

ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБИН В АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ

Станислав Иосифович КОРШАКОВСКИЙ родился в 1939 г. в городе Коломне Московской области. Доцент МИРЭА. Кандидат технических наук. Основные научные интересы — в области неразрушающего контроля, электрореактивных двигателей космических летательных аппаратов. Автор более 90 научных работ.

Stanislav I. KORSHAKOVSKY, Ph.D., was born in 1939, in the Moscow Region. He is an Associate Professor at the Moscow Institute for Radio, Electronics and Automatics (MIREA). His research interests are in nondestructive testing and electrojet engines for space vehicles. He has published over 90 technical papers.

Михаил Александрович КРАСНЕНКОВ родился в 1942 г. в городе Хвалынске Саратовской области. Профессор МИРЭА. Доктор технических наук. Основные научные интересы — в области неразрушающего контроля, физики плазмы. Автор более 110 научных работ.

Mikhail A. KRASNENKOV, D.Sci, was born in 1942, in the Saratov Region. He is a Professor at the Moscow Institute for Radio, Electronics and Automatics (MIREA). His research interests are in nondestructive testing and plasma physics. He has published over 110 technical papers.

Предлагается метод неразрушающего контроля электропроводных элементов турбин путём создания в контролируемых зонах постоянного магнитного поля и преобразования вторичного магнитного поля вихревых токов в этих зонах в электрические сигналы. Полученные в работе результаты позволяют определить формы этих сигналов, соответствующие типичным дефектам в лопатках ротора турбины. Технология обнаружения механических дефектов, контроль температуры, вибраций и других параметров в этих элементах может обеспечить своевременное предотвращение аварийной ситуации при эксплуатации изделия.

Введение

В процессе эксплуатации энергонапряжённых технических объектов в их элементах под воздействием как внешних, так и внутренних факторов могут появляться различные дефекты: трещины, сколы, загибы, прогары, могут измениться формы и размеры деталей, их структура и т.д. Особенно опасны невидимые дефекты, например трещины, скрытые под корпусом. Все эти нарушения могут привести к потерям эксплуатационных качеств изделия и даже к его последующему разрушению.

Создание современных летательных аппаратов (ЛА) и их эксплуатация с учетом актуальных требований безопасности и сохранения окружающей среды должны сопровождаться разработкой высокоэффективных методов контроля, позволяющих непосредственно в процессе эксплуатации ЛА осуществлять диагностику состояния их элементов на предмет выявления дефектов. Обнаружение дефектов, контроль их развития во времени, определение их характера и местоположения позволяют своевременно устранить возникающие аварийные ситуации без внешних разрушений контролируемого узла. Всё это и обуславливает актуальность проблемы.

Традиционные методы контроля [1—5] не охватывают все возможные экстремальные состояния изделия, в частности авиационного двигателя. Высокоэффективные электрофизические методы значительно расширяют возможности диагностических средств благодаря своей универсальности и простоте и могут использоваться на изделиях, работающих автономно, например в космосе, воздушном пространстве Земли, при надводном и подводном плавании, в пустынных местах, в северных районах и в других экстремальных условиях. Используемый, в частности, классический токовихревой метод [4, 5] включает в себя применение частотных генераторов, что усложняет систему диагностики и контроля, приводит к большим потерям мощности информационного сигнала при установке индукционных датчиков на корпусе изделия.

Новая технология обнаружения дефектов в электропроводных элементах изделия

Современные требования безопасности при полёте летательного аппарата требуют создания быстроедействующих и надёжных средств диагностики и контроля всех его узлов. Предлагаемый метод

контроля позволяет исключить указанные выше недостатки и состоит в следующем. Вблизи контролируемого электропроводящего узла (например, ротора турбины) устанавливается специальное устройство — датчик с намагниченным сердечником, создающим постоянное магнитное поле. Контролируемая деталь или датчик приводится в движение. Так как для фиксированной точки проводящей среды магнитное поле переменное, в ней согласно уравнению Максвелла $\text{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t$ наводится вихревое электрическое поле. В соответствии с законом Ома $\mathbf{J} = \gamma\mathbf{E}$ в зоне контроля возникают замкнутые вихревые токи с плотностью \mathbf{J} , зависящие от удельной электрической проводимости среды γ , скорости движения \mathbf{v} , индукции магнитного поля \mathbf{B} . Вихревые токи создают собственное (вторичное) магнитное поле с индукцией \mathbf{B}^* , подчиняющееся уравнению Максвелла:

$$\text{rot}\mathbf{B}^* = \mathbf{J} + \partial\mathbf{D}/\partial t,$$

где слагаемым $\partial\mathbf{D}/\partial t$ при сравнительно малых частотах вращения объекта (до 400—500 об/с) можно пренебречь. Переменное потокоцепление в измерительной катушке датчика согласно закону электромагнитной индукции Фарадея $e_i = -d\Psi/dt$

создаёт в ней напряжение, равное e_i , а сам датчик может быть установлен *снаружи* — на корпусе изделия.

