

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЙ ПРИ ПОМОЩИ СПЕКТРАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ НА УЗЛАХ ЧЕБЫШЕВА

Д.С. Герасименко

Северо-Кавказский федеральный университет. Ставрополь

Неразрушающий контроль является одним из самых перспективных методов мониторинга состояния технических объектов, так как он позволяет производить диагностику в реальном времени без прерывания работы механизмов. К одной из самых эффективных разновидностей неразрушающего контроля относится вибродиагностика. Отслеживая вибрации, проходящие через диагностируемый объект можно построить диаграммы, отображающие его состояние. Ранее установлено что о наличии дефекта говорит присутствие хаотических колебаний, для обнаружения которых используются диаграммы отображающие зависимости между смещением скоростью и ускорением. Отслеживание этих величин по отдельности является достаточно ресурсозатратным процессом, поэтому скорость и ускорение рационально вычислять путем дифференцирования, при этом достаточно знать только смещение. Известно, что классический метод дифференцирования не обеспечивает точность необходимую для отыскания хаотических колебаний. Поэтому для данной задачи целесообразно использовать спектральные методы, обеспечивающие стандарт двойной арифметической точности. Однако данные методы применимы только к периодическим функциям, а случае, например, систем с затухающими колебаниями дают некорректный результат. Выходом может послужить использование спектрального метода дифференцирования на узлах Чебышева. В основе метода лежит дифференцирование при помощи преобразования Фурье. Дискретность данных дает возможность использования быстрого преобразования Фурье, являющегося хорошо проработанным и многократно реализованным на ЭВМ инструментом. Вычисления в приведенном методе осуществляются в основном с матрицами в следствии чего для проведения эксперимента был выбран пакет MatLab, что позволило в добавок создать приложение с оконным интерфейсом. Целью практической части этой статьи является демонстрация возможности построения диаграмм состояний при помощи спектрального метода дифференцирования на Чебышевских узлах.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, вибродиагностика, спектральное дифференцирование, преобразование Фурье, численные методы.

Технологии неразрушающего контроля, основанные на вибродиагностике эффективны для мониторинга состояния технических объектов благодаря возможности осуществления контроля в реальном времени. В последнее десятилетие было разработано и применено в различных технических отраслях множество методов оценки состояния технических объектов [1, 2, 3, 4]. Классические методы идентифицируют повреждение, обнаруживая сдвиг частоты или иные особенности, вызванные дефектами. В исследованиях [5, 6], была предложена оценка на основе сдвига частоты, позволяющая эффективно обеспечить индикацию ущерба. Подход [5] сосредоточен на задаче поиска частоты в базе данных путем оптимизации, а в [6], был описан новый метод оценки частоты для двумерных структур поврежденных. В работе [7] вышеупомянутая проблема исследована с другой стороны, в результате чего были обнаружены гармонические компоненты, связанные с нелинейным эффектом в спектре Фурье. Помимо сдвига частоты, широко используется форма колебаний, особенно для локализации повреждений.

Исходя из того, что наличие повреждений можно определить по нелинейному эффекту в зарегистрированных сигналах [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Точнее говоря, нелинейный эффект может быть

обнаружен изменениями в пространствах состояний, определяемых смещением, скоростью и ускорением (производными произвольного порядка от измеряемых величин). Отображения Пуанкаре – мощный инструмент для описания характеристик в пространстве состояний. В работах [14, 15, 16, 17, 18] метод отображения Пуанкаре предложен Маноахом, Трендафиловой, Варминским для обнаружения повреждений. В последнее время метод применяется при обнаружении повреждений композитных конструкций [19]. Метод использует независимые измерения смещения, скорости и ускорения в качестве входных данных для построения пространства состояний, в котором предопределяется показатель повреждения на основе карты Пуанкаре. Этот метод является эффективным, однако, дорогостоящим, поскольку смещение, скорость и ускорение измеряются независимо.

На практике числовое дифференцирование и интегрирование широко используется в системах сбора данных, чтобы получить смещение, скорость или ускорение только из одного измерения. Однако неустойчивость классического численного метода вычисления производной влияет на помехоустойчивость метода. В работе [20] был предложен спектральный метод Фурье для построения

отображений Пуанкаре, с помощью которых можно обнаруживать повреждения.

МОДЕЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Несложным примером диагностируемого технического объекта может послужить пружинный маятник с двумя степенями свободы. Результирующее двух колебаний (x) с разными частотами (ω_1 и ω_2) определяется выражением [21]

$$x = A \sin(\omega_1 t + \phi_1) + B \sin(\omega_2 t + \phi), \quad (1)$$

Где A и B амплитуды и первого и второго грузов соответственно, ϕ_1 и ϕ_2 задают смещения, а ω_1 и ω_2 являются частотами колебаний грузов.

ОТОБРАЖЕНИЕ ДИАГРАММ

Для отображения диаграмм, характеризующих состояние технического объекта было предложено отображать графики зависимостей [20] скорости, смещения и ускорения. При этом ускорение и скорость рассчитывать через численное вычисление производной с помощью прямого (2) и обратного (3) преобразования Фурье для смещения [20].

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} w(t) dt, \quad (2)$$

$$w(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} W(\omega) d\omega, \quad (3)$$

Где $t \in R$ и $\omega \in R$. При помощи преобразования Фурье скорость (4) и ускорение (5) вычисляются как [20]:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{2\pi} j \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} \omega W(\omega) d\omega, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 w}{dt^2} = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} \omega^2 W(\omega) d\omega. \quad (5)$$

Где $W(\omega)$ определено в выражении (2). Для дискретного случая естественным выбором для вычисления скорости и ускорения является дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Предполагается, что $w(t)$ определено на интервале $[0, 2\pi]$, и этот интервал делится на N точек в результате чего получается сетка из N-1 ячеек длиной Δ . Обратное ДПФ, для уравнений (4) и (5) записываются как [20]:

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{\Delta}{2\pi} j \sum_{\omega} \omega e^{j\omega t} \left(\sum_t e^{-j\omega t} w(t) \right), \quad (6)$$

$$\frac{d^2 w}{dt^2} = -\frac{\Delta}{2\pi} \sum_{\omega} \omega^2 e^{j\omega t} \left(\sum_t e^{-j\omega t} w(t) \right), \quad (7)$$

На основании формул (6) и (7), скорость и ускорение могут быть рассчитаны непосредственно из смещения. Однако, приведенный выше метод вычисления работает хорошо работает для периодических функций, но дает серьезные погрешности в случаи неперiodических функций,

которые могут возникнуть ,например, в случае затухающих колебаний. Решением данной проблемы может послужить использование полиномов Чебышева. А в целях ускорения вычислений целесообразно воспользоваться быстрым преобразованием Фурье (БПФ).

СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ЧЕБЫШЕВА

В основе метода лежит взаимосвязь областей определения узлов Чебышева ($x \in [-1, 1]$), ряда Фурье ($\theta \in R$) и ряда Лорана (на единичной окружности). Визуализация этой взаимосвязи представлена на рисунке 1.

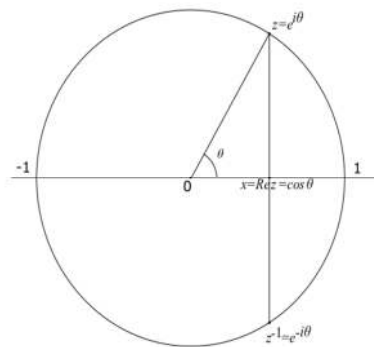


Рис. 1 – Отношения между x, z и θ

Пусть z – комплексное число на единичной окружности: $|z| = 1$, и θ является аргументом этого числа. θ является действительным числом, которое определяется с точностью до кратных 2π . Пусть, для каждого $x \in [-1; 1]$, есть два комплексных сопряженных значения z, на основании чего мы имеем [22]:

$$x = \text{Re } z = \frac{1}{2}(z + z^{-1}) = \cos \theta \in [-1, 1], \quad (8)$$

N-й полином Чебышева, обозначаемый T_n , определяется следующим выражением [22]

$$T_n(x) = \text{Re } z^n = \frac{1}{2}(z^n + z^{-n}) = \cos n\theta, \quad (9)$$

