УДК 004.942

К.И. Хан, М.А. Кажмаганбетова, Т.Н. Зайченко

Концептуальная модель комплекса программ для проектирования акустико-эмиссионной системы диагностики

Представлена обобщенная схема акустико-эмиссионной системы диагностики и предложен комплекс программ для ее проектирования. Выполнено моделирование распространения акустической волны в COMSOL Multiphysics на примере плоской задачи в различных условиях и показано совпадение результатов с системой COSMOS/M.

Ключевые слова: система диагностики, акустическая эмиссия, модель, компьютерное моделирование, комплекс программ.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-4-51-56

Контроль и диагностика целостности механической части технических систем в течение всего жизненного цикла является актуальной задачей. С этой целью используются методы и средства диагностики, основанные на различных физических принципах действия.

Одним из перспективных методов диагностики является метод акустической эмиссии, заключающийся в сборе и анализе параметров акустических волн в среде с целью обнаружения развивающихся дефектов [1, 2]. Его достоинства связаны с возможностью получения информации без вмешательства в конструкцию и непрерывность мониторинга контролируемого объекта в процессе эксплуатации. К недостаткам относятся: быстрое ослабление акустических волн при прохождении по конструкции, высокая зависимость результатов измерения от фонового шума, невозможность точного сопоставления акустико-эмиссионных характеристик с типом неисправности. В настоящее время данный метод используется для контроля технического состояния широкого класса машин и механизмов. В связи с совершенствованием электронной компонентной базы, появлением новых датчиков, технологических процессов и объектов контроля процесс модернизации существующих и разработки новых систем, методов и алгоритмов диагностики продолжается. В настоящей работе на основании анализа задач проектирования систем диагностики и программных средств моделирования акустической эмиссии рассматривается концептуальная модель комплекса программ проектирования акустико-эмиссионной системы диагностики (АЭСД).

Обобщенная схема и задачи проектирования акустико-эмиссионной системы диагностики

Система диагностики – это телеметрическая система, на нижнем уровне которой происходит сбор, преобразование, обработка и хранение первичной информации об объекте контроля, а на верхнем – их последующая обработка и интерпретация с целью определения контролируемых параметров и дефектов (рис. 1).

Для интерпретации результатов измерений и разработки алгоритмов диагностики рекомендуется

использовать [1] экспериментальные данные о процессе функционирования в различных режимах, штатных и аварийных состояниях. Поэтому программные средства верхнего уровня содержат базы данных и знаний.

Модель комплекса программ проектирования акустико-эмиссионной системы диагностики

В процессе разработки АЭСД возникают задачи выбора мест установки датчиков и их типа, проектирования аппаратно-программных средств нижнего и верхнего уровня. Наиболее сложными являются задачи выбора типа и мест размещения датчиков, разработки алгоритмов интерпретации экспериментальных данных и диагностики дефектов [3]. Решение данных задач предполагает использование методов и средств компьютерного моделирования и оптимизации. Концептуальная модель комплекса программ проектирования АЭСД представлена на рис. 2.

Центральной частью комплекса являются средства моделирования акустической эмиссии 1 и оптимизации 2. Для создания геометрической модели объекта диагностики, источников АЭ и датчиков предназначены средства геометрического моделирования 3. Результатом моделирования деформации объекта с датчиками и АЭ являются: смещения Δ и мгновенные ускорения ϵ , деформации δ , акустическое давление P , сигнал на выходе датчиков u , i . На основании анализа данной информации принимается решение о правильности выбора количества и местоположения датчиков. Для проектирования аппаратно-программных средств используются САПР электронных схем 4.1 и 4.2, например Altium Designer [4].

Как указывалось, выше, для разработки алгоритмов диагностики рекомендуется использовать экспериментальные данные, которые являются результатами как физического, так и вычислительного эксперимента. Для хранения данных, как первичных, так и преобразованных, предусмотрена база данных и знаний 5.

Обработка и анализ данных осуществляются в блоке 6. Он служит для разработки алгоритмов диагностики. Блок может быть реализован на базе системы MATLAB/Simulink [13].

