

УДК 534 (09)

**Субботович В. П., Угольников С. В., Бабкова Н. В., Ольховская О. Л.**

## **МЕТОДИКА И СИСТЕМА ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЛОЖНОГО СОСТАВА**

Изучение динамических процессов в физических системах является актуальной задачей. Особая роль среди этих процессов отводится периодическим и квазипериодическим (вибрациям). Это объясняется возникновением сверхрасчетных нагрузок при резонансах, длительных знакопеременных нагрузок способных резко снизить прочностной ресурс, формированию режимов эксплуатации отличных от расчетных и пр. Экспериментальное изучение периодических процессов затрудняется тем, что результат измерения представляет собой суперпозицию нескольких разнородных периодических составляющих и интенсивной шумовой (случайной) компоненты. Так же, этот процесс имеет сложный спектральный состав при относительно малой интенсивности низших гармоник и устойчив только в статистическом понимании. Выявление периодических процессов и определение их параметров требуют разработки и применения специальных методов анализа [1, 2, 3].

Для многих процессов, протекающих в физических системах, характерно присутствие периодических составляющих, особенностями которых являются: сложная форма огибающей, причем низшие гармоники могут быть слабо выражены; возможна суперпозиция процессов с разными основными частотами; параметры гармоник при статистической устойчивости заметно флюктуируют; имеется интенсивная шумовая составляющая. Запись такого процесса не имеет выраженной периодичности и выглядит как случайная функция времени. Анализ подобных процессов отличается сложностью.

Подобные процессы наблюдаются в механических системах (распространение вибро-возмущений в материале, взаимная вибрация элементов конструкции и пр.) в гидро-аэродинамических системах (распространение в пространстве неоднородных полей параметров, колебательное взаимодействие потока с упругими элементами механизмов и др.), а также в других физических системах [1, 2, 3, 4, 5]. При анализе этих процессов требуется выделить гармоники, относящиеся к одному периодическому процессу, определить их частоты и амплитуды, найти основную частоту, определить направление и скорость распространения колебательной составляющей, желателно выявить источник возникновения периодичности.

Поиск так называемых «скрытых периодичностей» может выполняться во временной области путем построения периодограмм или с помощью корреляционного анализа. Корреляционные функции могут применяться и при исследовании взаимосвязи периодических процессов. Однако результативность этих методов весьма мала, т. к. в первом случае надо априори знать или задать основной период искомого процесса, а второй дает, как правило, только качественную картину. Кроме того современные методы вычисления корреляционных функций основаны на спектральном разложении, что делает их вторичными по отношению к анализу в области частот [6, 7, 8].

Существенно более эффективным является перевод анализа из временной области в частотную, особенно с учетом прогресса в разработке цифровых методов быстрого преобразования Фурье. Важнейшее свойство частотного анализа, с точки зрения исследования процессов сложного состава, заключается в том, что появляется возможность каждую частотную составляющую рассматривать и анализировать независимо от остальных. Кроме того, переход в область частот делает возможным привлечение для исследования процессов методов анализа, основанных на использовании понятия частотной функции отклика, что позволяет установить наличие взаимосвязи как между отдельными частотными составляющими одного процесса, так и между компонентами различных процессов.

**Цель и задачи исследования.** Предлагается методика и сформированный на ее основе измерительно-информационный комплекс выявления в полигармоническом псевдослучайном сигнале взаимосвязанных гармонических составляющих формирующих единый статистически устойчивый периодический процесс, определения направления и скорости его распространения.

Авторами предложена методика выявления в динамическом процессе устойчивых периодических составляющих, определения их параметров (спектрального состава и основной частоты); оценки взаимосвязи гармоник, взаимосвязи процессов в различных точках физической системы и скорости распространения периодического процесса в пространстве. Предполагается, что исследуемые периодические процессы статистически устойчивы, обладают свойствами эргодичности и стационарности, а шумовая составляющая имеет функцию распределения близкую к нормальному закону. Анализируемый процесс профильтрован по частоте Найквиста во избежание транспозиции частот при дискретизации. Для получения состоятельных оценок выполняется осреднение по ансамблю реализаций.

