

Раздел II. Методы, модели и алгоритмы обработки информации

УДК 621.3.013.62

С.С. Зельманов, В.В. Крылов

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЙ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕДУРЫ ИХ ИСПЫТАНИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСА ФОРМЫ

Формирование сигналов для диагностики состояния систем и конструкций связано с реализацией разнообразных воздействий на объект. Как правило, эти воздействия имеют вид гармонических колебаний на частотах экстремумов АЧХ систем и конструкций. Такой вид воздействий направлен на выявление наиболее опасных состояний, но не учитывает иных особенностей характера АЧХ системы кроме экстремальных точек. По-видимому, понимание этого обстоятельства заставляет использовать кроме вибрационных дополнительно шумовые воздействия, обладающие богатым спектром частот. Учитывая случайный характер этих воздействий, тем не менее, не удаётся согласовать их оптимально с параметрами системы для получения наиболее эффективного диагностического результата. Это связано с тем, что существуют определенные соотношения амплитуд и начальных фаз комплексного коэффициента передачи объекта, требующие для получения оптимального результата согласованных соотношений с амплитудами и начальными фазами частотных составляющих спектра воздействия. Случайный характер спектра диагностического воздействия не соответствует этим требованиям в принципе, что определяется самой случайностью этого воздействия. Введенное понятие резонанса формы позволяет сформировать оптимальный диагностический сигнал на основе импульсной характеристики системы. При этом при равных энергиях традиционного диагностического воздействия и воздействия на основе импульсной характеристики системы представляется возможным определить, не будет ли превышен предел прочности системы. Это позволяет более успешно диагностировать опасные состояния системы или конструкции. рассматривается также возможность резонанса в диффузной системе с распределенными параметрами при векторной параметризации сигналов на входах системы, описываемой дифференциальным уравнением математической физики в частных производных. Рассмотренный способ испытания системы является также альтернативным традиционному частотному методу диагностики и испытаний.

Диагностика состояния конструкции; поведенческая модель системы; резонанс формы; матричный резонанс; диффузная система; распределенные параметры.

S.S. Zelmanov, V.V. Krylov

DIAGNOSTICS OF THE STATE OF OBJECTS AND PROCEDURES OF THEIR TESTING ON THE BASIS OF FORM RESONANCE

Signal forming for state diagnostics of systems and designs is connected with the realization of different actions on the object. As a rule these actions have the type of harmonic oscillations at the extremum frequencies of AFC systems and designs. Such type of actions is directed for discovery of the most dangerous states but it doesn't take into consideration other special features of AFC system except the extreme. Apparently the interpretation of this circumstance makes to use additionally noise actions which have rich frequency spectrum. Taking into consideration the occasional character of these actions it is impossible to coordinate them optimally with parameters of the system in a order to receive the most effective result. This is contend with the fast that there are definite align-

ments of the amplitudes and the initial phases of the complex coefficient of the object transmission which require coordinated alignments with the amplitudes and the initial phases of frequency components of the action spectrum. The accidental nature of the spectrum of the diagnostic actions does not correspond to these requirements in principle which is determined by the accidental nature of this action. The introduction of the known resonance form gives the possibility to form optimal diagnostic signal. In this case having equal energies of the traditional diagnostic actions and the action on the base of impulse system characteristic in the last case owing to the resonance form we have more intensive. This fact gives the possibility to carry out diagnostics of dangerous states of system and design. This article considers the possibility of the resonance in the diffusion system with distributed parameters in the presence of the vector parameterization of signals at the system inputs, which is described by the differential equation of the mathematical physics in the quotient derivatives. The described method of the system testis the alternative to the traditional frequency method.

Diagnostics of design state; system behavior model; form resonance; matrix resonance; diffusion system; distributed parameters; matrix resonance; diffusion system; distributed parameters.

Введение. В настоящее время одним из основных способов диагностики и испытаний систем при их создании и эксплуатации является частотный анализ, имеющий основную цель – определение собственных частот и форм колебаний конструкций и систем. Этот способ испытаний относится как к механическим, так и к радиоэлектронным системам и связан с определением возможности возникновения резонанса при динамическом поведении системы. Поэтому в системах САПР, в процессе моделирования решаются именно задачи частотного анализа.

Проблема диагностики объектов и формирования испытательных сигналов находится также в сфере внимания иностранных авторов [1–5].

