

вул. Чкалова, 17, м. Харків, Україна 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.

Колоскова Анна Николаевна – кандидат технических наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», доцент кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем; ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.

Koloskova Ganna – candidate of technical science, associate professor, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”; Chkalova str., 17, Kharkov, Ukraine 61070; e-mail: g.koloskova@khai.edu.

УДК 62–278

С. В. САВЧЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДЕФЕКТОВ КАК ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Рассматривается математическое обеспечение построения моделей определения координат источников акустической эмиссии и алгоритмов поиска дефектов. Показано, что параметры сигналов акустической эмиссии связаны с локальными перестройками структуры материалов и процессами движения дислокаций. Предложены формулы локализации источников акустической эмиссии. Построения модели определения координат дефектов по источникам сигналов акустической эмиссии показывает, что вопросы зависимости параметров волны эмиссии от размеров дефектов, материалов, величины нагрузки и т.д. постоянно находятся в центре внимания.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, контроль сварных швов, баллистическая сталь, пьезодатчик, неразрушающий контроль, средство защиты.

Розглядається математичне забезпечення побудови моделей визначення координат джерел акустичної емісії і алгоритмів пошуку дефектів. Показано, що параметри сигналів акустичної емісії пов'язані з локальними перебудовами структури матеріалів і процесами руху дислокацій. Запропоновано формули локалізації джерел акустичної емісії. Побудови моделі визначення координат дефектів за джерелами сигналів акустичної емісії показує, що питання залежності параметрів хвиль емісії від розмірів дефектів, матеріалів, величини навантаження і т.д. постійно знаходяться в центрі уваги.

Ключові слова: акустична емісія, контроль зварних швів, балістична сталь, пьезодатчик, неруйнівний контроль, засіб захисту.

The mathematical support for the construction of models for determining the coordinates of acoustic emission sources and defect search algorithms is considered. It is shown that the parameters of acoustic emission signals are associated with local rearrangements of the structure of materials and dislocation movement processes. Formulas for localization of sources of acoustic emission are proposed. The use of acoustic emission methods in non-destructive testing devices allows monitoring various shapes and sizes of metal structures. The application of acoustic emission methods for non-destructive testing of metal structures in most cases reduces to determining the location of the defect. According to the acoustic signal of the defect, which can be detected remotely, one can find the location of this defect by processing the difference in the arrival time of the wave.

Keywords: acoustic emission, control of welded seams, ballistic steel, piezoelectric sensor, non-destructive testing, protective equipment.

Введение. Акустическая эмиссия (АЭ) представляет собой явление генерации волн напряжений, вызванных внезапной перестройкой в структуре материала. Классическими источниками АЭ является процесс деформирования, связанный с ростом дефектов, например, трещины или зоны пластической деформации. Внезапное движение источника эмиссии вызывает возникновение волн напряжений, которые распространяются в структуре материала и достигают пьезоэлектрического преобразователя. По мере роста напряжений активизируются многие из имеющихся в материале объекта источников эмиссии. Электрические сигналы эмиссии, полученные в результате преобразования датчиком волн напряжений, усиливаются, регистрируются аппаратурой и подвергаются дальнейшей обработке и интерпретации.

Актуальность темы. Использование методов акустической эмиссии в устройствах неразрушающего контроля позволяет вести мониторинг разнообразных по форме и размерам металлических конструкций. Применение методов акустической эмиссии для неразрушающего контроля металлических конструкций в большинстве случаев сводится к определению места дефекта. По акустическому сигналу дефекта, который может быть обнаружен дистанционно можно найти расположение этого дефекта путем обработки разницы времени прихода волны.

Итак, источником акустико-эмиссионной энергии

служит поле упругих напряжений в материале. Без напряжений нет и эмиссии, поэтому АЭ контроль обычно проводится путем нагружения контролируемого объекта. Это может быть проверочный контроль перед запуском объекта, контроль изменений нагрузки во время работы объекта, испытания на усталость, ползучесть или комплексное нагружение. Очень часто конструкция нагружается произвольным способом. В этом случае использование АЭ контроля позволяет получать дополнительную ценную информацию о поведении конструкции под действием нагрузки. В других случаях эмиссия используется по причинам экономичности и безопасности. Для таких задач разрабатываются специальные процедуры нагружения и тестирования.

