

4. Буйло С.И., Попов А.В. Акустико-эмиссионный метод оценки параметров процесса накопления повреждений в задаче прогнозирования ресурса изделий ответственного назначения. – Дефектоскопия. 2001. – № 9.
5. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Корн Г. Корн. Т. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 833с.
6. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Советское радио, 1974. – 552с.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 380с.

Р.В. Сахабудинов, А.В. Чукарин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ

В настоящее время метод вихревых токов применяется при неразрушающем контроле в металлообрабатывающей промышленности для обнаружения и классификации дефектов в изделиях, а также в качестве толщиномеров [1, 2]. Теоретические основы метода, в том числе и резонансного метода измерения магнитных характеристик токопроводящих конструкций изложены в [3].

К параметрам, характеризующим напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции, в первую очередь, относятся деформации и возникающие при этом внутренние механические напряжения. Существуют различные методы экспериментального измерения НДС материала конструкций [1]. При этом наиболее отработанными считаются методы непосредственного измерения деформации материала, в первую очередь тензометрические [2, 3], а при необходимости определения механических напряжений производится их расчет по измеренным деформациям. Прямое же измерение механических напряжений менее отработано и может производиться оптическими методами для прозрачных сред, а также ультразвуковыми, рентгеновскими и радиационными для непрозрачных сред.

В данной работе предложено использовать метод вихревых токов для определения механических напряжений, возникающих в конструкционном материале под действием внешних нагрузок при проведении диагностики наиболее ответственных узлов и элементов конструкций машиностроения.

Представленное в работе устройство предназначено для прямого измерения механических напряжений в токопроводящих конструкциях на основе метода вихревых токов [6]. Вихретоковый измеритель позволяет обеспечить контроль внутренних напряжений в конструкциях при их длительной эксплуатации, в том числе и в агрессивных средах, в диапазоне от 0 до 100 МПа с погрешностью не более 100 Па. Отличительными чертами

измерителя являются компактность и сравнительно малая стоимость изготовления.

Электрическое сопротивление металлов R , как правило, уменьшается при приложении к ним внешнего давления P , так как плотность подвижных носителей заряда в единице объема возрастает. Относительное изменение электрического сопротивления металлов при сжатии определено в [4]:

$$\Delta R / R_0 = [R(P) - R_0] / R_0, \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление металла в ненагруженном состоянии; $R(P)$ – сопротивление металла при приложении гидростатического давления.

Изменение сопротивления токопроводящей конструкции при ее сжатии изменяет импеданс катушки индуктивности и соответственно индуктивность измерительного колебательного контура [3]:

$$L = \mu_c AN^2 / l, \quad (2)$$

где μ_c – магнитная проницаемость материала конструкции, изменяемая при нагружении; A – площадь поперечного сечения катушки; l – средняя длина магнитной силовой линии; N – число витков катушки индуктивности.

Таким образом, проведя калибровку измерителя для конкретного материала можно неразрушающим методом определять величину механических напряжений, возникающих в элементах конструкций при эксплуатации и делать выводы о работоспособности объекта. Принцип работы измерителя приведен на рис. 1.

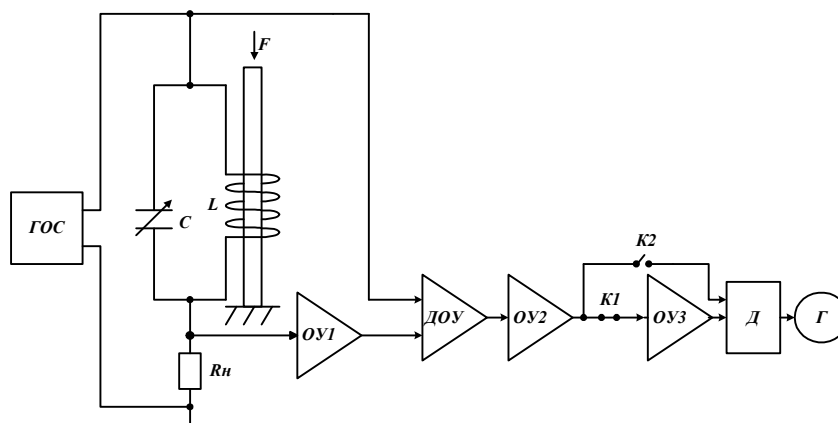


Рис. 1. Блок-схема работы вихретокового измерителя

ГОС – генератор опорного сигнала; L – измерительная катушка индуктивности; C – подстроечный конденсатор резонансного контура; R_n – активное сопротивление нагрузки; ОУ – операционный усилитель; ДОУ – дифференциальный операционный усилитель; Г – гальванометр; Д – детектор; F – внешняя механическая нагрузка; K1, K2 – ключи замыкания цепи.