Диагностические воздействия на конструкцию или систему обычно преследуют цель возбуждения колебаний в испытываемой конструкции на одной или нескольких собственных (резонансных) частотах с целью выявления предела прочности системы или конструкции. Кроме того, используются воздействия типа ударных и гармонических нагрузок, а также широкополосной вибрации.

Недостатком таких подходов является то, что одна или несколько собственных и резонансных частот, на которых проводится диагностика, не отражают всех особенностей амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик объекта диагностики. Даже при охвате всего диапазона частот упомянутых характеристик объекта вышеуказанным диагностическим сигналом вида случайной широкополосной вибрации не достигается оптимального соответствия комплексного спектра испытательного сигнала параметрам комплексного коэффициента передачи объекта. Причины указанного несоответствия можно конкретизировать так:

1. Существуют определенные соотношения в интенсивности между частотными составляющими амплитудно-частотной характеристики объекта, требующие согласованных соотношений от частотных составляющих спектра воздействия для получения оптимального результата. Случайный характер спектра диагностического воздействия не соответствует этим требованиям вообще, что определяется самой случайностью этого воздействия.

2. Существуют определенные соотношения между начальными фазами частотных составляющих фазово-частотной характеристики объекта, требующие согласованных с ними соотношений между начальными фазами частотных составляющих спектра диагностического воздействия для получения оптимального результата. Случайный характер начальных фаз частотных составляющих спектра диагностического воздействия не соответствует этим соотношениям вообще, что определяется самой случайностью этого воздействия.

Вследствие этих причин упомянутые испытательные сигналы не могут обеспечить соответствующий отклик объекта, который позволил бы обнаружить в процессе испытаний наиболее опасные отклонения параметров конструкции.

Решению этой задачи предшествовали исследования, проводимые в течение ряда лет и связанные с попытками обобщения понятия резонанса в линейных стационарных динамических системах с целью обнаружения его более широких возможностей [16].

Основная часть. Решение задачи обобщения резонанса в линейной стационарной динамической системе, как дальнейшего развития традиционного подхода к этому явлению, привело к понятию резонанса формы сигнала [17].

Система или конструкция может иметь самую различную физическую природу, но главным здесь является смысл её поведения, как объективно наблюдаемой системы с точки зрения её реакций на разнообразные внешние воздействия (стимулы).

В нормированном функциональном пространстве входные сигналы таковы, что на отрезке $(0, T)$ уровень выходного сигнала, имеющий значение неотрицательного числа L , имеет вид:

$$L = \|u_2\| = f(u), \quad u = u(t), \quad t \in (0, T),$$

Если найдется такая точка u_0 в функциональном пространстве входных сигналов, для которой справедливо соотношение вида:

$$L_0 = f(u_0) > f(u), \quad \forall u \neq u_0,$$

означающее, что в функциональном пространстве входных сигналов существует некоторый сигнал u_0 , для которого имеет место **максимальный уровень (норма) выходного сигнала** по сравнению со всеми другими сигналами, то в системе имеет место **резонанс формы**, зависящий от конфигурации сигнала. **Такой резонанс, в частности, наблюдается в согласованном фильтре.**

Если рассматривать диагностируемую систему как согласованный фильтр, то, очевидно, что диагностический сигнал должен быть согласован с такой системой так, как это делается в случае согласованного фильтра [14].

Если сформировать диагностический сигнал на основе ограниченной интервалом T импульсной характеристики конструкции или системы, взяв зеркальное изображение этой характеристики, сдвинутое на интервал T , то такой диагностический сигнал, воздействующий на систему, будет полностью согласован с ней. В этом случае все частотные составляющие реакции диагностируемой системы или конструкции на этот сигнал, действуя синфазно, обеспечат её максимально возможную реакцию. Только в этом случае могут быть обнаружены такие опасные тенденции в состоянии системы или конструкции, которые при их наличии могут привести к опасным непредсказуемым последствиям.

Такой подход к резонансу формы в согласованном фильтре, выделяющем известный сигнал из шума, является обратным, поскольку ответный сигнал объекта характеризует неизвестное и возможно опасное состояние системы.

Резонанс формы, характеризующийся максимальной реакцией объекта на согласованный с ним сигнал, позволяет утверждать, что из всех возможных видов диагностических воздействий такой сигнал является оптимальным [27].

Разумеется, процедура сравнения по эффективности воздействия согласованного сигнала и всех иных сигналов справедлива при проведении нормировки в смысле равенства их энергий.