Акустическая эмиссия взаимосвязана с другими методами контроля. Так, акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля (МНК) в двух ключевых аспектах. Во-первых, источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, т.е. метод является пассивным (а не активным, как большинство других методов контроля). Во-вторых, в отличие от других методов АЭ обнаруживает движение дефекта, а не статические неоднородности, связанные с наличием дефектов, т.е. АЭ обнаруживает развивающиеся, а потому наиболее опасные дефекты. Перечень основных отличий приведен в табл. 1.

© С. В. Савченко. 2017

Таблица 1 – Сравнение характеристик АЭ метода контроля с другими методами НК

Акустическая эмиссия	Другие МНК
Обнаруживает движение дефектов	Обнаруживают геометрическую форму дефектов
Требует нагружения	Не требуют нагружения
Каждое нагружение уникально	Контроль воспроизводим
Чувствителен к структуре материала	Менее чувствительны к материалу
Менее чувствительны к геометрии	Более чувствительны к геометрии
Требует меньших усилий при проведении контроля продукции/процессов	Требуют больших усилий при проведении контроля продукции/процессов
Требует доступ только в местах установки датчиков	Требуют доступ ко всей поверхности объекта
Контролирует конструкцию за один цикл нагружения	Постепенное сканирование участков конструкции
Основные проблемы: сильное влияние шума	Основные проблемы: сильное влияние геометрии

Акустическая эмиссия отличается от большинства методов неразрушающего контроля в трех ключевых аспектах:

– источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, т.е. метод является пассивным;

– в отличие от других методов акустическая эмиссия обнаруживает развивающиеся наиболее опасные дефекты;

– метод является дистанционным, т. к. не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов, а лишь правильного размещения датчиков на поверхности объекта для осуществления локализации источника акустического сигнала.

Анализ возникновения сигналов акустической эмиссии с точки зрения математической теории упругости позволяет сделать предположение о возможности модельного представления развития дефектов.

Параметры сигналов АЭ, связанных с локальными перестройками структуры материалов, взаимосвязаны с параметрами кинетики развития дефектов и разрушения материала. Одним из источников деформационных сигналов являются процессы движения дислокаций.

Частотный спектр сигналов акустической эмиссии простирается от области слышимых частот до десятков и сотен мегагерц. Известно, что пластические и прочностные свойства материала определяются наличием в нем дислокации. В зависимости от направления обрыва атомной плоскости к дислокациям приписывают положительный и отрицательный знак. Их взаимодействие обуславливается упругими напряжениями, вызываемыми каждой дислокацией. Ускоренное движение и аннигиляция дислокаций вызывают акустические импульсы.

Как известно, среди МНК не существует ни одного такого метода, который мог бы решить проблему оценки целостности объекта оптимально с учетом таких основных факторов, как получение наиболее низкой себестоимости работ и достижение технической адекватности результатов контроля. Лучшим решением проблемы является применение комбинации различных методов НК. Благодаря тому, что АЭ резко отличается по своим возможностям от традиционных методов контроля, на практике оказывается очень полезным совмещать АЭ с другими методами.

Основное преимущество метода АЭ связано с возможностью проведения неразрушающего контроля всего объекта целиком за один цикл нагружения. Данный метод является дистанционным, он не требует

сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов. Необходимо просто правильным образом расположить нужное число датчиков и использовать их для осуществления локализации источника волн напряжений. Возможности, связанные с дистанционным использованием метода, дают большие преимущества по сравнению с другими методами контроля, которые требуют, например, удаления изоляционных оболочек, освобождения контейнеров контроля от внутреннего содержания или сканирования больших поверхностей.

При тестировании продукции метод АЭ используется для проверки и контроля сварных соединений, термически сжатых бандажей. Метод также используется во время операций, связанных с формообразованием, таких как уплотнение или при прессовании. В целом АЭ контроль может применяться во всех случаях, когда имеют место процессы нагружения, приводящие к постоянному деформированию материалов. В основном при тестировании конструкций АЭ используется для контроля сосудов давления [1], хранилищ труб и трубопроводов, авиационных и космических аппаратов [2], электрических заводов, мостов, железнодорожных цистерн и вагонов, грузовых транспортных средств, а также многих других типов объектов. АЭ контроль производится и на новом, и на бывшем в эксплуатации оборудовании. Он включает обнаружение трещин, сварных дефектов и др.