Для $n = 0, 1; 2$ и 3 имеем [22]:

$$\text{Re } z^0 = 1 \Rightarrow T_0(x) = 1$$

$$\text{Re } z^1 = \frac{1}{2} \Rightarrow T_1(x) = x$$

$$\text{Re } z^2 = \frac{1}{2}(z^2 + z^{-2}) = \frac{1}{2}(z^1 + z^{-1}) - 1 \Rightarrow T_2(x) = 2x^2 - 1$$

$$\operatorname{Re} z^3 = \frac{1}{2}(z^3 + z^{-3}) = \frac{1}{2}(z^1 + z^{-1})^3 - \frac{3}{2}(z + z^{-1}) \Rightarrow T_3(x) = 4x^3 - 3x$$

Общая запись полинома Чебышева имеет вид [22]

$$T_{n+1}(x) = \frac{1}{2}(z^{n+1} - z^{-n-1}) = \frac{1}{2}(z^n + z^{-n})(z + z^{-1}) - \frac{1}{2}(z^{n-1} + z^{1-n}) - \frac{1}{2}(z^{n-1} + z^{1-n})$$

и может быть выражена рекуррентным соотношением

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x), \quad (10)$$

Следует заметить, что T_n имеет степень n для всех $n \geq 0$, и старший коэффициент 2^{n-1} для всех $n \geq 1$. Рисунок 2 позволяет увидеть геометрическую интерпретацию.

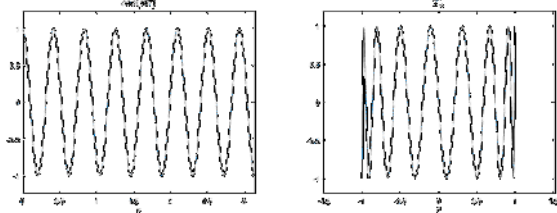


Рис. 2. – Геометрическая интерпретация полинома Чебышева

Многочлен Чебышева T_n можно интерпретировать как синусоидальную волну, "обернутую вокруг цилиндра и видимую сбоку".

Любой многочлен степени N может быть представлен как линейная комбинация многочленов Чебышева.

$$p(x) = \sum_{n=0}^N a_n T_n(x), \quad x \in [-1, 1], \quad (11)$$

Полином Лорана той же степени N по z и z^{-1} , является самодвойственным, что означает, что z^n и z^{-n} имеют равные коэффициенты:

$$p(z) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^N a_n (z^n + z^{-n}), \quad |z|=1, \quad (12)$$

Таким же соответствием обладает тригонометрический многочлен степени N с периодом 2π , то есть

$$P(\theta) = \sum_{n=0}^N a_n \cos n\theta, \quad \theta \in R, \quad (13)$$

Функции (11) – (13) эквивалентны в том смысле, что $p(x) = p(z) = P(\theta)$, когда x , z , и θ связаны, что показано на рисунке 1. Таким образом, из произвольной функции $f(x)$, определенной для $x \in [-1; 1]$, можно сформировать самодвойственную функцию $f(z)$, определенную на единичной окружности, и периодическую функцию $F(z)$, определенную на R :

$$f(z) = f\left(\frac{z + z^{-1}}{2}\right), \quad F(\theta) = f(\cos \theta), \quad (14)$$

Для методов спектрального совмещения работа, в основном, ведется с (12) – (14) и с интерполяционными полиномами функций $f(x)$, $f(z)$ и $F(z)$. Узлы интерполяции рассчитываются по формулам [22]:

$$\theta_j = j\pi / N$$

$$z_j = e^{i\theta_j}$$

$$x_j = \cos \theta_j = \operatorname{Re} z_j$$

где $0 \leq j \leq N$. Имеет место эквивалентность следующих интерполирующих функций:

- $P(\theta)$ интерполирует $F(\theta)$ (четные с периодом 2π) в равноотстоящих точках $\{\theta_j\}$;
- $p(z)$ интерполирует $f(z)$ на корнях объединения $\{z_j\}$.
- $p(x)$ интерполирует $f(x)$ (произвольно) на узлах Чебышева $\{x_j\}$

Вышеизложенное дает теоретическую базу алгоритма дискретного преобразования Фурье для спектрального дифференцирования Чебышева. Ключевым моментом является то, что интерполяционный полином q функции f можно дифференцировать путем нахождения тригонометрического интерполяционного полинома Q от F , дифференцирования в пространстве Фурье и преобразования обратно в вектор x . Для этого можно воспользоваться дискретным преобразованием Фурье.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ БПФ

Подобнее об использовании данного алгоритма можно узнать в [22]

– Данные v_0, \dots, v_N на узлах Чебышева $x_0 = 1, \dots, x_N = -1$, распространяются на вектор V длины $2N$ следующим образом $V_{2N-j} = v_j, j = 1; 2, \dots; N-1$.