Таким образом, использование понятия явления резонанса формы позволяет синтезировать эффективный диагностический сигнал.

Постановка задачи 1. В качестве примера рассмотрим систему 4го порядка, АЧХ которой имеет два экстремума на частотах ω_1 и ω_2

Определим величину и характер реакции системы на стандартный диагностический гармонический сигнал на одной из резонансных частот и на сигнал, согласованный с данной системой при равенстве их энергий.

Импульсная характеристика системы имеет вид:

$$h_{\delta}(t) = U_{m1} e^{-\alpha t} [\cos \omega_2 t - \cos \omega_1 t], \quad (1)$$

где $\omega_1 = (\omega_{ce} - \Omega_1)$; $\omega_2 = (\omega_{ce} + \Omega_1)$

Рассмотрим два случая воздействия на систему.

1. В первом случае на вход системы подаётся диагностический сигнал, имеющий вид зеркального отображения гармонического колебания длительностью T на одной из резонансных частот ω_1 амплитудно-частотной характеристики системы:

$$u_1(t-T) = U_{m2} \cos \omega_1(t-T). \quad (2)$$

2. Во втором случае на вход системы подаётся диагностический сигнал длительностью T , форма которого соответствует ограниченному интервалом T изображению зеркальной импульсной характеристики системы, сдвинутой на интервал T её ограничения:

$$u_2(t-T) = U_{m1} e^{-\alpha(t-T)} [\cos \omega_2(t-T) - \cos \omega_1(t-T)]. \quad (3)$$

Решение задачи 1. Для определения реакции системы на это воздействие необходимо вычислить поочередно свертки выражений импульсной характеристики системы с выражениями зеркальных изображений каждого из входных сигналов, сдвинутых на интервал T , т.е.:

$$u_{21}(t) = \int_0^t u_1(t-\tau) \cdot h_{\delta}(\tau) \cdot d\tau \quad \text{и} \quad u_{22}(t) = \int_0^t u_2(t-\tau) \cdot h_{\delta}(\tau) \cdot d\tau.$$

Реакция системы определяется в интервале $0 \leq t \leq 2T$, причем, при $t=T$ она должна иметь максимум.

По результатам вычислений этих интегралов и сравнения полученных максимумов следует сделать вывод о преимуществе определенного диагностического воздействия. Дискретная модель этих интегралов имеет вид:

$$u_2(k\Delta t) = \sum_{k=1}^{k=l} h(k\Delta t) \cdot u_1(n+k+l)\Delta t$$

$$1 \leq k \leq l \quad \text{при} \quad l = 1, 2, 3, \dots, n, \dots, 2n.$$

При $l > n$ $h(k\Delta t) = 0$; при $(n+k-l) = 0$.

В первом случае для воздействия сигнала вида зеркального гармонического сигнала (2) на резонансной частоте системы ω_1 будем иметь:

$$h(k\Delta t) = U_{m1} e^{-\alpha k\Delta t} (\cos \omega_2 k\Delta t - \cos \omega_1 k\Delta t),$$

$$u_1(n+k-l)\Delta t = U_{m2} \cos \omega_1(n+k+l)\Delta t.$$

Во втором случае для воздействия вида зеркальной импульсной характеристики (3) системы:

$$h(k\Delta t) = U_{m1} e^{-\alpha k\Delta t} (\cos \omega_2 k\Delta t - \cos \omega_1 k\Delta t),$$

$$h(n+k-l)\Delta t = U_{m1} e^{-\alpha(l-k+1)\Delta t} ((\cos \omega_2(n+k-l)\Delta t - \cos \omega_1(n+k-l)\Delta t)).$$

Результаты моделирования. Длительность импульсной характеристики $T = 0.1$ с., $n=1000$; $\Delta t = 10^{-4}$; $U_{m1} = 1.26B$; $U_{m2} = 1B$; $\omega_1 = 7536c^{-1}$; $\alpha = 8$.

Результаты моделирования представлены на рис. 1, рис. 2, 3.