Таким образом, в зоне контроля индуцируются вихревые токи, магнитное поле которых в катушке датчика преобразуется в электрические сигналы, параметры которых отражают возможные механические нарушения структуры контролируемого элемента изделия. Вначале эти сигналы записывают для детали без дефектов, используя их в качестве тарировки. Если в процессе ее испытания или эксплуатации изделия в ней возникает дефект, например трещина, то сигналы с датчика будут отличаться от сигналов в отсутствие дефекта. Сравнение этих сигналов по форме и амплитуде дает возможность судить о механической целостности контролируемой детали. Рассмотрим механизм формирования этих сигналов.

Электрический сигнал при движении выступа в магнитном поле

Пусть электропроводящий выступ с размерами $d \times h \times l$ (толщина, высота, длина) движется в магнитном поле со скоростью \mathbf{v} , как показано на рис. 1, причём $d < a$, $h > b$, $l \gg a$, где a и b — характерные размеры области существования и спадания

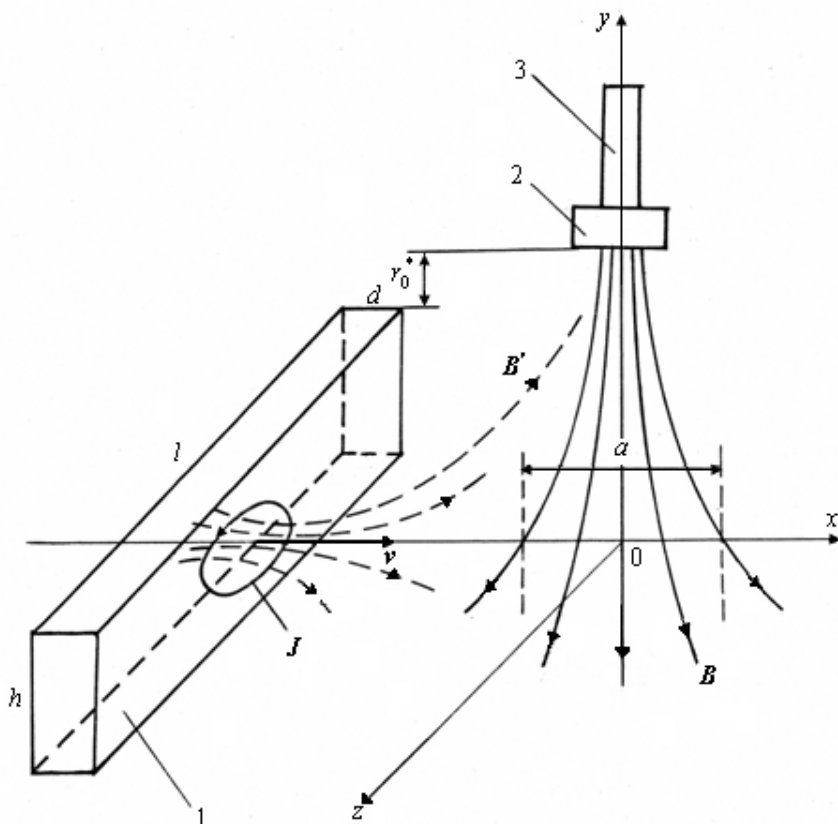


Рис. 1. Движение электропроводящего выступа в постоянном магнитном поле:
1 — выступ; 2 — измерительная катушка; 3 — источник магнитного поля

внешнего магнитного поля, которые будем считать величинами одного порядка. Плотность вихревых токов в плоскости yz имеет порядок $J = \gamma B(x)v$, а величина создаваемого ими вторичного магнитного поля \mathbf{B}^* может быть определена следующим образом.

Рассмотрим тонкий слой выступа толщиной dx . Текущий в нём вихревой ток в принятых допущениях можно считать круговым с радиусом a и силой тока $dI = aJdx = \gamma B(x)vadx$. Величина индукции вторичного магнитного поля \mathbf{B}^* может быть найдена по закону Био—Савара—Лапласа:

$$\mathbf{B}^* = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \int \frac{[\mathbf{J} \times \mathbf{r}]}{r^3} dV,$$

где радиус-вектор \mathbf{r} численно равен расстоянию от тока до точки, где определяется вектор \mathbf{B}^* . Тогда в соответствии с рис. 1 составляющая индукции

$dB_y^* \approx dB^*$ по порядку величины может быть определена как

$$dB^* = \frac{\mu_0 \mu \gamma B(x) va^2 x dx}{4\pi(r_0^2 + x^2)^{3/2}},$$

где $r_0 = \hat{r}_0 + a/2$; \hat{r}_0 — кратчайшее расстояние от выступа до измерительной катушки. Если высота выступа меньше a , то a^2 в числителе записанной выше дроби можно заменить на $a \times \mathfrak{R}(x)$, где $\mathfrak{R}(x)$ — высота выступа (в общем случае переменная от x).

