying classifications in structural analysis of the signal structure vibration measurement signal of a rotary machine.

Proven provisions allow: implement a selection signal design structures according to their time-frequency characteristics by forming conformed the relevant structures of measuring channels; determine parameters, modes, and the amount of information that can provide solutions for measuring channel monitoring and diagnostic applications.

Ua

Експериментально показано, що при цифровій обробці нескінченної реалізації випадкової послідовності апріорно відомої сигнальної конструкції обмеженої тривалості, її класифікаційні ознаки зникають.

Теоретично доказано, що для відтворення класифікаційної ознаки в спектрі сигналу необхідно обмежити об'єм вибірки до величини, порівняної з тривалістю сигнальної конструкції. Наведені результати чисельного моделювання, які підтверджують справедливність доказаного положення. Експериментально показано, що доказане положення може бути застосовано для виявлення класифікаційних ознак при структурному аналізі сигнальної конструкції вібровимірювального сигналу роторної машини.

Доказані положення дозволяють: реалізувати селекцію структур сигнальної конструкції по їх частотно-часовим характеристикам, шляхом формування, узгоджених з відповідними структурами, вимірювальних каналів; визначати параметри, режими роботи і об'єм інформації, яку може дати вимірювальний канал для рішення задач моніторингу і діагностики.

Введение

Измерительный сигнал на входе синтезируемого средства измерения в общем случае можно представить в виде

¹ Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра інформаційно-вимірювальної техніки

² Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра автоматизації експериментальних досліджень

$$w(t) = s(t; p_1, \dots, p_m) + n(t), \quad (1)$$

где $s(t; p_1, \dots, p_m)$ – составляющая измерительного сигнала, несущая полезную измерительную информацию об объекте измерений; $n(t)$ – неинформативная составляющая измерительного сигнала (шум, помеха).

В данном случае измерительный сигнал имеет ряд случайных параметров p_1, \dots, p_m , формирующих его структуру. Эта структура имеет прямую зависимость с законом поведения объекта, который в свою очередь, связан с техническими характеристиками самого объекта, собственными параметрами элементов его конструкции, режимов работы, условий эксплуатации [1]. Априорная информация об измерительном сигнале не может быть полной даже в статистическом смысле, то есть не могут быть априорно полностью известными даже законы распределения некоторых случайных параметров. Такое положение оказывает негативное влияние на процесс синтеза средства измерений, предназначенного для исследуемого или обслуживаемого объекта. Выявленные при анализе структурные свойства измерительного сигнала могут содержать существенную дополнительную априорную информацию и, следовательно, желательно учитывать эту априорную информацию для повышения качества процесса синтеза средства измерения.

Постановка задачи

Исследование структурных свойств измерительного сигнала во временном и частотном представлении с целью оптимизации длительности реализации для обеспечения возможности выявления классификационных признаков при структурном анализе сигнальной конструкции.

Структурное представление измерительного сигнала

Основные структурные составляющие измерительного сигнала (1), в общем случае, образуют ограниченное множество вида

$$\{S_l(P_m)\}_L = \{S_1(t, P_1), S_2(t, P_2), \dots, \chi\}_L, \quad (2)$$

где $S_1(t, P_1), S_2(t, P_2), \dots$ – структуры, связанные с параметрами P_1, P_2, \dots , соответственно;

χ – нерегулярная составляющая (шум);

l – порядковый номер сигнальной структуры;

L – общее число сигнальных структур.

Примем, что интервал времени существования каждой из структур ограничен, $t \in [t_l, t_l + T_l)$, и на интервале существования структура нормирована

$$\frac{1}{T_l} \int_{T_l} S_l^2(t, P_m) dt = 1. \quad (3)$$

На произвольном отрезке времени измерительный сигнал представляет совокупность основных структур, связанных с параметрами P_m , возбуждаемых со случайной амплитудой и в случайной последовательности

$$w(t, P_m) = \sum_l \sum_k A_k^l S_l(t - t_k^l, P_m) + \chi, \quad (4)$$

где A_k^l – случайный множитель l -ой структуры измерительного сигнала;

t_k^l – случайный момент времени возбуждения l -ой структуры измерительного сигнала.

Для удобства последующего исследования выражения (4), выделим совокупности, образованные каждой структурной составляющей

$$S_l(t, P_m) = \sum_k A_k^l S_l(t - t_k^l, P_m), \quad t \in T_l. \quad (5)$$

Тогда измерительный сигнал (4) примет вид

$$w(t, P_m) = \sum_l S_l(t, P_m) + \chi. \quad (6)$$

Исследование структурных свойств измерительного сигнала во временном и частотном представлении

Установим соответствие между спектральными и временными характеристиками [2] для каждой l -ой совокупности (5) структурных составляющих измерительного сигнала

$$S_l(t, P_m) = \int_{\Omega} G_l(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (7)$$

$$G_l(\omega) = \int_{T_{obs}} S_l(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (8)$$

где Ω – интервал наблюдения спектра измерительного сигнала в частотной области;

T_{obs} – интервал наблюдения измерительного сигнала во временной области ($T_{obs} \gg T_l$).