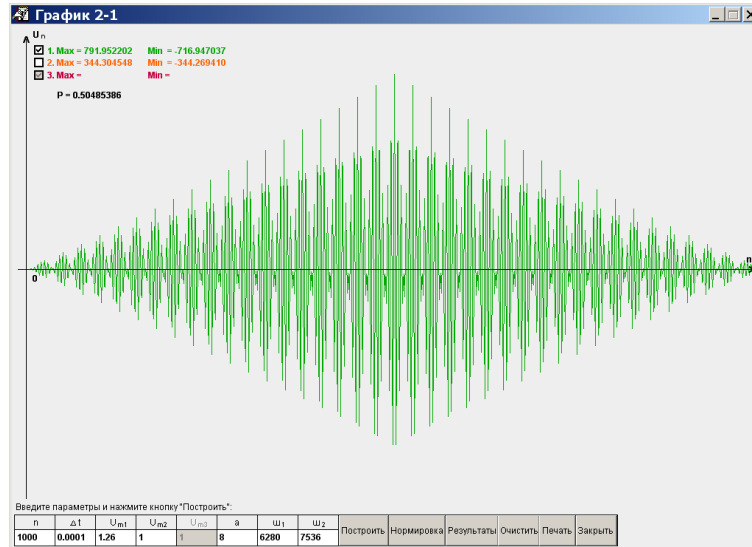


Рис. 1. Реакция системы на гармонический сигнал на одной из резонансных частот системы

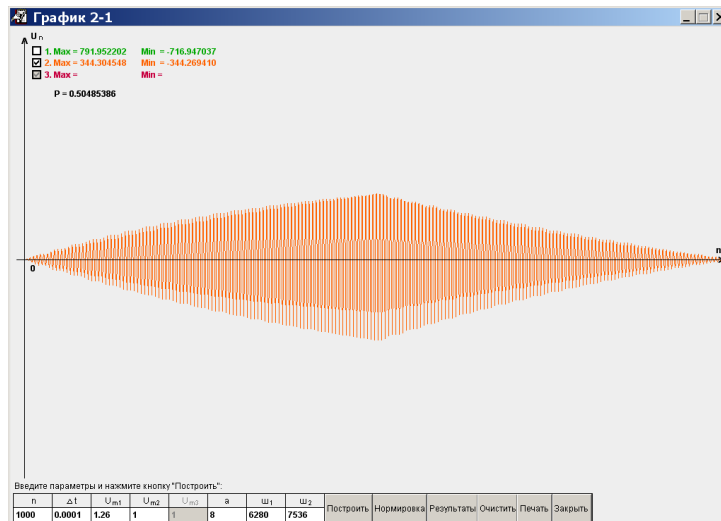


Рис. 2. Реакция системы на сигнал, согласованный с её импульсной характеристикой

Результаты моделирования показывают, что реакция системы на диагностический сигнал в случае резонанса формы превышает реакцию системы на одиночный резонансный сигнал в 2,1 раза при равенстве их энергий.

Это обстоятельство должно более успешно способствовать определению допустимого уровня воздействий, не позволяющего превысить допустимый предел прочности в конструкциях и допустимое состояние в электронных и иных объектах.

Таким образом, использование явления резонанса формы при прочих равных условиях позволяет более эффективно решать задачу диагностики систем по сравнению с ранее известными методами.

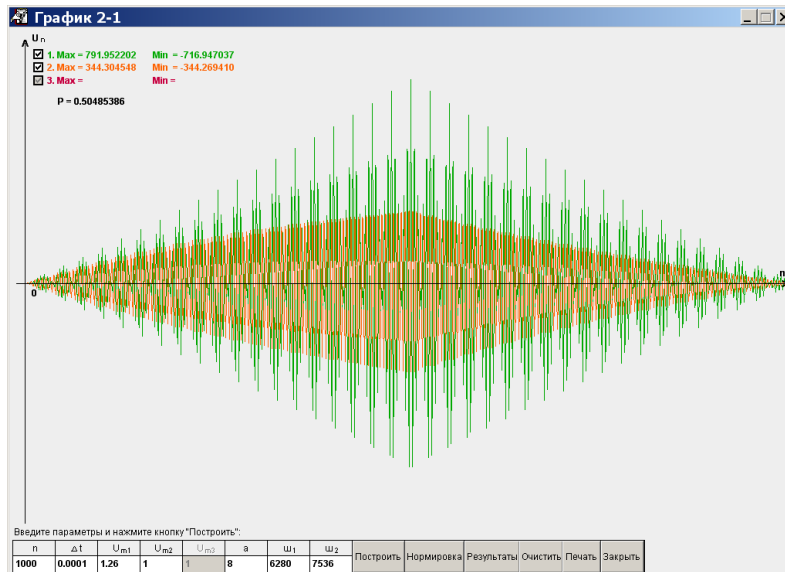


Рис. 3. Сравнительные реакции системы на сигналы при гармоническом и согласованном воздействиях

Более широкое обобщение частотного резонанса, основанное на рассмотрении поведенческой модели объекта диагностики, позволило выяснить возможность существования в нём многопараметрического резонанса для сигнала с многомерным параметром.