Введя далее функцию

$$\hat{\mathfrak{R}}(x) = \begin{cases} \mathfrak{R}(x), & \mathfrak{R}(x) \leq a; \\ a, & \mathfrak{R}(x) > a, \end{cases} \quad (1)$$

окончательно получим

$$dB^* = \frac{\mu_0 \mu \gamma B(x) va x \hat{\mathfrak{R}}(x) dx}{4\pi(r_0^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (2)$$

Создаваемый слоем dx магнитный поток через регистрирующую катушку — $d\Phi = dB^* a^2$, а создаваемый всем профилем поток с учётом его движения

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0 \mu \gamma a^3 v}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B(x)x}{(r_0^2 + x^2)^{3/2}} \hat{\mathfrak{R}}(x - vt) dx, \quad (3)$$

где $B(x)$ — индукция внешнего магнитного поля, созданного, в частности, постоянным магнитом

цилиндрической формы; в зоне контроля она достаточно точно может быть представлена выражением

$$B(x) = B_0 [\text{th}(x + a/2)/b - \text{th}(x - a/2)/b] / 2. \quad (4)$$

Здесь B_0 — индукция поля на оси вблизи торца магнита, причём $\mathbf{B}_0 \perp \mathbf{v}$. ЭДС электромагнитной индукции в катушке с числом витков N определится как

$$e_i = -Nd\Phi / dt = -\frac{\mu_0 \mu a^3 v^2 N}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B(x)x}{(r_0^2 + x^2)^{3/2}} (\hat{\mathfrak{R}}(x - vt))'_x dx.$$

В частности, если $\hat{\mathfrak{R}}(x) = h$, а выступ при $t = 0$ находится в точке $x = 0$, то производную $(\hat{\mathfrak{R}}(x - vt))'_x$ под знаком интеграла можно выразить через δ -функцию:

$$(\hat{\mathfrak{R}}(x - vt))'_x = \delta(x - vt) \max(h, a).$$

В этом случае ($x = vt$)

$$e_i = -\frac{\mu_0 \mu \gamma a^3 v^3 N}{8\pi(v^2 t^2 + r_0^2)^{3/2}} \times B_0 [\text{th}(vt + a/2)/b - \text{th}(vt - a/2)/b] \max(h, a) t. \quad (5)$$

Полученное соотношение позволяет оценить величину сигнала с измерительной катушки для относительно простого тела — уступа прямоугольной формы. Однако изучение процессов при движении даже такой простой модели даёт богатый материал для дальнейших исследований. Дело в том, что любая трещина, скол и прочие нарушения целостности в структуре изделия могут моделироваться системой уступов прямоугольной формы. Напряжение на катушке в этом случае является суперпозицией электрических сигналов при движении такой системы чередующихся прямоугольных элементов.

Полученный результат даёт также возможность определить форму электрических сигналов, возникающих при движении электропроводящих тел, имеющих технологические структурные неоднородности. Форма получающегося при этом сигнала $e_i(t)$ даёт возможность получить «магнитный» образ движущегося тела. Наиболее удобными объектами в этом случае являются тела, совершающие периодические, в частности вращательные, движения.

Ясно, что именно вращающаяся турбина является характерным объектом для проведения подобного вычислительного анализа.

Формирование электрического сигнала при работе «идеальной» турбины

Полученные результаты можно использовать для определения электрических сигналов, возникающих при движении реальных электропроводных объектов типа лопаток турбины. Распределение вихревых токов в них зависит от ряда факторов и меняется при переходе от одной лопатки к другой. При прочих равных условиях (частота вращения, индукция внешнего магнитного поля) наибольшее влияние будут оказывать анизотропность в распределении электропроводности материала лопаток, технологический разброс в их геометрии при изготовлении и сборке, действие разрушающих факторов при последующей эксплуатации турбины. При отсутствии влияния всех этих факторов и при совершенно одинаковых лопатках («идеальная» турбина) сигналы с каждой лопатки будут одинаковы. Рассмотрим механизм их формирования для этого простого случая с учётом данных, соответствующих условиям реального режима контроля.

В контролируемой зоне лопатки ротора турбины [7] представляют собой прямоугольные выступы шириной $d = 1,8$ мм и высотой $h = 15$ мм. Магнитное поле создаётся постоянным магнитом цилиндрической формы, входящим в состав измерительной катушки (датчика), установленной (от торца) на расстоянии ~ 2 см от кромки лопаток снаружи корпуса турбины. Индукция поля в рабочей зоне достаточно точно аппроксимируется выражением (4), где $B_0 = 0,05$ Тл, $a = 0,02$ м, $b = 0,015$ м, $r_0 = 0,012$ м. Результаты проведенных расчётов $e_i(x)$, где $x = vt$, при $\gamma = 10^7$ Ом⁻¹м⁻¹, $v = 100$ мс⁻¹, $\mu = 10^2$, представлены на рис. 2–6. Движение одиночного уступа основанием «вперёд», входящего в зону локального магнитного поля датчика, приводит к индуцированию сигнала двухполярной формы в его измерительной катушке (рис. 2,а). При этом его нулевое значение соответствует моменту времени, когда граница уступа проходит точку максимума магнитного поля, а производная $d\psi/dt$ принимает максимальное значение. При движении уступа «обратной» конфигурации полярность сигнала меняется на противоположную (рис. 2,б).