– Используя БПФ, рассчитать

$$\hat{V}_k = \frac{\pi}{N} \sum_{j=1}^{2N} e^{-ik\theta_j} V_j, \quad k = -N + 1, \dots, N$$

– Определить $\hat{W}_k = ik \hat{v}$, кроме $\hat{W} = 0$.

– Вычислить производную тригонометрического интерполяционного полинома Q на равноотстоящих узлах при помощи обратного БПФ:

$$W_j = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-N+1}^N e^{ik\theta_j} \hat{W}_k, \quad j = 1, \dots, N-1.$$

– Вычислить производную алгебраического интерполяционного полинома q на внутренних точках сетки

$$w_j = -\frac{W_j}{\sqrt{1-x_j^2}}, \quad j = 1, \dots, N-1$$

– крайние точки вычисляются по специальным формулам

$$w_0 = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=0}^N n^2 \hat{v}_n, \quad w_N = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=0}^N (-1)^{n+1} n^2 \hat{v}_n.$$

Эти формулы можно объяснить следующим образом. Дается тригонометрическая функция расширенных данных $\{v_j\}$, позволяющая изменять обратное дискретное преобразование Фурье при произвольном θ . Используя коэффициент a_n , можно записать

$$P(\theta) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-N+1}^N e^{ik\theta} \hat{v}_k = \sum_{n=0}^N a_n \cos n\theta$$

Алгебраический интерполяционный полином по $\{v_j\}$ имеет вид $p(x) = P(\theta)$, где $x = \cos \theta$, а производная

$$q'(x) = \frac{Q'(\theta)}{dx/d\theta} = \frac{-\sum_{n=0}^N na_n \sin n\theta}{-\sin \theta} = \frac{\sum_{n=0}^N na_n \sin n\theta}{\sqrt{1-x^2}}$$

Что касается специальных формул для w_0 и w_N , значение $q'(x)$ определяются при $x = \pm 1$ по правилу Лопиталя, которое дает

$$q'(1) = \sum_{n=0}^N n^2 a_n,$$

$$q'(-1) = \sum_{n=0}^N (-1)^{n-1} n^2 a_n.$$

Обобщить метод для производных высоких порядков несложно. На этапе дифференцирования в пространстве Фурье выполняется умножение на $(ik)^v$, чтобы вычислить v -ую производную, и, если v нечетно, производится присваивание $\hat{W}_n = 0$. Во-вторых, необходимо рассчитать соответствующие множители для преобразования между производными на равноотстоящих узлах и на узлах Чебышева, то есть производные по переменным θ и x . Например, вторые производные связаны выражением

$$q''(x) = \frac{-x}{(1-x^2)^{3/2}} Q'(\theta) + \frac{1}{1-x^2} Q''(\theta) \quad (14)$$

Если W_j и $W_j^{(2)}$ – первая и вторая производные на сетке с равноотстоящими узлами соответственно, то вторая производная на сетке с узлами Чебышева

$$w_j^{(2)} = \frac{-x_j}{(1-x_j^2)^{3/2}} W_j + \frac{1}{1-x_j^2} W_j^{(2)}, \quad 1 \leq j \leq N-1$$

Здесь так же нужны специальные формулы необходимы для $j = 0$ и $j = N$.

Известно, что, когда комплексное БПФ применяется для дифференцирования вещественной

периодической функции, множитель два эффективности теряется. В вышеописанном методе, ситуация хуже, поскольку не только V вещественно, что означает, что \hat{V} тоже вещественно. Из-за этого под вопросом оказывается четверная точность, здесь правильным решением является использование дискретного косинусного преобразования (ДКП) вместо БПФ. Однако код ДКП включено лишь в поздние версии Matlab. В следующей программе, используется общий код FFT и несмотря на потерю эффективности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ

Для того чтобы показать возможность применение вышеизложенного метода для моделирования диаграмм состояния системы (1) в рамках работы над данной статьей была написана программа для пакета MatLab, позволяющая изменяя параметры математической модели наблюдать соответствующие диаграммы.