Процедуры, связанные с использованием АЭ метода, были опубликованы Американским обществом инженеров механиков (American Society Mechanical Engineering – ASME), Американским обществом контроля и материалов (American Society for Testing and Materials – ASTM) и другими организациями. Успешные результаты конструкционного тестирования можно наблюдать в тех случаях, когда возможности и достоинства метода АЭ правильно используются в конкретном тексте исследований и когда применяются корректные технические решения и специализированное оборудование АЭ [3].

Акустико-эмиссионная аппаратура является чрезвычайно чувствительной к любым видам структурных перемещений в широком частотном диапазоне работы (обычно от 20 до 1200 кГц). Оборудование способно регистрировать не только рост трещин или развитие пластической АЭ метода контроля: контроль процесса сварки, износа и соприкосновения оборудования при автоматической механической обработке, потерь смазки на объектах, связанных с вращением

[4]; контроль износа и потерь смазки на объектах, связанных с вращением и трением компонент [5]; детектирование потерянных частей и частиц оборудования [6]; обнаружение и контроль течей, кавитации и потоков жидкости в объектах [6, 7]; контроль химических реакторов, включающий контроль коррозионных процессов, жидко– твердого перехода, фазовых превращений [8–10].

Когда процессы типа ударов, трения, течей и другие возникают на фоне контроля развития трещин и коррозии, они становятся источниками нежелательных шумов. Поэтому было предложено множество различных технических решений с целью снижения и избавления от этих шумовых помех. Следует заметить, что шумы являются основной преградой на пути широкого использования АЭ в качестве метода контроля. Важной задачей является их исследование и по возможности устранение с целью повышения чувствительности метода.

В последние годы ведущие лаборатории добились значительных успехов при решении проблем количественной оценки величины прироста трещины, ее ориентации и временных характеристик сигналов АЭ для случаев простейшей геометрии объектов [11, 12]. Для этих целей используются высокочувствительные датчики и производится анализ лишь начальной части сигнала, которая записывается со всеми необходимыми подробностями с помощью высокоточной аппаратуры. Сегодня можно ожидать, что полученные научные результаты принесут свои плоды также и в прикладных областях использования метода АЭ.

Математическая модель обнаружения дефектов основывается на существовании однозначной зависимости между напряжениями в среде и смещениями при наличии развивающегося дефекта:

$$U(r, t) = f\left(\frac{1}{\sqrt{r}}, t, \Delta t, p, l, \Delta l\right), \quad (1)$$

где $U(r, t)$ – смещение точек среды, r – расстояние от датчика до источника сигнала, t – время зарождения сигнала, Δt – время принятия сигнала датчиком акустической эмиссии, p – скачок напряжений на границе субмикротрещин, l – размер дефекта, Δl – приращение размера дефекта в процессе развития.

Анализ экспериментального и теоретического материала обнаружил ряд трудностей и ограничений в использовании предлагаемой модели:

- интенсивность сигналов акустической эмиссии в динамическом развитии дефектов различна;
- сигналы акустической эмиссии обладают большим диапазоном изменения характерных параметров;
- значения параметров сигналов акустической эмиссии при внутренней перестройке структуры материала и его дефектности носят стохастический характер с различными законами распределения вероятностей.

Важным информативным параметром сигнала служит степень локализации источника сигнала. Степень локализации дефекта определяется измерением

координат источника акустической эмиссии. В основу метода определения координат положено измерение разности времени прихода импульсов акустической эмиссии к нескольким разнесенным в пространстве точечным акустическим датчикам, регистрирующим акты акустической эмиссии. Датчики в своем расположении могут образовывать сетку, опоясывающую всю конструкцию.

Для определения координат дефектов, т. е. локализации источников акустической эмиссии датчики устанавливаются в определенной конфигурации, которая образует так называемую антенную решетку. По взаимному расположению различают зональную, линейную, плоскостную и объемную схемы локации.