Рис. 1. Обобщенная схема АЭСД

Рис. 2. Обобщенная структура комплекса программ для проектирования АЭСД

Сравнительный анализ программных средств для моделирования АЭ

Теоретической основой моделирования АЭ являются теория упругости и методы решения волнового уравнения (1) [5]:

$$\frac{\partial^2 g}{\partial t^2} = a^2 \left(\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} \right) + f, \quad (1)$$

где $g(x, y, z, t)$ – неизвестная функция, определяющая отклонение точки пространства с координатами x, y, z в момент времени t от положения равновесия; f – вынуждающее воздействие; a – константа, характеризующая свойства материала.

В связи со сложностью объектов контроля и процессов распространения акустических волн для решения практических задач используются численные методы и программные средства моделирования. Численными методами решения волновых уравнений (1) во временной области являются методы конечных элементов и конечных разностей [6–8].

Численному моделированию процесса распространения акустических волн посвящено достаточно большое число работ. В основном для моделирования линейных и нелинейных акустических процессов в твердых и текучих средах используется программный комплекс COSMOS/M (Structural Research & Analysis Corporation) [9, 10]. Аналогичные возможности имеются в системе COMSOL Multiphysics (COMSOL Inc.) с модулем Pressure acoustic [11, 12].

Процесс моделирования состоит из следующих основных этапов:

- построение геометрической модели объекта контроля и дефекта, задание технических показателей материалов;
- задание граничных условий;
- выбор режима анализа (во временной либо частотной областях);
- задание пространственной сетки;
- расчет и представление результатов.

Для создания геометрических моделей COSMOS/M имеет интерфейс с САПР Autodesk Inventor, Solid Edge и SolidWorks, а COMSOL Multiphysics – с Autodesk Inventor и SolidWorks. Эта информация доступна из эскизов и конструкторских чертежей. К техническим показателям материалов, использующихся в акустических моделях, относятся плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, скорость распространения звука. Последняя – для изотропных материалов задается одним значением для всей геометрической модели, а для анизотропных – для каждой элементарной области индивидуально. При отсутствии справочных данных о параметрах материалов необходима постановка экспериментов с целью их определения. В противном случае модель будет неадекватной. При задании граничных условий определяются свободные грани, смещение которых совпадает со смещением соседних элементарных областей, и грани с фиксированным положением, от которых волна отражается. Угол отражения и изменение свойств волны зависят от геометрии грани и характеристик набегающей на эту грань волны.

Для изучения акустических процессов некоторые свободные грани могут быть подвержены внешнему воздействию, подчиняющемуся определенному закону. Воздействие может быть любого вида: гармоническое, циклическое, импульсное, постоянное и т.д. В COMSOL Multiphysics это воздействие определяется как функция зависимости смещения свободной грани от времени, кроме того, в этой функции могут быть использованы любые переменные, использующиеся в процессе вычисления модели.

Результатом численного моделирования является набор данных, представляющих собой векторные поля смещений Δ , деформаций δ , акустического давления P , мгновенных ускорений и пр. в дискретные моменты времени с заданным шагом. Результаты расчетов могут быть представлены в виде двумерной или трехмерной поверхности, определяющей величину исследуемого параметра в любой точке геометрической модели в заданный момент времени. Представления в каждый момент времени могут быть объединены в анимацию, позволяющую наблюдать процесс распространения волны в динамике. С целью последующей обработки результатов моделирования COMSOL Multiphysics имеет интерфейс с системой MATLAB/Simulink [13].

Моделирование распространения акустической волны в плоском объекте в COMSOL Multiphysics

В качестве тестового примера рассматривается моделирование акустической волны в стальной пластине размером 1×1 м², рассмотренное в работе [9]. Технические показатели материала: модуль упругости – $2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,28, плотность – $7,9 \cdot 10^3$ кг/м³; скорость звука в стали – $5,2 \cdot 10^3$ м/с.

Граничные условия имеют вид:

- левая грань обладает двумя степенями свободы, верхняя и нижние грани имеют одну степень свободы – вдоль оси X (горизонтальной оси);
- к правой грани приложена сила величиной 1 кН, действующая в направлении центра пластины в течение 10 мкс.