На рисунке 3 представлена графическая оболочка данной программы. Для изменения параметров в интерфейсе программы созданы соответствующие слайдеры.

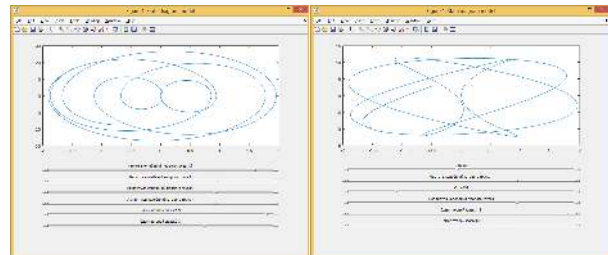


Рис. 3 – графический интерфейс программы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный с помощью пакета MatLab эксперимент показывает что высокоточный метод нахождения производной функции можно эффективно применять для построения диаграмм состояния технического объекта. В будущем планируется провести эксперимент с более сложными моделями, а так же добавить распознавание состояний по диаграмме.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yan, R. In-process modal parameter identification for spindle health monitoring / R. Yan, R.X. Gao, L. Zhang // Mechatronics. – 2015. – Т.31. – С.42–49.
2. Yan, R. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications / R. Yan, R.X. Gao, X. Chen // Signal processing. – 2014. – Т.96. – С.1–15.
3. Damage detection in beam-like composite structures via Chebyshev pseudo spectral modal curvature / Z.-B. Yang, M. Radzienski, P. Kudela, W. Ostachowicz // Composite Structures. – 2017. – Т.168. – С.1–12.
4. Two-dimensional Chebyshev pseudo spectral modal curvature and its application in damage detection for composite plates / Z.-B.

Yang, M. Radzienski, P. Kudela, W. Ostachowicz // Composite Structures. – 2017. – Т.168. – С.372–383.

5. Multivariable wavelet finite element-based vibration model for quantitative crack identification by using particle swarm optimization / X. Zhang, R.X. Gao, R. Yan [и др.] // Journal of Sound and Vibration. – 2016. – Т.375. – С.200–216.

6. A new method to detect cracks in plate-like structures with through-thickness cracks / J. Xiang, U. Nackenhorst, Y. Wang [и др.] // Smart Structures and Systems. – 2014. – Т.14, №3. – С.397–418.

7. Yan, R. Permutation entropy: A nonlinear statistical measure for status characterization of rotary machines / R. Yan, Y. Liu, R.X. Gao // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2012. – Т.29. – С.474–484.

8. Locating fatigue damage using temporal signal features of nonlinear Lamb waves / M. Hong, Z. Su, Y. Lu [и др.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2015. – Т.60. – С.182–197.

9. Acousto-ultrasonics-based fatigue damage characterization: Linear versus nonlinear signal features / Z. Su, C. Zhou, M. Hong [и др.] // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2014. – Т.45, №1. – С.225–239.

10. A new nonlinear dynamic model of the rotor-bearing system considering preload and varying contact angle of the bearing / X. Zhang, Q. Han, Z. Peng, F. Chu // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2015. – Т.22, №1-3. – С.821–841.

11. Application of parameterized time-frequency analysis on multicomponent frequency modulated signals / Y. Yang, Z. Peng, X. Dong [и др.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2014. – Т.63, №12. – С.3169–3180.

12. Connection between Volterra series and perturbation method in nonlinear systems analyses / X.-J. Dong, Z.-K. Peng, W.-M. Zhang, G. Meng // Acta Mechanica Sinica. – 2014. – Т.30, №4. – С.600–606.

13. Superiorities of variational mode decomposition over empirical mode decomposition particularly in time - frequency feature extraction and wind turbine condition monitoring / W. Yang, Z. Peng, K. Wei [и др.] // IET Renewable Power Generation. – 2016. – Т.11, №4. – С.443–452.

14. Vibration based damage detection in composite beams under temperature variations using Poincaré maps / E. Manoach, S. Samborski, A. Mitura, J. Warminski // International Journal of Mechanical Sciences. – 2012. – Т.62, №1. – С.120–132.

15. Trendafilova, I. Vibration-based damage detection in plates by using time series analysis / I. Trendafilova, E. Manoach // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2008. – Т.22, №5. – С.1092–1106.