«Идеальная» лопатка турбины представляет собой последовательно расположенные друг за другом уступы (выемки) на расстоянии, равном толщине лопатки d (рис. 3,а). Для «толстой» лопатки (выступ толщиной $d = 40$ мм $> a$) напряжение на

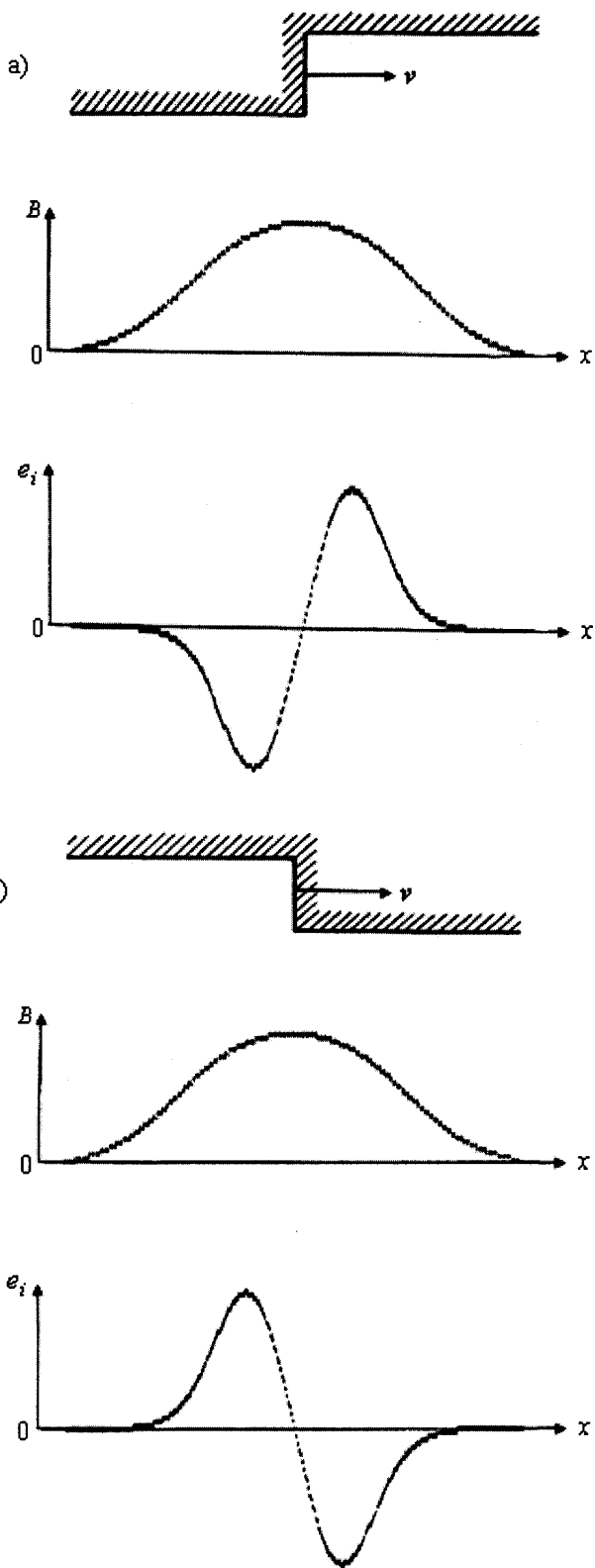


Рис. 2. Формирование электрического сигнала при движении уступа в постоянном магнитном поле:
 а — движение уступа основанием «вперёд»;
 б — движение уступа основанием «назад»

катушке датчика представляет собой последовательность сигналов при движении двух рассмотренных выше уступов (рис. 4,а). При уменьшении d имеет место наложение этих сигналов (рис. 4,б). Мини-

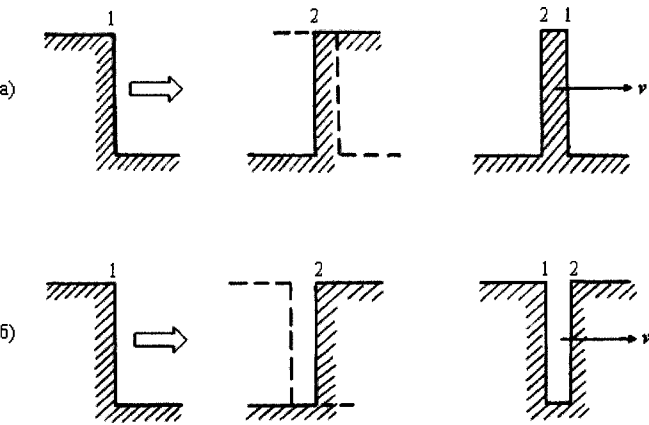


Рис. 3. Моделирование неоднородностей типа «выступ» и «щель»:
 а — схема моделирования выступа;
 б — схема моделирования щели