Для процессов, заданных на конечном интервале времени мгновенными значениями  $x_i$  в моменты времени  $t_i = i(\Delta t)$ , (где  $\Delta t$  – интервал дискретного отсчета времени,  $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$  – номер интервала), переход в область частот определяется дискретным преобразованием Фурье [9]:

$$X(k) = X(k\Delta f) = \Delta t \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \left[ x_i \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} ik\right) \right], \quad (1)$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ;  $j^2 = -1$ .

Конечная длина записи во времени обуславливает дискретность в области частот.  $f_k = k\Delta f$  – статистически независимые значения частоты, для которых определяется преобразование Фурье.  $\Delta f = (N \cdot \Delta t)^{-1}$  – дискретность в частотной области.

Частотный анализ позволяет поставить и решить задачу поиска и определения вида линейной зависимости между несколькими процессами, а также между отдельными частотными составляющими одного процесса. Установление таких взаимосвязей делает возможным определение тракта распространения вибровозмущения, а значит и выявления его источника, разделение гармоник принадлежащим различным периодическим процессам и определение их основной частоты и ряд других характеристик периодических составляющих динамического процесса. В основе решения рассмотренных задач лежит понятие частотной функции отклика [9], определяемой отношением:

$$H_{XY}(k) = G_{XY}(k)/G_X(k), \quad (2)$$

где  $G_X(k)$  – спектральная плотность мощности;

$G_{XY}(k)$  – взаимная спектральная плотность мощности процессов  $x_i$  и  $y_i$  для частоты  $f_k$ , определяемые следующим образом:

$$G_X(k) = |X(k)|^2 \cdot (N \cdot \Delta t)^{-1} \text{ и } G_{XY}(k) = X^*(k) \cdot Y(k) \cdot (N \cdot \Delta t)^{-1}, \quad (3)$$

где  $X^*(k)$  – комплексно-сопряженное значение  $X(k)$ .

Физическая интерпретация частотной характеристики заключается в том, что для некоторого реального или фиктивного линейного преобразователя с постоянными параметрами она описывает соотношение между входным  $X_i$  и выходным  $Y_i$  процессами. В нашем случае особенно важно, что эти соотношения определяются независимо для каждой частотной составляющей спектра.

Частотная характеристика принимает комплексные значения и обычно приводится в полярной системе координат:

$$H_{XY}(k) = |H(k)| \cdot \exp[j \cdot \varphi(k)]. \quad (4)$$

Такая форма придает ей дополнительный физический смысл, в связи с тем, что  $|H(k)|$  дает оценку изменения интенсивности, а  $\varphi(k)$  – фазовому сдвигу для частотных составляющих процессов  $x_i$  и  $y_i$ . Следует отметить, что  $\varphi(k)$  совпадает с фазой  $G_{XY}(k)$ , в связи с чем при исследовании только фазовых соотношений можно ограничиться вычислением взаимной спектральной плотности мощности.

Основная задача при исследовании периодических процессов в физических системах состоит в определении направления и скорости их перемещения, частот и энергетических характеристик их гармоник. В экспериментальных исследованиях традиционно используется измерительная схема из нескольких датчиков, разнесенных в пространстве. Пространственный сдвиг между датчиками вызывает смещение во времени между регистрируемыми процессами. Величина этого смещения характеризует направление и скорость перемещения вибропроцесса. Однако определение величины смещения по осциллограммам зачастую невозможно из-за псевдослучайного характера регистрируемых процессов и невозможностью выделения в сигналах характерных точек. Применение методов узкополосной фильтрации также не дает положительных результатов вследствие часто наблюдающегося отсутствия в спектре сигнала низкочастотных гармоник и статистического характера устойчивости исследуемого процесса. В таких условиях можно достичь результативности с помощью построения и анализа частотной характеристики в частности ее фазовой составляющей.

Неподвижные датчики (в точках  $A$  и  $B$ ), разнесенные на расстояние  $\theta$  в пространстве, при наличии перемещающегося статистически устойчивого динамического процесса фиксируют его периодические составляющие, которые можно описать рядами Фурье вида:

$$\begin{aligned} X_A(t) &= \sum_{i=0}^{\infty} X_i \cdot \sin(i\omega_0 t + \varphi_i^A); \\ X_B(t) &= \sum_{i=0}^{\infty} X_i \cdot \sin(i\omega_0 t + \varphi_i^B), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  – основная частота периодической составляющей;  $X_i$  – амплитуда;  $\varphi_i^A$  и  $\varphi_i^B$  – начальные фазы  $i$ -й гармоники.