Выполним интегральное преобразование (8) с учетом (5)

$$G_l(\omega) = \int_{T_{obs}} \sum_k A_k^l S_l(t - t_k^l, P_m) e^{-j\omega t} dt. \quad (9)$$

Изменив порядок интегрирования и суммирования в (9), получим

$$G_l(\omega) = \sum_k A_k^l \int_{T_{obs}} S_l(t - t_k^l, P_m) e^{-j\omega t} dt. \quad (10)$$

Интегрирование в (10) выполним отдельно

$$g_k^l(\omega) = \int_{T_{obs}} S_l(t - t_k^l, P_m) e^{-j\omega t} dt. \quad (11)$$

Для этого введем новую переменную $t' = t - t_k^l$, тогда

$$g_k^l(\omega) = e^{-j\omega t_k^l} \int_{T_{obs}} S_l(t', P_m) e^{-j\omega t'} dt' = e^{-j\omega t_k^l} g_l(\omega). \quad (12)$$

Подставив (12) в (10), получаем

$$G_l(\omega) = g_l(\omega) \sum_k A_k^l e^{-j\omega t_k^l}. \quad (13)$$

Из (13) видно, что каждой структурной составляющей измерительного сигнала соответствует спектральная структура в виде произведения спектра парциальной структуры

$$g_l(\omega) = \int_{T_l} S_l(t, P_m) e^{-j\omega t} dt \quad (14)$$

и обобщенного множителя случайной последовательности $\{A_k, t_k\}_l$

$$G_l(\omega) = \sum_k A_k^l e^{-j\omega t_k^l}, \quad (15)$$

С учетом выражений (14) и (15) спектральная характеристика каждой случайной последовательности l -ой структурной составляющей (8) принимает вид

$$G_k^l(\omega) = g_l(\omega) \cdot G_l(\omega). \quad (16)$$

Сравнив соотношения (9) и (16) видим, что первый множитель зависит от времени существования структурной составляющей (T_l), а второй – от времени наблюдения вибросигнала (T_{obs}).

Для характеристики вида обобщенного множителя случайной последовательности (15) воспользуемся его автокорреляционной функцией в частотной области

$$R_l(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} G_l(\omega) G_l(\omega + \Omega) d\omega. \quad (17)$$

Подставив (15) в (17) и изменив последовательность интегрирования и суммирования, получим

$$R_l(\Omega) = \sum_k \sum_{k'} A_k^l A_{k'}^l \times \int_{-\infty}^{\infty} e^{j[(\omega+\Omega)t_k^l - \omega t_{k'}^l]} d\omega. \quad (18)$$

Интеграл в (18) найдем отдельно, при этом учтем, что реально спектр измерительного сигнала ограничен $\left(-\frac{\Pi}{2} < \omega < \frac{\Pi}{2}\right)$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{j[(\omega+\Omega)t_k^l - \omega t_{k'}^l]} d\omega \cong e^{j\Omega t_k^l} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega(t_k^l - t_{k'}^l)} d\omega = e^{j\Omega t_k^l} \Pi \frac{\sin \Pi(t_k^l - t_{k'}^l)}{\Pi(t_k^l - t_{k'}^l)}. \quad (19)$$

Поскольку для структуры измерительного сигнала с парциальными составляющими характерно $\Pi(t_{k'}^l - t_k^l) \gg 1$, то

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{j[(\omega+\Omega)t_k^l - \omega t_{k'}^l]} d\omega \cong \begin{cases} 1, & \text{если } t_{k'}^l = t_k^l \\ 0, & \text{если } t_{k'}^l \neq t_k^l \end{cases}.$$

Тогда

$$R_l(\Omega) = \sum_k (A_k^l)^2 e^{j\Omega t_k^l}, \quad k \in K_l. \quad (20)$$

Исследование вида (20) показывает, что с увеличением числа элементов составляющих реализацию измерительного сигнала K_l , ширина главного лепестка автокорреляционной функции спектра уменьшается. Таким образом, увеличение числа парциальных элементов в структуре измерительного сигнала приводит к повышению изрезанности спектра, совершенно не зависящей от самой парциальной структуры. Тогда следует, что длительность реализации должна быть согласована с длительностью структурной составляющей T_l измерительного сигнала.