Для решателя заданы: относительная точность 0,1% и переменный шаг решения модели. Результаты моделирования стальной пластины – x -компонента поля смещения элементарных областей относительно положения равновесия – представлены на рис. 3.

Из рис. 3, а видно, что волновой фронт при $t = 100$ мкс достигает середины объекта, что соответствует теоретическому расчету для распространения звука в стали. Изменив граничные условия так, что смещение верхней грани вдоль оси X равно нулю, получим результаты, представленные на рис. 3, б. Запрет перемещения верхней грани привел к возникновению переотражений акустической волны и к изменению поля смещения [9]. Результаты для случая приложения силы к точке вдоль правой грани и по нормали к ней приведены на рис. 3, в. В результате формируются две зоны деформации с противоположными знаками.

Рис. 3. Результаты моделирования пластины в COMSOL Multiphysics – x -компонента поля смещения δ_x , нм:
 а – со свободными верхней и нижней границами; б – с фиксированной верхней границей;
 в – с приложением силы к точке вдоль правой грани

На рис. 4 приведены результаты моделирования пластины с геометрическим концентратором (отверстием) диаметром 5 см по центру. Сила приложена к боковым граням по направлению внутрь, нижняя грань зафиксирована вдоль оси Y , верхняя грань имеет все степени свободы. Плотность механической энергии в момент времени 150 мкс представлена на рис. 4, а. По результатам видно, что скорость распространения волны соответствует теоретической скорости. Возле отверстия наблюдается сложение волн, что приводит к эффекту концентрации напряжения вблизи отверстия. На рис. 4, б. представлена поверхность, иллюстрирующая механическое напряжение фон Мизеса вблизи геометрического концентратора в виде трещины в момент времени $t = 100$ мкс. Воздействие приложено к точке разрыва атомарной связи и моделирует возникающее при этом высвобождение квантиля энергии. Продольная волна распространяется вдоль разорвавшейся связи, но при этом наблюдается и поперечная волна, распространяющаяся в перпендикулярном направле-

нии. С помощью такого представления о разрыве атомарных связей можно описать дискретный характер генерации акустической волны. Определение и исследование параметров такой волны позволяют определить скорость роста трещины и её расположение.

Заключение

Для моделирования процесса распространения акустических волн можно использовать как систему COSMOS/M, так и COMSOL Multiphysics. Тестирование COMSOL Multiphysics показало совпадение с результатами расчетов в COSMOS/M.

Использование COMSOL Multiphysics является более предпочтительным при моделировании и проектировании систем диагностики, поскольку в ней имеется интерфейс с системой MatLab/Simulink, что позволяет использовать возможности MATLAB/Simulink для моделирования средств сбора и обработки данных и разработки алгоритмов диагностики.

Предложена концептуальная модель комплекса программ проектирования акустико-эмиссионных систем диагностики.

Рис. 4. Результаты моделирования пластины с концентратором в COMSOL Multiphysics: *а* – плотность энергии при $t = 150$ мкс; *б* – напряжение вблизи трещины при $t = 100$ мкс

Литература

- ГОСТ Р ИСО 22096–2015. Контроль состояния и диагностика машин. Метод акустической эмиссии. – М.: Стандартинформ, 2019. – 11 с.
- Eaton M.J. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping / M.J. Eaton, R. Pullin, K.M. Holford. – Cardiff, UK: Cardiff School of Engineering, 2011. – P. 856–863.
- Blitz J. Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing // J. Blitz, G. Simpson. – New York, US: Springer-Verlag, 1991. – 264 p.
- Сабунин А.Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. – М.: Солон-Пресс, 2009. – 432 с.
- Владимиров В.С. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1981. – 512 с.
- Самарский А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
- Штеттер Х. Анализ методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1978. – 461 с.
- Morton K.W. Numerical Solution of Partial Differential Equations / An Introduction. – Cambridge: Cambridge university press, 2012. – 105 p.
- Сыч Т.В. Совершенствование технологии акустико-эмиссионного контроля на основе конечно-элементного анализа акустического тракта: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: Сибирский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 149 с.
- Девятков С. Программы семейства COSMOS – универсальный инструмент конечно-элементного анализа // CADmaster. Машиностроение, 2002. – № 1. – URL:

https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_11_cosmos.html (дата обращения: 15.08.2020).