Разность фаз для частотных составляющих процесса  $\varphi_i^{BA} = \varphi_i^B - \varphi_i^A$ , интервал времени  $t_{BA} = t_B - t_A$ , за который вибропроцесс перемещается на расстояние  $\theta$  и его скорость, связаны соотношением  $\varphi_i^{BA} = -i \cdot \omega_0 \cdot t_{BA}$ , которое совместно с выражением  $f_i = i \cdot f_0$ , определяющим частоты гармоник, описывают в системе координат частота-фаза в параметрической форме семейство эквидистантных дискретных точек, лежащих на прямой  $\varphi = \pm(\omega_0 \cdot t_{BA} / f_0) \cdot f$ .

Знак интервала  $t_{BA}$  зависит от соотношения, выбранного при анализе, и действительного направления перемещения процесса. Физически реализуемому движению соответствует условие  $t_{BA} \geq 0$ . Следовательно, если точки  $\varphi_i^{BA}(f_i)$  ложатся на прямую с отрицательным наклоном, предполагаемое движение процесса соответствует действительному.

Прямое использование фазы частотной характеристики для определения времени запаздывания и вычисления на этой основе скорости распространения периодического процесса от одной точки измерения к другой осложняется неопределенностью величины фазового сдвига, что связано с бесконечнозначностью арктангенса. Использование главных значений арктангенса приводит к трансформации прямой, на которой лежат точки  $\varphi_i^{BA}(f_i)$ , в последовательность отрезков. Выражение для разности фаз приобретает вид:

$$\tilde{\varphi}_i^{BA} = \mp(i \cdot \omega_0 \cdot t_{BA} - 2 \cdot \pi \cdot k), \quad (6)$$

где  $k$  – целая часть отношения  $(i\omega_0 t_{BA} + \pi)/(2\pi)$ .

В тех случаях, когда фаза является гладкой функцией частоты, абсолютные значения  $\varphi_i^{BA}(f_i)$  по результатам вычисления  $\tilde{\varphi}_i^{BA}$  можно восстановить методом «продолжения фазы». Но при наличии в процессе интенсивной шумовой составляющей воспользоваться этим методом не удается.

Система уравнений (6) и  $f_i = i \cdot f_0$  не определена, т. к. содержит три неизвестных величины. Поэтому по отдельно взятой гармонике с помощью фазовой частотной характеристики невозможно однозначно определить скорость перемещения вибропроцесса.

Если процесс отличен от гармонического, что часто наблюдается на практике, появляется возможность восстановить однозначность переходом к анализу приращений частоты и разности фаз для нескольких гармоник. В этом случае:

$$\begin{aligned} \Delta f_r &= f_{i+r} - f_i = r f_0; \\ \Delta \varphi_r^{BA} &= \varphi_{i+r}^{BA} - \varphi_i^{BA} = \mp r \cdot \omega_0 \cdot t_{BA}. \end{aligned} \quad (7)$$

Наиболее удобно, когда хотя бы две точки  $\varphi_i^{BA}(f_i)$  лежат на одном отрезке фазовой характеристики, т. е. для их номеров выполняется неравенство:

$$(2k-1) \cdot \pi / (\omega_0 \cdot t_{BA}) \leq i \leq (2k+1) \cdot \pi / (\omega_0 \cdot t_{BA}). \quad (8)$$

Процедура определения параметров перемещающегося в пространстве периодического процесса состоит в следующем. Для вибраций, зарегистрированных датчиками в двух точках пространства, вычисляются спектры и фазовая частотная характеристика. Определяются частоты устойчивых гармоник и для тех, которые предположительно относятся к одному периодическому процессу, вычисляются разности фаз  $\tilde{\varphi}_i^{BA}$ . Для гармоник, расположенных на одном отрезке, используя соотношения (7), вычисляются значение основной частоты  $f_0$  и разности номеров  $r$ . Причем  $r$  должно быть целым, что является критерием принадлежности гармоник одному процессу. Далее по выражению (6) вычисляются номера обнаруженных на спектре гармоник  $i$  и значения параметра  $k$ , что позволяет восстановить абсолютные значения разностей фаз  $\varphi_i^{BA}$ . По значению  $f_0$  вычисляется скорость перемещения виброполя, а направление наклона отрезка фазовой характеристики определяет действительное направление распространения вибраций. Гармоники с частотами кратными  $f_0$ , фазы которых удовлетворяют условию (6), движутся в пространстве синхронно и формируют единый периодический во времени процесс.