Динамическая система любой физической реализации и известной структуры может быть представлена как система с n входами и одним выходом. На её входы подаются внешние воздействия, а на выходе возникает экстремальная ответная реакция. При таком подходе, основная задача – это поиск некоторой комбинации управляющих воздействий определенной формы, обеспечивающих экстремальную реакцию системы на её выходе.

При этом резонанс рассматривается как свойство системы с внешним описанием типа «вход-выход». Это свойство альтернативно традиционному резонансу системы с внутренним описанием [18–19].

Практическая ценность такой задачи состоит в том, что реальные объекты действительно могут содержать много точек внешнего воздействия. При действии на эти точки определенного сочетания внешних сил в системе может возникать резонанс, которого не ждут и который может привести к непредсказуемым последствиям. При этом иные сочетания автономных воздействий внешних сил на отдельные входы системы экстремального отклика на выходе системы не вызывают. При традиционном обследовании таких систем частотным методом резонансы в них не обнаруживаются. К таким системам могут относиться мостовые конструкции, отрезки железнодорожных путей с движущимися по ним составами и другие системы с ограниченной базой, находящиеся под воздействием внешних сил в разных точках.

Такой вид резонанса, конечно, будет разновидностью резонанса формы, и мы определили его как **матричный резонанс формы**. При этом в случае векторной совокупности входных сигналов при определенной их параметризации на выходе системы может иметь место экстремальный отклик, величина которого в некоторый момент времени больше, чем для любой иной комбинации входных сигналов, что подробно показано в работе [20–21].

Основанный на матричном резонансе формы критерий резонанса отличается от традиционного критерия тем, что резонанс может возникнуть там, где его не ждут со всеми вытекающими отсюда последствиями различного свойства. Полезность альтернативности такого подхода состоит в том, что с его помощью резонанс может быть обнаружен там, где частотный метод недостаточно эффективен.

Диффузные линии имеют различную физическую природу и могут представлять собой либо проводники в печатных платах и интегральных схемах в условиях РС-режима, либо неограниченные стержни с теплоизолированной боковой поверхностью, осуществляющие теплопередачу. Задачи анализа характера процессов в таких системах встречаются, например, при изучении течения газов в микроструктурах и электронного транспорта в нанoeлектронике. Аналогия процессов в электрических и иных физических диффузных системах здесь совершенно очевидна. В одном случае речь идет об определении во времени характера напряжения или тока как функций координат линии, в другом случае интерес представляет зависимость концентрации вещества (или иных объектов) от пространственных координат и времени. При этом задается коэффициент, характеризующий проницаемость среды для диффузии, являющийся аналогом коэффициента затухания в электрических системах с распределенными параметрами [22–26].

Физические процессы, протекающие в упомянутых системах, описываются уравнениями диффузии, представляющими собой дифференциального уравнения в частных производных нестационарного и стационарного типа. Эти уравнения представляют собой частные случаи уравнений математической физики. К ним относится уравнение теплопроводности, описывающее распространение тепла в однородном стержне. Это уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2} = f(x,t) \quad (4)$$

при начальных условиях: $Q(x,0) = Q_0(x)$ и $-\infty \leq x \leq \infty$, а $\int_{-\infty}^{\infty} |Q(x,t)| dx < \infty$

при $t \geq 0$ и $a \neq 0$.

Здесь $Q(x,t)$ – температура, x – расстояние от одного из концов однородного стержня, по которому распространяется тепловой поток, t – время, a – положительная константа, являющаяся аналогом коэффициента затухания, определяющая скорость распространения тепла.

Совершенно очевидно, что уравнение (4) описывает систему с распределенными параметрами пока и поскольку размер системы значительно больше длины свободного пробега носителей. Это очевидно справедливо и для длинной электрической линии с потерями, как системы с распределенными параметрами, так как её длина соизмерима с длиной волны источника сигнала. Поэтому уравнение теплопроводности адекватно описывает и РС-линию, процесс распространения энергии в которой носит диффузный характер.