16. Manoach, E. Large amplitude vibrations and damage detection of rectangular plates / E. Manoach, I. Trendafilova // Journal of Sound and Vibration. – 2008. – Т.315, №3. – С.591–606.

17. An investigation on damage detection in aircrafts panels using nonlinear time series analysis / I. Trendafilova, E. Manoach, M.P. Cartmell [и др.]: Key Engineering Materials, 2007. – С.213–218.

18. Dynamics of a composite Timoshenko beam with delamination / E. Manoach, J. Warminski, A. Mitura, S. Samborski // Mechanics Research Communications. – 2012. – Т.46. – С.47–53.

19. Numerical and experimental studies on vibration based methods for detection of damage in composite beams / E. Manoach, J. Warminski, L. Kloda, A. Teter // Composite Structures. – 2017. – Т.170. – С.26–39.

20. The Fourier spectral Poincare map method for damage detection via single type of measurement / Z.-B. Yang, Y.-N. Wang, H. Zuo [и др.] // Measurement. – 2018. – Т.113. – С.22–37.

21. Хорст, К. Справочник по физике / К. Хорст: Мир, 1982.

22. Trefethen, L.N. Spectral methods in MATLAB, volume 10 of Software, Environments, and Tools / L.N. Trefethen // Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, PA. – 2000. – Т.24.

Герасименко Дмитрий Сергеевич – специалист, эксплуатационно-технического отдела средств вычислительной техники, Северо-Кавказский федеральный университет, тел. 8(919)7394717, e-mail: Polimorfff@gmail.com.

MODELING OF DIAGRAMS OF STATES USING SPECTRAL DIFFERENTIATION AT CHEBYSHEVSKY NODES

D.S. Gerasimenko

NCFU, Stavropol

Nondestructive testing is one of the most promising methods for monitoring the state of technical objects, since it allows you to diagnose in real time without interrupting the operation of mechanisms. One of the most effective types of nondestructive testing is vibration-based diagnostics. By tracking the vibrations passing through the diagnosed object, you can build diagrams showing its state. It was previously established that the presence of a defect is indicated by the presence of chaotic oscillations, for the detection of which diagrams are used displaying the dependences between the displacement by speed and acceleration. Tracking these values separately is a fairly resource-consuming process, therefore, it is rational to calculate speed and acceleration by differentiation, and it is enough to know only the displacement. It is known that the classical method of differentiation does not provide the accuracy necessary for finding chaotic oscillations. Therefore, for this task, it is advisable to use spectral methods that provide a standard for double arithmetic accuracy. However, these methods are applicable only to periodic functions, and in the case of, for example, systems with damped oscillations, they give an incorrect result. The solution may be the use of the spectral method of differentiation at Chebyshev nodes. The method is based on differentiation using the Fourier transform. The discreteness of the data makes it possible to use the fast Fourier transform, which is a well-developed and repeatedly implemented computer tool. The calculations in the above method are carried out mainly with matrices, as a result of which the MatLab package was chosen for the experiment, which allowed in addition to create an application with a window interface. The purpose of the practical part of this article is to demonstrate the possibility of constructing state diagrams using the spectral method of differentiation at Chebyshev nodes.

Keywords: nondestructive check, vibration-based diagnostics, spectral differentiation, Fourier transform, numerical method.