Результаты моделирования при исследовании виброизмерительных сигналов роторных машин

Априорно известно [1], что основные структурные составляющие виброизмерительного сигнала (ВС) образуют ограниченное множество вида

$$\{S_l(P_m)\}_L = \{S_p(F_{rot}), S_i(P_{des}), S_j(P_{steam}), S_k(P_{load}), \chi\}_L,$$

где $S_p(F_{rot})$ – структуры, связанная с частотой вращения ротора;

$S_i(P_{des})$ - структуры, связанная с собственными параметрами элементов конструкции;

$S_j(P_{steam})$ - структуры, связанные с параметрами рабочего вещества (пара);

$S_k(P_{load})$ - структуры, связанные с параметрами нагрузки; χ - нерегулярная составляющая (виброшум);

L - общее число сигнальных структур.

Интервал времени существования каждой структуры ограничен $t \in [t_l, t_l + T_l)$, и на интервале существования структура нормирована, что соответствует (3).

На рис. 1 представлена временная реализация и спектр модели виброизмерительного сигнала как суммы двух структурных составляющих в виде парциальных гармонических сигналов 1 и 2, удовлетворяющих приведенным выше условиям

$$w(t, P_m) = S_1(t_1, P) + S_2(t_2, P).$$

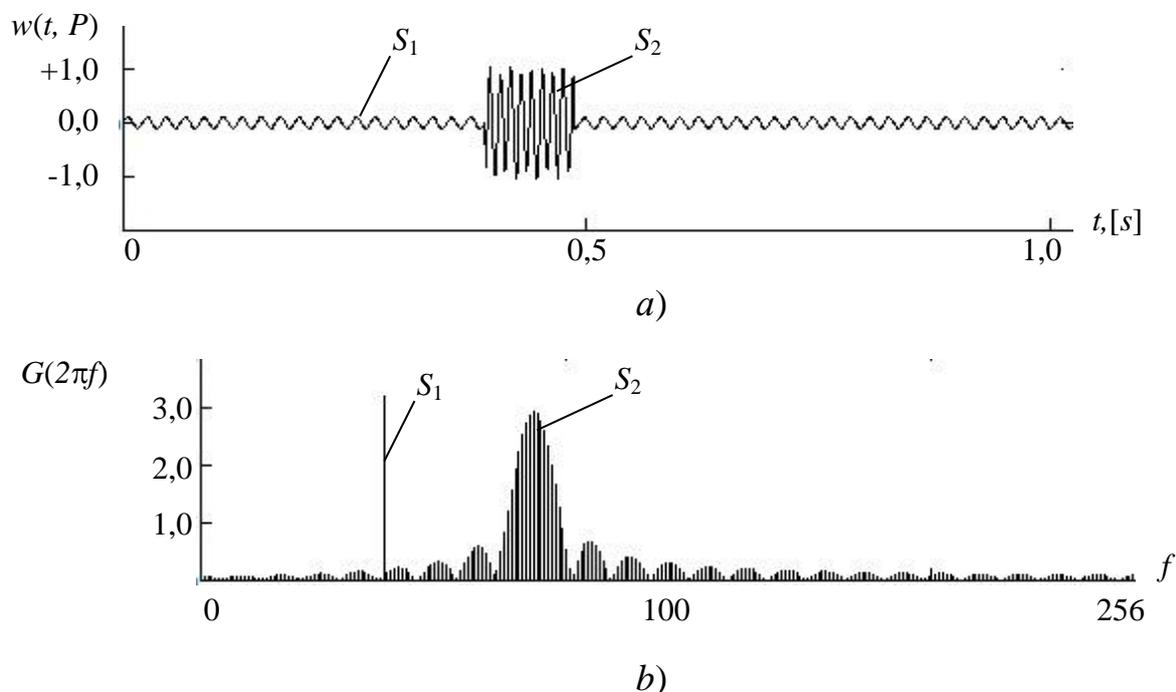


Рис. 1. Модель двух парциальных гармонических сигналов:
а) – временная реализация; б) – спектр

Анализ спектра (рис. 1, б) данной модели виброизмерительного сигнала позволяет определить первую структурную составляющую до параметров, так как ее длительность, в данной модели, согласована с длительностью реализации, в то время, как для второй структурной составляющей анализ спектра позволит определить лишь наличие структуры.