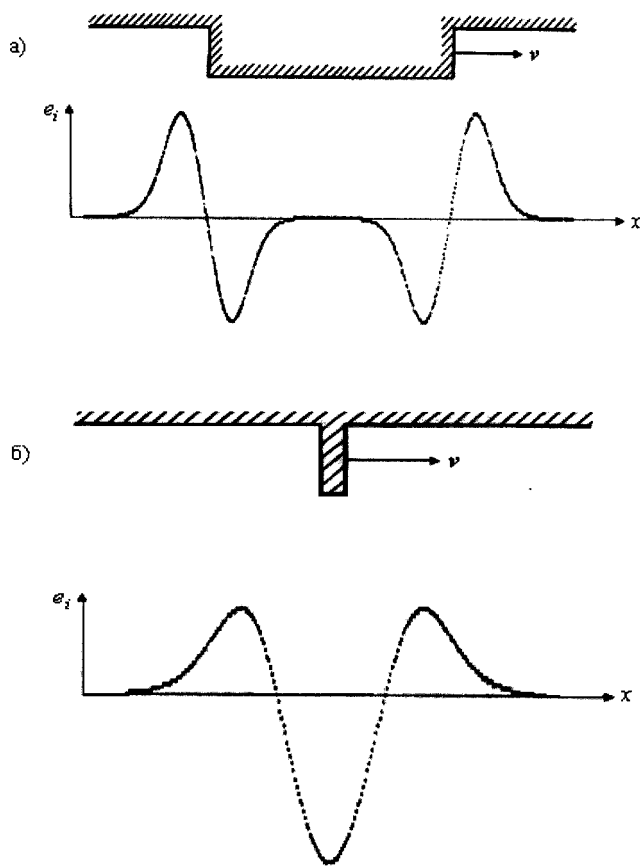


Рис. 4. Формирование электрического сигнала при движении одиночного выступа в постоянном магнитном поле:
 а — широкий выступ ($d \gg a$);
 б — узкий выступ ($d < a$)

мум результирующего сигнала соответствует прохождению центром выступа максимума индукции поля в рабочей зоне.

На рис. 5,а показан сигнал, соответствующий последовательности таких выступов (лопаток), размещённых на расстоянии 30 мм друг от друга — значительно большем, чем для реальной турбины.

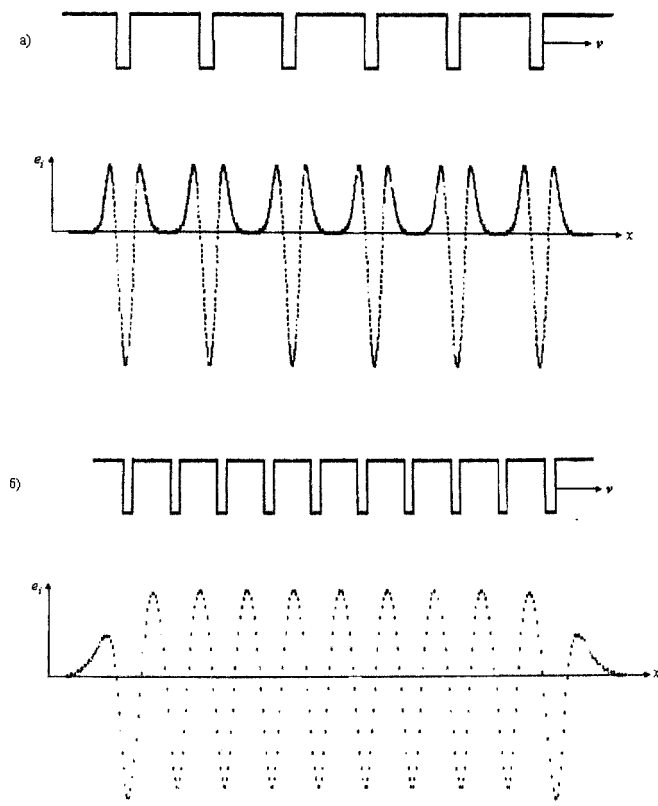


Рис. 5. Формирование электрического сигнала при движении выступов в постоянном магнитном поле ($d < a$):
 а — последовательность одиночных выступов;
 б — последовательность близко лежащих выступов (приближение кондиционного ротора)

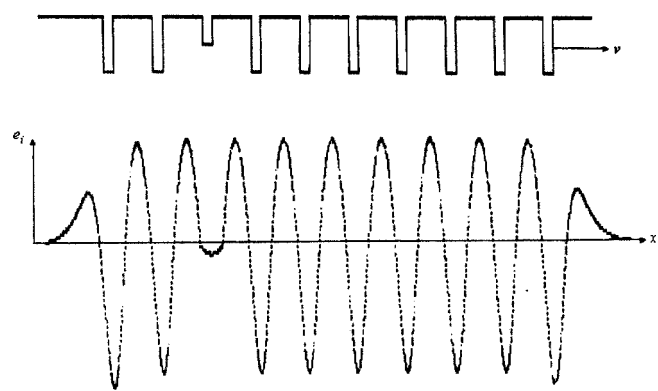


Рис. 6. Приближение некондиционного ротора

При уменьшении этого расстояния экстремальные значения функции (по модулю) выравниваются и результирующий сигнал по форме приближается к гармоническому, причём его максимумы соответствуют моментам прохождения средних точек между выступами зоны наибольшего поля, а минимумы — моментам прохождения середин каждого выступа.