11. COMSOL Documentation. – URL: <https://www.comsol.com/documentation>. (дата обращения: 15.08.2020).

12. Tabatabain M. COMSOL for Engineers. – Dulles, US: Mercury Learning & Information, 2014. – 254 p.

13. Дьяконов В.П. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В.П. Дьяконов, И.В. Абраменкова. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

Хан Кирилл Иннокентьевич

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-983-349-26-58

Эл. почта: kazmorebig@ya.ru

Кажмаганбетова Малика Аскарровна

Аспирант каф. КСУП ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-960-977-44-87

Эл. почта: malikauku@gmail.com

Зайченко Татьяна Николаевна

Д-р техн. наук, проф. каф. КСУП ТУСУРа

Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7 (382-2) 41-47-17

Эл. почта: ztntomsk@rambler.ru

Khan K.I., Kazhmaganbetova M.A., Zaichenko T.N.

Conceptual model of software to develop acoustic emission diagnostic system

A generalized diagram of an acoustic emission diagnostic system is presented and a set of programs for its design is proposed. The propagation of an acoustic wave simulation is carried out by COMSOL Multiphysics in plane case under various conditions and the coincidence of the results with the COSMOS / M modelling system results is shown.

Keywords: diagnostic system, acoustic emission, model, computer modelling, software package.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-4-51-56

References

1. ISO 22096:2007. *Condition monitoring and diagnostics of machines. Acoustic emission method*. M.: Standartin-form, 2019, 11 p. (in Russ.).

2. Eaton M.J. *Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping*. Cardiff School of Engineering, 2011, pp. 856–863.

3. Blitz J. *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*. New York, US: Springer-Verlag, 1991, 264 p.

4. Sabunin A.E. Altium Designer. *Novye resheniya v proektirovanii elektronnykh ustroystv* [Altium Designer. New solutions in the design of electronic devices]. Moscow, Solon-Press, 2009, 432 p. (in Russ.).

5. Vladimirov V.S. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Vladimirov V.S. Equations of mathematical physics.] Moscow, Science, 1981, 512 p. (in Russ.).

6. Samarskiy A.A., *Metody resheniya setochnykh uravnenij* [Samarskiy A.A., Methods for solving grid equations]. Moscow, Science, 1978, 592 p. (in Russ.).

7. Shtetter H. *Analiz metodov diskretizatsii dlya obyknovennykh differentsial'nykh uravnenij* [Stetter H. Analysis of discretization methods for ordinary differential equations]. Moscow, World, 1978, 461 p. (in Russ.).

8. Morton K.W. *Numerical Solution of Partial Differential Equations. An Introduction*. Cambridge university press, 2012, 105 p.

9. Sych T.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii akustiko-emissionnogo kontrolya na osnove konechno-elementnogo analiza akusticheskogo trakta* [Improving the technology of acoustic emission control based on finite element analysis of the acoustic tract. Cand. Diss.], Novosibirsk: Siberian transport university, 2016, 149 p. (in Russ.).

10. Devyatov S. *Programmy semeystva COSMOS – universal'nyj instrument konechno-elementnogo analiza*. [Devyatov S. Programs of the COSMOS family - a universal tool for finite element analysis]. Available at: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_11_cosmos.html (Accessed: 15 August 2020) (in Russ.).

11. COMSOL Documentation. Available at: <https://www.comsol.com/documentation> (Accessed: 15 August 2020).

12. Tabatabain M. COMSOL for Engineers. *Mercury Learning & Information*, 2014. 254 p.

13. D'yakonov V.P. *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazhenij* [Signal and image processing. Special reference]. St. Petersburg, Peter, 2002. 608 p. (in Russ.).

Kirill I. Khan

Postgraduate student, Faculty of Computer Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7-983-349-26-58

Email: kazmorebig@ya.ru

Malika A. Kazhmaganbetova

Postgraduate student, Faculty of Computer Systems, TUSUR

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7-960-977-44-87

Email: kazmorebig@ya.ru

Tatyana N. Zaichenko

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Faculty of Computer Systems, TUSUR

40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050

Phone: +7 (382-2) 41-47-17

Email: ztntomsk@rambler.ru