Постановка задачи 2.

1. Необходимо определить для нескольких входов системы вид одновременно действующих сигналов, вызывающих экстремальную реакцию на выходе системы.

2. В качестве импульсной характеристики необходимо использовать её функцию Грина, поскольку соответствующий ей сигнал вызовет в определенный момент времени максимальную реакцию на выбранном выходе системы.

3. Зафиксировать координату выхода системы и, выбрав произвольно координаты ряда входных точек системы, определить для каждой из них функцию Грина по отношению к выходу системы.

4. Сформировать для всех выбранных входов соответствующие зеркально-смещенные сигналы и подать их на соответствующие входы системы.

5. Определить результирующий сигнал, т.е. отклик системы с помощью операции свёртки зеркально-смещенных сигналов с соответствующими импульсными характеристиками и последующего суммирования результатов свертки.

6. Убедиться по характеру отклика о наличии матричного резонанса в системе.

Решение задачи 2. Для системы с значительными потерями, описываемой уравнением теплопроводности (4), функция Грина имеет вид:

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi \cdot t}} \exp\left[-\frac{(x - \xi)^2}{4a^2 t}\right]. \quad (5)$$

Это так называемая функция источника для уравнения системы с распределенными параметрами или её импульсная характеристика.

Вначале выберем одну точку входа ξ_1 и одну точку выхода x_1 , т.е. точки, для которых импульсная характеристика будет иметь вид:

$$G(x_1, \xi_1, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi \cdot t}} \exp\left[-\frac{(x_1 - \xi_1)^2}{4a^2 t}\right]. \quad (6)$$

Очевидно, что разность между входом и выходом может быть представлена как $d_k = (x_1 - \xi_1)$

Если произвести замену $\tau = \sqrt{a^2 t}$, то выражение (3) примет вид:

$$G(\tau) = \frac{0,282}{\tau} \exp\left[-\frac{0,25d_m^2}{\tau^2}\right]. \quad (7)$$

Если, например, выбрать 4 входа так, чтобы для них разность d_m принимала значения: $d_1 = 0,5$; $d_2 = 1$; $d_3 = 1,5$; $d_4 = 2$, то полученная совокупность импульсных характеристик по всем входам в интервале от $\tau = 0$ до $\tau = 10$ через $\Delta\tau = 0,1$ и их сумма будут иметь вид, представленный на рис. 4.

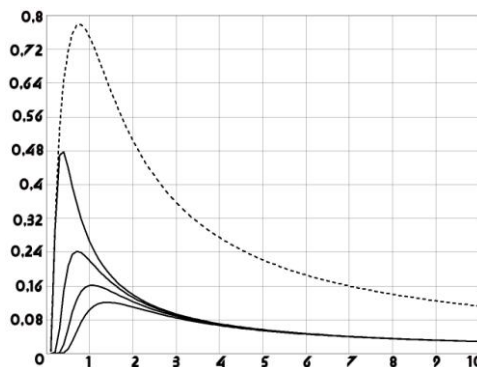


Рис. 4. Импульсные характеристики по разным входам системы и их сумма

Соответственно, чем больше расстояние d_m , тем меньше максимум импульсной характеристики.

Для вычисления отклика системы необходимо определить вид сигнала, являющегося для каждого из входов «резонансным». В качестве такого сигнала, в частности, при импульсной характеристике (6), будет сигнал, являющийся её смещено-зеркальным отображением вида:

$$u_1(x_1, \xi_1, (t-T)) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi(t-T)}} \exp\left[-\frac{(x_1 - \xi_1)^2}{4a_2(t-T)}\right], \quad (8)$$

где T – ограниченная длительность сигнала.

Аналогичными, с учетом координаты, должны быть «резонансные» сигналы и по другим входам системы.

Для определения резонансного отклика системы на входные сигналы необходимо вычислить свертку каждого из этих сигналов с соответствующей импульсной характеристикой и просуммировать результаты.