Проведенные расчёты позволили оценить амплитуду ожидаемого сигнала при работе реальной

турбины и установить его форму: $e_{im} \approx (10^{-3} - 10^{-2})$ В, а форма сигнала близка к гармонической.

Аналогичные исследования были проведены для неоднородности типа щели, имитирующей дефект-трещину в теле лопатки (рис. 3, б). Суперпозиция сигналов при движении двух уступов приводит к появлению точно таких же сигналов, как для выступа (рис. 4, б), но обратной полярности.

Моделирование дефектов.

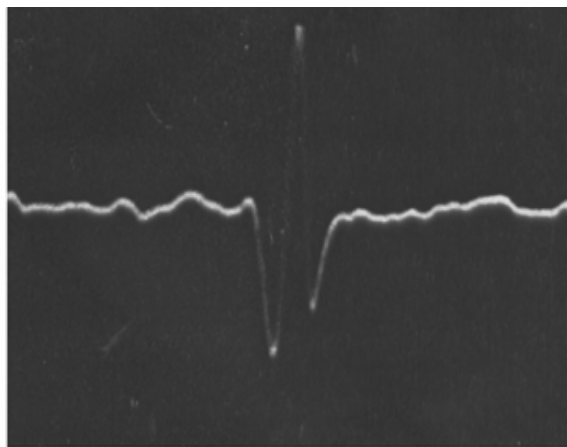
Результаты технологических испытаний

Любое нарушение механической целостности лопаток турбины (трещины, сколы, загибы и т.п.) приводит к искажению сигнала с измерительной катушки датчика по сравнению с сигналом кондиционного ротора турбины. Поэтому представляется целесообразным, используя формулу (5), получить ожидаемую осциллограмму этого сигнала для «типичных» дефектов в лопатке и сравнить её с экспериментальной.

При моделировании скола лопатки геометрический параметр в расчёте был увеличен с 0,012 до 0,015 м, что соответствовало уменьшению высоты лопатки. Соответствующая форма сигнала представлена на рис. 6. Видно, что в зоне «дефектной» лопатки сигнал уменьшается, что вполне соответствует реальной картине при вращении турбины. Однако в реальных случаях дефекты редко сопровождаются уменьшением высоты всей лопатки. Гораздо чаще развиваются трещины, которые пронизывают тело лопатки.

На кафедре физики Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического университета) создана действующая модельная переносная технологическая установка с набором различных образцов, имитирующих лопатки ротора турбины, в том числе с характерными дефектами. Она предназначена для демонстрации, изучения и отработки элементов аппаратуры для реализации технологии контроля лопаток турбины. Масса установки около 30 кг, габаритные размеры $0,2 \times 0,3 \times 0,4$ м, частота вращения ротора до 300 об/с, развиваемая мощность около 260 Вт. Технологическая установка, разработанные датчики и диагностическая аппаратура демонстрировались на Международных выставках «Новые советские технологии» в Москве, Токио, Милане, Сингапуре, Франкфурте в 1990—1991 гг. При исследовании и отработке метода контроля использовались образцы, имитирующие различные дефекты в лопатках, лопатки реальной кондиционной турбины, а также её лопатки с характерными дефектами.

а)



б)

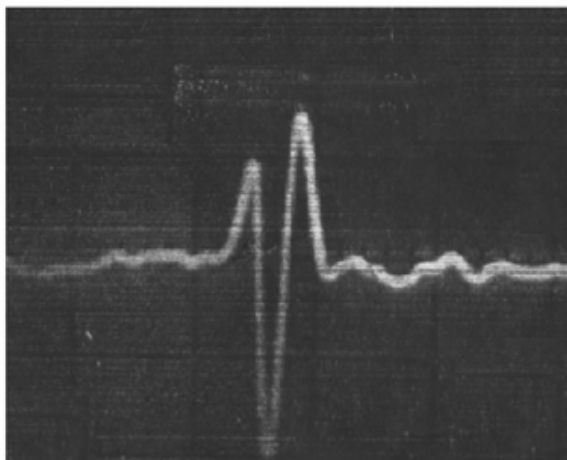


Рис. 7. Осциллограммы сигналов с датчика при моделировании лопатки (а) и щели (б)

На рис. 7 показаны снятые с помощью этой установки осциллограммы сигналов при моделировании типичных неоднородностей лопаток ротора (выступа) и трещины (щели), имеющих одинаковые поперечные сечения. Амплитуды сигналов при вращении образцов с выступом и щелью в условиях эксперимента (частота вращения 150 об/с, $N = 3000$, $r_0 = 25$ мм) были одинаковы и составляли ~25 мВ. Как и следовало ожидать, при практически одинаковой форме сигналов при переходе от выступа к щели его фаза меняется на угол, равный π .