На рис. 2, а показана конструкция из L структурных составляющих. Во временном представлении у каждой l -той структурной составляющей случайный момент времени возбуждения t_k^l и случайный множитель A_k^l . Структурная конструкция модели данного виброизмерительного сигнала характеризуется следующими соотношениями: длительность парциальной

структуры τ_0 ; время запаздывания парциальной структуры $t_k^l = \tau_0 \cdot k$, где ($k = 1, 2, \dots$); длительность реализации выборочных значений $T = \tau_0 \cdot L$, где L - число парциальных структур (для данной модели $L = 11$). Интервалы времени существования каждой структуры ограничены и выполняются приведенные выше условия нормировки.

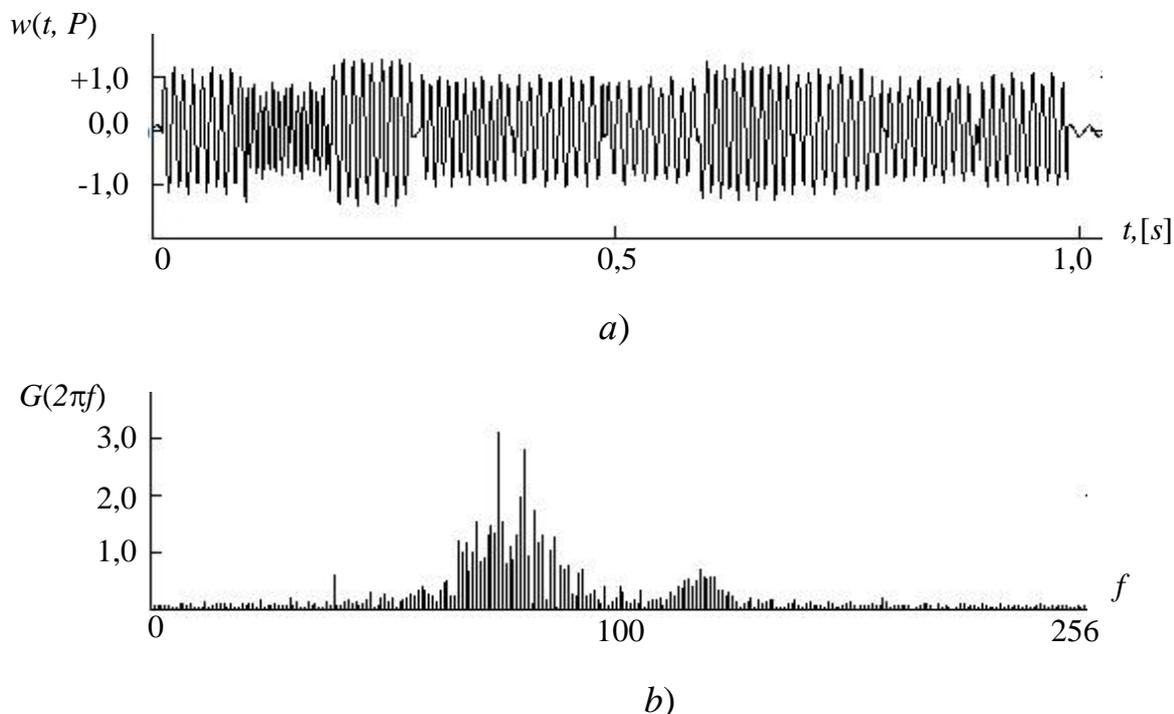


Рис. 2. Модель виброизмерительного сигнала ($L = 11$): *a*) – временная реализация; *b*) – спектр

Анализ спектра модели сигнала (рис. 2, а), представленный на рис. 2, б, подтверждает проведенное выше доказательство того, что увеличение числа парциальных элементов в структуре измерительного сигнала приводит к повышению изрезанности спектра, совершенно не зависящей от самой парциальной структуры и потере классификационных признаков.

Выводы

Экспериментально показано, что при цифровой обработке бесконечной реализации априорно известной сигнальной конструкции ограниченной длительности, ее классификационные признаки исчезают.

Теоретически доказано, что для восстановления классификационного признака в спектре сигнала необходимо ограничить объем выборки до величины, соизмеримой с длительностью сигнальной конструкции. Приведены результаты численного моделирования, подтверждающие справедливость доказанного положения.

Експериментально показано, что доказанное положение применимо для выявления классификационных признаков при структурном анализе сигнальной конструкции виброизмерительного сигнала роторной машины.

Доказанные положения позволяют: реализовать селекцию структур сигнальной конструкции по их частотно-временным характеристикам, путем формирования, согласованных с соответствующими структурами, измерительных каналов; определить параметры, режимы работы и объем информации, которую может дать измерительный канал для решения задач мониторинга и диагностики.

Список использованной литературы

1. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т./[ред. совет: В. Н. Челомей (пред.)] - М.: Машиностроение, 1981-. Т. 5. Измерения и испытания. - Под ред. М. Д. Генкина - 1981. - 496 с.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 540 с.