Особенностями рассмотренной процедуры является то, что в ней используются осредненные частотные характеристики, которые отражают статистически устойчивые состоятельные оценки фазовых соотношений между анализируемыми процессами, элиминируя влияние

случайных шумовых компонентов. Во-вторых, переход к анализу приращений позволяет избежать неопределенности, связанной с неоднозначностью определения разности фаз.

Как отмечено ранее, использование фазовой характеристики допустимо только при наличии линейной взаимосвязи анализируемых процессов, что требует вычисления функции когерентности. Дополнительные требования предъявляются и к системе измерения. Необходимо точно знать искажения фаз, вносимые измерительными каналами, чтобы они были одинаковы во всех каналах и минимальны.

На основе рассмотренной методики сформирована схема измерительно-информационного комплекса для выявления структуры периодических динамических процессов и определения их параметров. В состав комплекса входят четыре подсистемы:

– измерительная: малоинерционные датчики-преобразователи с блоками питания, предварительные фильтры, усилители, коммутаторы, регистраторы первичного сигнала (аналоговые и цифровые);

– преобразования: протivotранспозиционные фильтры, блоки быстрого преобразования Фурье, блоки вычисления фазочастотной характеристики, взаимной корреляционной функции, функции когерентности, накопители для текущих и осредненных результатов вычислений;

– анализа: блок формирования, хранения и использования базы данных частота-фаза-когерентность для гармонических составляющих процесса, блок анализа приращений частоты и фазы, блок расчета основных характеристик периодических процессов;

– взаимодействия с оператором: универсальный блок индикации, блок документирования, блок интерактивного взаимодействия оператор-информационный комплекс.

Особенностью комплекса является то, что он может работать как в полностью автоматическом режиме, так во взаимодействии с оператором. Наличие промежуточных накопителей информации позволяет использовать подсистемы комплекса автономно.

Методика идентификации параметров периодической составляющей динамических процессов применена для анализа пульсаций потока в турбоустановке. Измерения выполнялись датчиками, разнесенными в окружном направлении. Общий вид регистрируемых процессов показан на рис. 1, он подобен записям случайных процессов, отсутствует выраженная периодичность и какие-либо характерные участки.

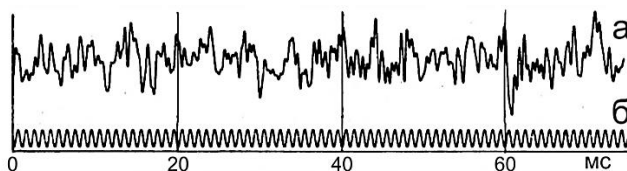


Рис. 1. Общий вид регистрируемых процессов:  
а – осциллограмма регистрируемого процесса; б – опорный сигнал

Перевод процесса в частотную область показал, что в нем присутствуют устойчивые структуры эквидистантных гармоник с колоколообразной огибающей (рис. 2, а).

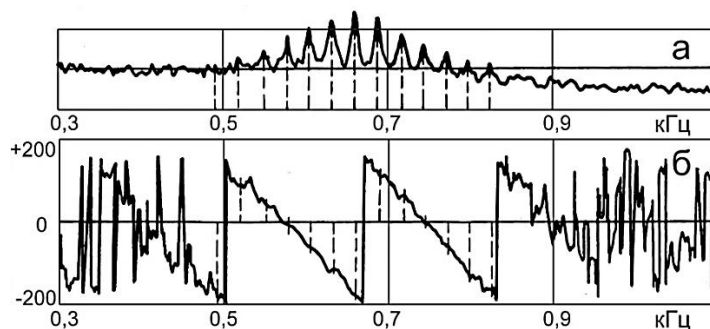


Рис. 2. Устойчивые структуры эквидистантных гармоник с колоколообразной огибающей:  
а – амплитудный спектр процесса; б – фазовая частотная характеристика