Выражение для выходного сигнала системы как результата дискретной свертки входного сигнала и соответствующей импульсной характеристикой имеет вид:

$$u_2(l\Delta\tau) = \sum_{k=1}^{k=l} G(k\Delta\tau) \cdot u_1[n-(l-k)]\Delta\tau \quad (9)$$

$$l = 1, 2, 3, \dots, n,$$

где $G(k\Delta\tau) = \frac{0,282}{k\Delta\tau} \exp\left[-\frac{0,25d_m^2}{(k\Delta\tau)^2}\right];$

$$u_1[n-(l-k)]\Delta\tau = \frac{0,282}{[n-(l-k)]\Delta\tau} \exp\left[-\frac{0,25d_m^2}{([n-(l-k)]\Delta\tau)^2}\right]$$

Результат вычисления дискретной свертки для каждого из 4х случаев при длительности сигнала, $T = n = 100$, $\Delta\tau = 0,1$ с последующим суммированием представлен на рис. 5.

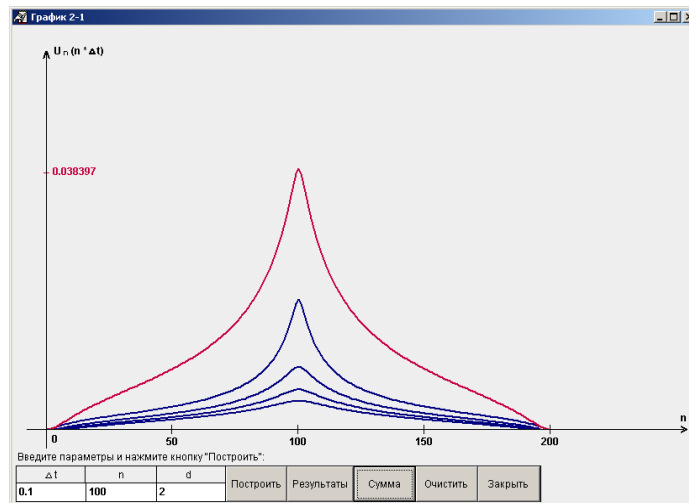


Рис. 5. Отклик системы при матричном резонансе на сигналы, действующие на каждый из 4х её входов, и суммарный отклик системы

Таким образом, в линейной стационарной системе с распределенными параметрами диффузного типа возможен матричный резонанс при определенном сочетании сигналов на её входах. Величина отклика на каждый из входных сигналов обратно пропорциональна удаленности входа сигнала от выхода системы. При одновременном воздействии сигналов на различных входах системы может наблюдаться экстремальная реакция на выходе, которая при определенных условиях может спровоцировать разрушение системы. Такой подход к диагностике и воз-

возможным испытаниям объекта может оказаться полезным для установления его запаса по устойчивости к возможным разрушениям. При этом частотный анализ может не обеспечить желаемых результатов, так как частотный резонанс в системе может и отсутствовать вследствие значительных потерь в ней.

Заключение. Рассмотренные подходы к диагностике объектов различной физической природы, основанные на введенном понятии резонанса формы, являющимся дальнейшим обобщением классического частотного резонанса, обладают существенными преимуществами по сравнению с частотным анализом объекта. Это достигается полным согласованием характеристик диагностирующего сигнала с характеристиками испытываемого объекта.

Введение понятия матричного резонанса в значительной степени расширяет возможности диагностики состояния объектов, в том числе и объектов с распределенными параметрами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ewins D.J.* Modal Testing: Theory, Practice and Application, (Mechanical Engineering Research Studies: Engineering Dynamics Series) Hardcover – September 26, 2000.
2. *Jimin He, Zhi-Fang Fu.* *Modal Analysis*, Butterworth-Heinemann. 2001. ISBN 0-7506-5079-6.
3. *Otman Basir.* Patent US 10/867, 281,2004Vibro-acoustic engine diagnostic system US 20040260454
4. Patent EP2647819A1 2013 A method and a system for diagnosing injection systems of self-ignition engines Academia Morska W Szczecinie.
5. Comparison of Modal Parameters Extracted Using MIMO, SIMO, and Impact Hammer Tests on a Three-Bladed Wind Turbine, *Experimental Mechanics Series*. – 2014. – P. 185-197.
6. *Папалекси Н.Д.* Эволюция понятия резонанса // *Успехи физических наук*. – 1947. – Т. 31. – Вып. 4.
7. *Агеев Д.В., Зельманов С.С.* Основы теории резонанса в линейных системах. – Н. Новгород: НГТУ. 1993. – 241 с.
8. *Зельманов С.С.* Развитие теории резонанса в линейных стационарных и управляемых системах. Детектирование обобщенных АМ и ЧМ-колебаний. Монография. – М.: Московский технический университет связи и информатики (Волго-Вятский филиал МТУСИ), 2007. – 200 с.
9. *Зельманов С.С.* Исследование резонансной системы с автоматически управляемым затуханием // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. – 2009. – № 1 (23).
10. *Зельманов С.С.* Критерий резонанса и резонансные явления в обобщенном двухполоснике // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2009. – № 2 (91). – С. 31-38
11. *Зельманов С.С.* Исследование явления резонанса в цепной RC-линии // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). Спецвыпуск по итогам 3-й отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества». – 2009. – № 8.
12. *Харкевич А.А.* Основы радиотехники. – М.: ГИЛ по вопросам связи и радио, 1963. – 169 с.
13. *Зельманов С.С.* Резонанс в линейной стационарной системе с экспоненциальными собственными процессами // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2010. – 12 (113). – С. 116-125.
14. *Белоглазов В.В., Бирюк И.Д., Короткова Т.Н.* Особые частоты колебательного контура // *Вестник Воронежского государственного университета, серия: физика, математика*. – 2009. – № 1.
15. *Zelmanov S.* Development of the general theory of resonance in linear stationary systems // *Latvian journal of physics and technical sciences*. – 2002. – № 3. – С. 20.
16. *Зельманов С.С.* Критерий резонанса и резонансные явления в обобщенном двухполоснике // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2009. – № 2 (91). – С. 31-38.
17. *Зельманов С.С.* Исследование явления резонанса формы сигнала в согласованном фильтре // *Электросвязь*. – 2011. – № 1.