Колебательный контур LC, состоящий из измерительной катушки индуктивности L и подстроечного конденсатора C, настроен в резонанс с частотой генератора опорных сигналов – ГОС. В резонансе (при ненагруженном металлическом стержне) электрический ток, протекающий по активному сопротивлению нагрузки – R_H , минимальный и по фазе совпадает с напряжением опорного генератора. При сжатии стержня уменьшается его сопротивление и при этом в нем возрастает вихревая компонента электрического тока, что приводит к изменению магнитной проницаемости материала стержня и в конечном итоге – к изменению импеданса измерительной катушки индуктивности. Возрастание индуктивности в колебательном контуре приводит к увеличению электрического тока по сопротивлению R_H и отставанию его по фазе от напряжения ГОС. Падение напряжения на сопротивлении нагрузки R_H усиливается операционным усилителем ОУ1 до величины напряжения ГОС. При ненагруженном стержне напряжение на выходе ОУ1 совпадает по фазе и амплитуде с напряжением ГОС. Оба напряжения подаются на входы дифференциального операционного усилителя – ДОУ. При ненагруженном состоянии стержня сигнал на выходе ДОУ отсутствует, так как напряжения на входах совпадают по фазе и амплитуде. Нагружение стержня приводит к рассогласованию входных напряжений и возникновению напряжения на выходе ДОУ. Этот сигнал, пропорциональный силовому воздействию на конструкцию, с выхода ДОУ усиливается одним – ОУ2 или двумя – ОУ2, ОУ3 операционными усилителями, в зависимости от степени нагружения металлического стержня, затем поступает в детектор – Д, где он выпрямляется и далее идет на гальванометр, калибровка которого проводится для соответствующего материала металлического стержня в единицах механического напряжения – [Па]. К измерителю прилагается таблица с зависимостью показаний гальванометра от соответствующих им значений механических напряжений для конкретного токопроводящего материала.

Глубина проникновения вихревых токов в материал конструкции определяется по зависимости [5]:

$$h_{эфф} = \sqrt{\frac{2}{\pi\gamma\mu\omega}}, \quad (3)$$

где γ – удельная электропроводность; μ – магнитная проницаемость; ω – частота ГОС.

Из (3) видно, что эффективная глубина контролируемого слоя конструкции может регулироваться выбором рабочей частоты – ω ГОС, таким образом, формируя интегральную характеристику механического напряжения в контролируемом объеме конструкции.

Измерительная катушка индуктивности с целью исключения влияния на нее других металлических конструкций и электрических полей помещается в специальный изолирующий металлический экран, изготовленный из отдельных изолированных друг от друга листов медной фольги, что уменьшает влияние вихревой составляющей электрического тока в металлическом экране. Измерительная катушка может плотно охватывать метал-

лическую конструкцию, как сделано в разработанном устройстве (рис. 1), а также может быть вплотную прижата к одной из поверхностей конструкции.

Принципиальная схема вихретокового измерителя разработана на типовых элементах и узлах [6].

Калибровка измерителя проводилась при помощи весового силоизмерительного датчика, нагружение образца и датчика осуществлялось на универсальной разрывной машине УММ-50 с номинальной нагрузкой 20 т, имеющей возможность проводить испытания образцов как на растяжение, так и на сжатие. Величина нагрузки фиксировалась по цифровому терминалу с точностью до 1 кг. Сжатию подвергались цилиндрические образцы из стали-45 и алюминиевого сплава Д16Т диаметром 20 мм и длиной 30 мм, максимальная нагрузка достигала 12 тонн, что соответствует механическому напряжению в образце $\sigma = 100$ Мпа.

В диапазоне от 0 до 3 т работали оба выходных усилителя ОУ2, ОУ3, от 3 до 12 т оконечный усилитель сигнала ОУ3 отключался. На интервале 0-3 т выходной сигнал изменялся от 100 мВ до 3 В, а на интервале 3-12 т от 60 мВ до 2,5В. Градуировка гальванометра проводилась при нагрузке: 0, 100, 500 кг и далее до 12 т с шагом через 1 т с точностью измерения 1 кг. Результаты экспериментальных исследований зависимости показаний гальванометра от внешнего давления на образец представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показания гальванометра, мВ	1	1,5	2,3	3	4,2	4,8	5,0	5,3	5,4	5,9	6,1	6,2	6,4	6,5
Механическое напряжение, 10^6 Па	0,1	0,2	0,5	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Более высокой точности измерения можно достигнуть, сужая диапазон измерения усилий, а также совершенствуя схему преобразования сигнала, уменьшая до минимума шумы и помехи.

Измерение и обработка полученных экспериментальных данных проводились при помощи сопряжения измерителя с осциллографом С1-137/2 и ПЭВМ с программным обеспечением, разработанным в средах Delfi и MathCad.

По результатам эксперимента (табл. 1) построена зависимость, представленная на рис. 2.