На рис. 8 показаны осциллограммы сигналов, полученные при вращении «одиночных» лопаток реального ротора, имеющих при тех же условиях различную высоту ($h = 15, 19$ и 22 мм, рис. 8, а, б, в соответственно). При вращении лопатки с дефектом (трещина глубиной 4,5 мм в лопатке с $h = 22$ мм) форма сигнала искажается при практически неизменной амплитуде: на «основной» сигнал накладывается сигнал с небольшой амплитудой, соответствующий щели (рис. 8, з).

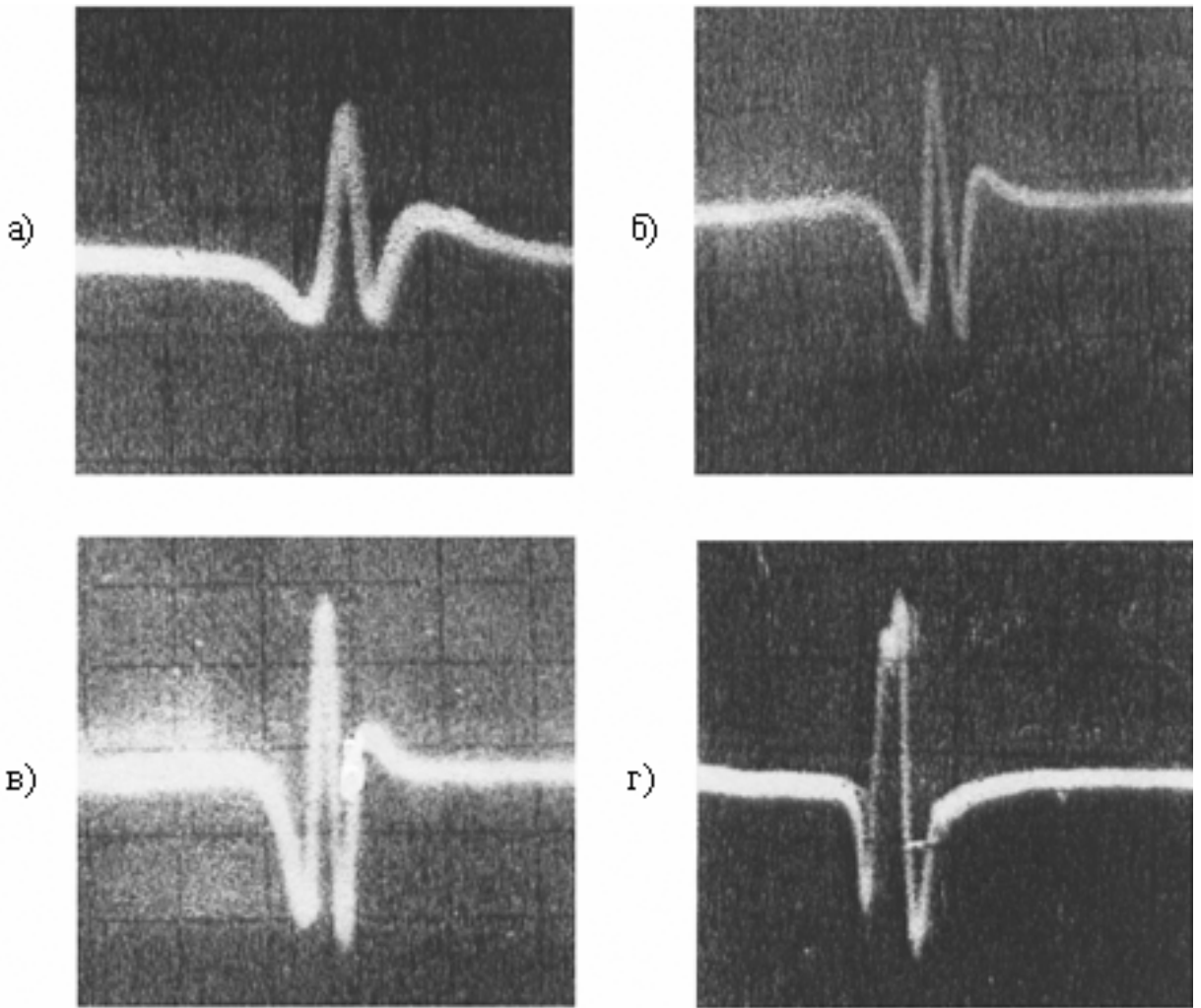


Рис. 8. Осциллограммы сигналов с датчика при вращении ротора турбины авиационного двигателя:
а, б, в — кондиционные лопатки; *г* — лопатка с дефектом

Разрешающая способность средств контроля

Под разрешающей способностью диагностической аппаратуры следует понимать два тесно связанных между собой понятия: минимальный размер дефекта, наличие которого уверенно фиксируется с помощью датчика, и возможность различать близлежащие друг к другу дефекты, т. е. минимальное расстояние между ними.