REFERENCES

1. Yan, Ruqiang., Gao, Robert X., Zhang, Li, "In-process modal parameter identification for spindle health monitoring", *Mechatronics*, 31, 42–49, 2015.
2. Yan, Ruqiang., Gao, Robert X., Chen, Xuefeng, "Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications", *Signal processing*, 96, 1–15, 2014.
3. Yang, Zhi-Bo., Radzienski, Maciej., Kudela, Pawel., Ostachowicz, Wieslaw, "Damage detection in beam-like composite structures via Chebyshev pseudo spectral modal curvature", *Composite Structures*, 168, 1–12, 2017.
4. Yang, Zhi-Bo., Radzienski, Maciej., Kudela, Pawel., Ostachowicz, Wieslaw, "Two-dimensional Chebyshev pseudo spectral modal curvature and its application in damage detection for composite plates", *Composite Structures*, 168, 372–383, 2017.
5. Zhang, Xingwu., Gao, Robert X., Yan, Ruqiang., Chen, Xuefeng., Sun, Chuang., Yang, Zhibo, "Multivariable wavelet finite element-based vibration model for quantitative crack identification by using particle swarm optimization", *Journal of Sound and Vibration*, 375, 200–216, 2016.
6. Xiang, Jiawei., Nackenhorst, Udo., Wang, Yanxue., Jiang, Yongying., Gao, Haifeng., He, Yumin, "A new method to detect cracks in plate-like structures with through-thickness cracks", *Smart Structures and Systems*, 14, 3, 397–418, 2014.
7. Yan, Ruqiang., Liu, Yongbin., Gao, Robert X., "Permutation entropy: A nonlinear statistical measure for status characterization of rotary machines", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 29, 474–484, 2012.
8. Hong, Ming., Su, Zhongqing., Lu, Ye., Sohn, Hoon., Qing, Xinlin, "Locating fatigue damage using temporal signal features of nonlinear Lamb waves", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 60, 182–197, 2015.
9. Su, Zhongqing., Zhou, Chao., Hong, Ming., Cheng, Li., Wang, Qiang., Qing, Xinlin, "Acousto-ultrasonics-based fatigue damage characterization: Linear versus nonlinear signal features", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 45, 1, 225–239, 2014.
10. Zhang, Xuening., Han, Qinkai., Peng, Zhike., Chu, Fulei, "A new nonlinear dynamic model of the rotor-bearing system considering preload and varying contact angle of the bearing", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 22, 1-3, 821–841, 2015.
11. Yang, Yang., Peng, Zhike., Dong, Xingjian., Zhang, Wenming., Meng, Guang, "Application of parameterized time-frequency analysis on multicomponent frequency modulated signals", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63, 12, 3169–3180, 2014.
12. Dong, Xing-Jian., Peng, Zhi-Ke., Zhang, Wen-Ming., Meng, Guang, "Connection between Volterra series and perturbation method in nonlinear systems analyses", *Acta Mechanica Sinica*, 30, 4, 600–606, 2014.
13. Yang, Wenxian., Peng, Zhike., Wei, Kexiang., Shi, Pu., Tian, Wenye, "Superiorities of variational mode decomposition over empirical mode decomposition particularly in time - frequency feature extraction and wind turbine condition monitoring", *IET Renewable Power Generation*, 11, 4, 443–452, 2016.
14. Manoach, Emil., Samborski, Sylwester., Mitura, Andrzej., Warminski, Jerzy, "Vibration based damage detection in composite beams under temperature variations using Poincaré maps", *International Journal of Mechanical Sciences*, 62, 1, 120–132, 2012.
15. Trendafilova, Irina., Manoach, Emil, "Vibration-based damage detection in plates by using time series analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22, 5, 1092–1106, 2008.
16. Manoach, Emil., Trendafilova, Irina, "Large amplitude vibrations and damage detection of rectangular plates", *Journal of Sound and Vibration*, 315, 3, 591–606, 2008.
17. Trendafilova, Irina., Manoach, Emil., Cartmell, Matthew P., Ostachowicz, Wieslaw M., Zak, Arkadiusz, "An investigation on damage detection in aircrafts panels using nonlinear time series analysis", *Key Engineering Materials*, 347, 213–218, 2007.
18. Manoach, Emil., Warminski, Jerzy., Mitura, Andrzej., Samborski, Sylwester, "Dynamics of a composite Timoshenko beam with delamination", *Mechanics Research Communications*, 46, 47–53, 2012.
19. Manoach, Emil., Warminski, Jerzy., Kloda, Lukasz., Teter, Andrzej, "Numerical and experimental studies on vibration based methods for detection of damage in composite beams", *Composite Structures*, 170, 26–39, 2017.

20. Yang, Zhi-Bo., Wang, Ya-Nan., Zuo, Hao., Zhang, Xing-Wu., Xie, Yong., Chen, Xue-Feng, "The Fourier spectral Poincare map method for damage detection via single type of measurement", *Measurement*, 113, 22–37, 2018.

21 Horst, K., " *Physics reference*", Mir Publ, 1982.

22. Trefethen, L. N., "Spectral Methods in MATLAB", Philadelphia, USA, SIAM, 2000.

Gerasimenko Dmitry Sergeevich – specialist, maintenance and technical department of computer facilities of informatization management, North-Caucasus Federal University 8(919)7394717, e-mail: PoliMorf@gmail.com.