Обращает на себя внимание отсутствие в спектре соответствующих этой структуре низших гармоник. Даже внешний вид фазовой частотной функции отклика (см. рис. 2, б) подтверждает наличие линейной взаимосвязи между разностями фаз и частотами гармоник, что соответствует их синхронному перемещению в пространстве и принадлежности одному периодическому процессу. Анализ с использованием описанной методики показал, что основная частота периодического процесса  $27,5 \text{ с}^{-1}$ , его формируют гармоники с номерами от 18 до 30 (остальные имеют малую интенсивность и не различимы на фоне шумов) и он перемещается в окружном направлении с угловой скоростью  $172,8 \text{ рад/с}$ . Сопоставление параметров обнаруженного периодического процесса с виброхарактеристиками элементов конструкции турбомашин позволяет оценить возможность возникновения резонансных колебаний при ее работе.

### ВЫВОДЫ

С учетом встречающихся в практике экспериментальных исследований особенностей состава и характеристик периодических составляющих динамических процессов сложного состава сформирована процедура выявления этих составляющих определения параметров их гармонического состава, а также направления распространения вибровозмущений. Предлагаемая методика основана на анализе приращений фазочастотной характеристики для процессов регистрируемых разнесенными в пространстве датчиками.

На основе рассмотренной методики сформирована схема измерительно-информационного комплекса для выявления структуры периодических динамических процессов и определения их параметров. Структура комплекса позволяет ему работать как в полностью автоматическом режиме, так во взаимодействии с оператором. Наличие промежуточных накопителей информации позволяет использовать подсистемы комплекса автономно.

Методика анализа приращений фазочастотной характеристики и элементы измерительно-информационного комплекса использованы для идентификации взаимосвязи и параметров периодической составляющей пульсаций потока в турбоустановке с целью выявления источника вибровозмущения вынужденных колебаний лопаточного аппарата. Разработанная методика показала свою результативность при анализе динамических процессов, зарегистрированных в эксперименте.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дабагян А. В. *Некоторые колебательные процессы в роторах турбо- гидрогенераторных установок* / А. В. Дабагян. – Харьков: ТД «Золотая миля», 2008. – 240 с.
2. Ларин А. А. *Очерки истории развития теории механических колебаний* / А. А. Ларин. – Севастополь : Вебер, 2013. – 403 с.
3. Тимошенко С. П. *Прочность и колебание элементов конструкций* / С. П. Тимошенко. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
4. *Вибрации в технике: Справочник Т.1. Колебания линейных систем* / Под ред. Болотина В. В. – М.: Машиностроение, 1978. – 352с.
5. *Исследование резонансных колебаний рабочего колеса компрессора с частотами некратными частоте вращения ротора* / И. В. Угоров, А. Г. Заславский, В. А. Карасев [и др.] –Сб. *Аэроупругость лопаток турбомашин (Тр.ЦИАМ №953)*, 1982. – С. 182–195.
6. Ляшева С. А. *Автоматизированная система моделирования параметров быстропротекающих процессов* / С. А. Ляшева // *Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности. Труды Международной научно-технической конференции. Том 1 «Перспективные информационные технологии» ПИТ 2015 94: Международная научно- практическая конференция, 5 – 8 августа 2014 г.: сборник докладов. Том II.* – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – С. 500–504.
7. Борисенко А. Н. *Современные информационно-измерительные системы вибродиагностики ДВС* / А. Н. Борисенко, П. С. Обод, О. В. Лавриненко // *Вестник НТУ «ХПИ».* – 2010. – № 39. – С. 132–137.
8. Sangha M. S. *Neural network fault classification of transient data in an automotive engine* / M. S. Sangha, J.B. Gomm, D.Yu. J. // *Modell.,Identif. Contr.* – 2008. – № 3 (2). – P. 148–155.
9. Бендат Дж. *Применение корреляционного и спектрального анализа* / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1983. – 312 с.