В рамках описанных выше представлений рассмотрим модель дефекта в электропроводном теле в виде выступа (амплитуды сигналов при движении выступа и щели одинаковы), имеющего форму параллелепипеда с размерами $d \times h \times l$, причём $d, h \ll l$. При движении такого тела со скоростью v в локальном магнитном поле с индукцией B_0 ($v \perp B_0$) можно оценить индукцию вторичного поля:

$$B^* \sim \frac{\mu_0 \mu \gamma B_0 a \lambda dv}{16\pi r^2}, \tag{6}$$

где λ — характерный размер зоны развития вихревых токов в проводящей среде, причём $\lambda \ll l, h$. Величина e_i в витках, площадь которых S , может быть приближённо оценена как

$$|e_i| = \left| -\frac{\partial B^*}{\partial t} \right| NS \sim \frac{\mu_0 \mu \gamma B_0 a \lambda dv^2}{16\pi r^3} NS. \tag{7}$$

Используя характерные значения входящих в это выражение величин

$$B_0 \sim 0,015 \text{ Тл}, \quad S \sim 10^{-4} \text{ м}^2, \quad r \sim 10^{-2} \text{ м},$$

$$\gamma \sim 10^7 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}, \quad N \sim 10^3, \quad v \sim 10^2 \text{ м/с},$$

$$a \sim 0,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad \mu \sim 10^2,$$

получаем следующую оценку величины e_i :

$$e_i \sim 0,3 \times 10^5 \times \lambda d, \tag{8}$$

где произведение λd имеет смысл площади сечения дефекта (щели). Если принять уровень шумов

при современном состоянии электроизмерительной и коммутирующей аппаратуры, например, $\sim 10^{-2}$ В, то минимальный размер площади λd составит $\sim 3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 = 0,3 \text{ мм}^2$, что соответствует, например, глубине трещины 1,5 мм при её ширине 0,2 мм.

Возможность датчика «различать» близлежащие дефекты определяется характерным размером внешнего магнитного поля a . Считая, что эта величина определяет область магнитного поля, в которой $B \geq 0,9B_0$, а также принимая во внимание, что зоной формирования сигнала является величина $2a$, можно показать, что соответствующие сигналы от двух соседних дефектов не сливаются, если они находятся на расстоянии $(1,2-1,5)a$. Например, при использовании постоянного магнита для создания внешнего поля, изготовленного из сплава ЮНДК 35Т (длина 50 мм, диаметр 10 мм, $N = 3000$), характерный размер a по уровню индукции $0,9B_0$ составляет ~ 4 мм. Такой датчик должен фиксировать дефекты, расположенные друг от друга на расстоянии более чем $\sim (5-6)$ мм. Разрешающая способность датчика может быть увеличена, если использовать магнитную систему с меньшей величиной a .

Выводы

Предложен новый метод неразрушающего контроля, основанный на создании в контролируемой зоне электропроводного элемента изделия постоянного магнитного поля и измерении сигналов электромагнитной индукции вторичного магнитного поля, возникающего при относительном движении этого элемента и источника магнитного поля.

Предлагаемая технология обнаружения механических дефектов обеспечивает контроль моментов появления, развития во времени и определения местоположения возникших дефектов и их характера в процессе динамической работы энергоёмких технических объектов. Она может быть использована как при эксплуатации, так и в режиме испытаний новой техники. Особенностью метода является возможность установки первичных преобразователей (датчиков) снаружи изделий на их неподвижных частях, например на корпусе турбины.

Использование новой технологии обнаружения механических дефектов для контроля режимов работы изделия в реальном масштабе времени дает возможность повысить степень безопасности энергоёмких объектов техники и создать надёжную и быстродействующую систему их аварийной защиты.

Summary

A technique is suggested for nondestructive inspection of electroconductive turbine parts in aerospace engineering. The technique is based on generation of static magnetic field in a checked area and transformation of arising secondary magnetic field of whirling currents in this area into electric signals. The obtained results allow to define the form of these signals corresponding to typical defects in rotor blades of the turbine. The techniques of mechanical defect examination, temperature inspection, vibration and other factors supervision implementing for engine parts enable to provide operational emergency protection of the engine.

Библиографический список

1. Сиротин Н.Н., Коровкин Ю.М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1973.
2. Ферстер Ф. Неразрушающий контроль методом магнитных полей рассеяния // Дефектоскопия. 1982. №11.
3. Лозовский В.Н., Бондал Г.В., Каксис А.О., Колтунов А.Е. Диагностика авиационных двигателей. — М.: Машиностроение, 1988.
4. Технические средства диагностики: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1989.
5. Неразрушающий контроль / Под ред. В.В. Сухорукова. Кн. 3. Электромагнитный контроль. — М.: Высшая школа, 1992.
6. Жежеря А.П., Коршаковский С.И., Красненков М.А., Матусевич И.М., Соловьев В.А. Индукционный датчик. Авторское свидетельство СССР №1372260, 1987. Оpubл. в БИ. 1988. №5.
7. Korshakovsky S.I., Krasnenkov M. A. Test Technology of Moving Electric Conductive Component Defects //10th International Trade Fair and Conference, May 8-10, 2001, Exhibition Centre Nuremberg, Germany //MAT-2001 Proceedings, p. 359—362.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 17.10.2007