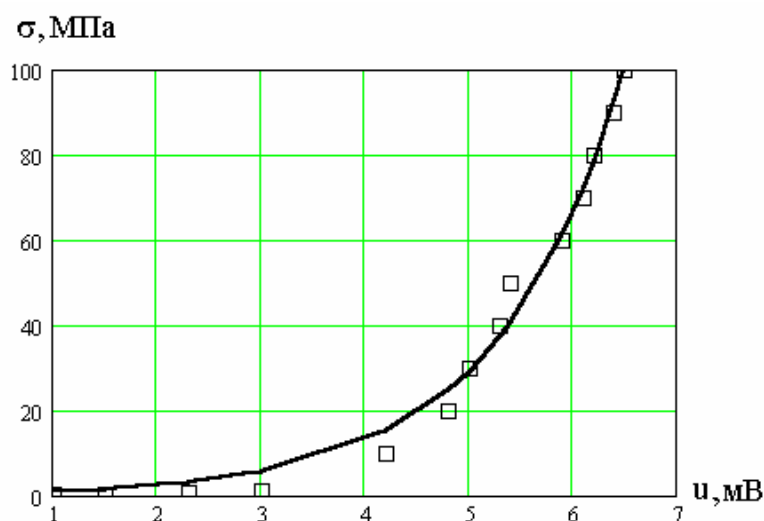


Рис. 2. Зависимость механического напряжения в образце при его осевом сжатии от показаний гальванометра

Представленная на рис. 2 кривая была аппроксимирована экспоненциальной зависимостью следующего вида:

$$\sigma(u) = A \cdot \exp^{K \cdot u}, \quad (4)$$

где A и K – эмпирические коэффициенты: $A=0.47$; $K=0.82$; $\sigma(u)$ – механическое напряжение в образце как функция от показаний гальванометра [МПа]; u – показания гальванометра [мВ].

Таким образом, возможно получение целого ряда эмпирических зависимостей вида (4) для определенного конструкционного материала, что позволит определять механические напряжения, возникающие в материале конструкции и делать выводы о её рабочем состоянии.

Представленный в настоящей работе вихретоковый измеритель для определения механических напряжений в конструкционных материалах может быть использован при диагностике и контроле состояния наиболее ответственных узлов и элементов конструкций машиностроения, подверженных механическим нагрузкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Серьезнов А.Н., Шашурин А.И.* Методы и средства измерений в прочностном эксперименте. –М.: МАИ, 1990.
2. *Мейзда Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений. –М.: Мир, 1990.
3. *Преображенский А.А., Бишард Е.Г.* Магнитные материалы и элементы. –М.: Высшая школа, 1986.
4. Физические величины: Справочник; Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. –М.: Энергоиздат, 1991.
5. Экспериментальная механика. Кн. II. / Под ред. А. Кобаяси. В 2-х книгах. – М.: Мир, 1990.

6. Долгопольй В.Н., Сахабудинов Р.В., Чукарин А.В., Тихомиров А.Г. Вихретовый измеритель механических напряжений в электропроводящих конструкциях // Современные проблемы механики сплошной среды. Труды VII Международной конференции памяти академика РАН И.И. Воровича, Ростов-на-Дону. Т.1. 2001. –С. 52-54.

А.А. Строцев, С.А. Фунтиков, С.В. Сеницын

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
МОДЕЛИ СМЕШАННОГО РАСШИРЕНИЯ МАТРИЧНЫХ ИГР
НЕКЛАССИЧЕСКОГО ТИПА К ЗАДАЧАМ ОПТИМАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ «МНОГОПОЗИЦИОННАЯ
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА – ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ»**

Рассмотренный научно-методический аппарат смешанного расширения матричных игр неклассического типа эффективно может быть применён при решении различных задач оптимизации управления поиском и наблюдениями в многопозиционных информационных системах (МИС) в условиях конфликта [1,2].

Следует отметить, что реальное применение других моделей описания конфликтной ситуации значительно затруднено. В частности, к рассматриваемой конфликтной ситуации теоретически можно применить модели теории дифференциальных игр. Однако получить аналитическое решение для данной задачи в силу её сложности невозможно, а наиболее общий подход к численному решению дифференциальной игры состоит в применении метода динамического программирования в сочетании с той или иной дискретизацией непрерывного процесса. Основная трудность численного решения подобных задач состоит в их многомерности. Поэтому в случае игр нелинейных объектов с большой размерностью обобщённого фазового вектора численное определение оптимальных стратегий весьма проблематично даже при использовании современных ЭВМ.

С другой стороны, классические модели конечных антагонистических игр также имеют определённые ограничения при применении к задачам оптимального управления МИС.

Так, для применения модели матричных игр в чистых стратегиях требуется наличие хотя бы одной седловой точки в матрице игры. Однако наличие седловых точек в матрице игры на практике означает, что игроки имеют такие варианты своих стратегий, что игрок, отклонившийся от неё, получит в процессе реализации игровой ситуации результат хуже [3]. Это, в свою очередь, означает, что путём взаимного последовательного доминирования стратегий в соответствии с методом множеств Парето [4] у игроков должно остаться только по одной стратегии (при наличии одной седловой точки). Но развитие систем вооружения происходит как взаимный процесс создания средств нападения (вариантов применения средств нападения) и защиты от этих средств (вариантов). Следовательно, на каждую стратегию одного игрока, другой игрок формирует свою стратегию наи-