18. Зельманов С.С. Обобщение понятия частотного резонанса на поведенческую модель линейной динамической системы с внешним описанием // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). – 2012. – № 5.
19. Зельманов С.С. Резонанс в линейной стационарной динамической системе с входами и n одним выходом // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). – 2013. – № 1.
20. Зельманов С.С. Матричный резонанс формы // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 4 (91).
21. Зельманов С.С. Многопараметрический резонанс в линейных стационарных динамических системах с управляемым затуханием // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С.40–45.
22. Зельманов С.С. Матричный резонанс в диффузной системе с распределенными параметрами // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). – 2013. – № 3. – С. 48–50.
23. Будак Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. – М.: Наука, 1972.
24. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами. Справочное пособие. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 495 с.
25. Весницкий А.И., Потапов А.И. Теория колебаний распределенных параметрических систем. Учебное пособие. – Горький, ГГУ, 1980.
26. Весницкий А.И. Волновые процессы в нестационарных упругих системах: ИЛ РГБ ОД 71: 85-1/180.
27. Зельманов С.С., Крылов В.В. О роли резонанса формы при диагностике состояния систем и конструкций // Т-Comm (Телекоммуникации и транспорт). – 2014. – № 5.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. М.Ю. Звездина.

Зельманов Самуил Соломонович – Волго-Вятский филиала МТУСИ; e-mail: zelmanss@yandex.ru; 603011, Нижний Новгород, ул. Менделеева, 15; тел.: 8312457505; к.т.н.; доцент.

Крылов Владимир Владимирович – Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева; e-mail: vkrylov@heterarchica.com; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24; тел.: 8312578669; д.т.н.; профессор.

Zelmanov Samuil Solomonovitch – Moscow Technical University of Communication and Informatics, (Volgo-Vyatskiy Branch); e-mail: zelmanss@yandex.ru; 15, Mendeleeva street, Nizhny Novgorod, 603011, Russia; phone: +7312457505; cand. of eng. sc.; associate professor.

Krylov Vladimir Vladimirovich – Nizhny Novgorod State Technical University; e-mail: vkrylov@heterarchica.com; 24, Mimina street, Nizhny Novgorod, 603950, Russia; phone: 78312578669; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 62.50:621.519

А.П. Самойленко, А.И. Панычев, С.А. Панычев

МЕТОД ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ КОМПЛЕКСА РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Известный метод определения вероятности безотказной работы по результатам испытаний партии радиоэлектронного оборудования нередко не позволяет получить приемлемую точность из-за ограниченного объема однотипных испытуемых образцов. Дополнение результатов испытаний априорной информацией о характеристиках надежности комплекса при решении практических задач дает только точечную оценку искомой вероятности. Показано, что расчет надежности объектов с ограниченным объемом натурных испытаний может быть дополнен методикой оценки вероятности безотказной работы и времени безотказной работы, а также оценкой параметров закона распределения времени безотказной