Зональная локация подразумевает такую расстановку датчиков, при которой сигнал из любой точки контроля доходит хотя бы до одного датчика. Она применяется при проведении испытаний, когда не требуется определение места расположения источников акустической эмиссии.

При линейной схеме сигнал из любой точки контроля воспринимается минимум двумя датчиками. Плоскостные схемы размещения датчиков требуют выполнения регистрации сигналов минимум тремя датчиками, объемные – четырьмя.

Алгоритмы расчета координат дефекта основаны на определении разности времени прихода фронта акустической волны к нескольким приемникам акустической эмиссии.

Наиболее точную информацию об источнике акустической эмиссии дает датчик, который является самым близким к нему.

Строение типовых схем. Объекты, для которых допустимо определение только одной координаты, т.е. таких, у которых один размер (длина) во много раз больше других размеров (ширины и толщины), являются линейными.

Для определения одной координаты достаточно измерить одну разность времени прихода, следовательно, достаточно двух приемников.

Если начало отсчета выбрать посередине между приемниками, т.е. , то на счетчике разности времени прихода будет фиксироваться координата источника в масштабе с коэффициентом $2f/V$. Если частоту генератора заполняющих импульсов f подобрать численно равной $V/2$, то на счетчике разности времени прихода можно получить координату x в виде:

$$x = (x_0 + x_1 + V\Delta t) / 2, \quad (2)$$

где x_0 и x_1 – соответственно координаты нулевого и первого приемников, а V – скорость распространения волн акустической эмиссии.

Для случая двухмерных объектов функция расстояния до источника акустической эмиссии имеет вид:

$$R(x, y) = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}, \quad (3)$$

Следовательно, определение координат для этого случая сводится к решению уравнения следующего вида:

$$VT_0 + V\Delta t_i \sqrt{(x-x_i)^2 - (y-y_i)^2}, \quad (4)$$

То есть для определения координат на плоскости необходимо измерить две независимых разности времен прихода. Для этого достаточно расположение на контролируемой поверхности трех приемников акустической эмиссии (рис. 1)

$D_0(0;0)$, $D_1(x_1; y_1)$, $D_2(x_2; y_2)$.

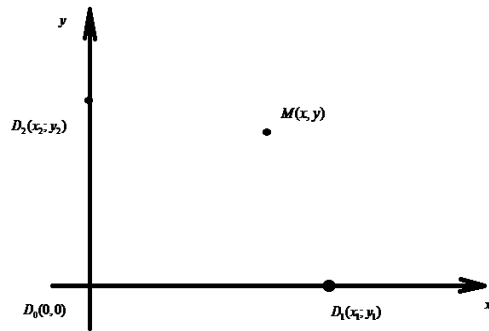


Рис. 1. – Расположение трех датчиков

Формулы для определения координат источник $M(x; y)$ находятся при использовании следующих обозначений:

$$VT_0 = R, \quad (5)$$

$$VT_1 = R + r_1, \quad (6)$$

$$VT_2 = R + r_2, \quad (7)$$

При расположении начала координат в точке приемника D_0 получим систему уравнений следующего вида:

$$(x-x_i)^2 - (y-y_i)^2 = (R+r_i)^2 i = 0, 2, \quad (8)$$

Решение данной системы выглядит следующим образом:

$$x = K_1 R + A_1; \quad (9)$$

$$y = K_2 R + A_2; \quad (10)$$

$$r_1 = V\Delta t_1 = V(T_1 - T_0); \quad (11)$$

$$r_2 = V\Delta t_2 = V(T_2 - T_0); \quad (12)$$

$$K_1 = (r_1 y_2 - r_1 y_1) / (x_2 y_1 - x_1 y_2); \quad (13)$$

$$K_2 = (r_1 x_2 - r_2 x_1) / (x_1 y_1 - x_2 y_2); \quad (14)$$

$$A_1 = \frac{r_1^2 y_2 - r_2^2 y_1 + y_1 y_2 (y_2 - y_1) + x_2^2 y_2 - x_1^2 y_2}{2(x_2 y_1 - x_1 y_2)}; \quad (15)$$

$$A_2 = \frac{r_1^2 x_2 - r_2^2 x_1 + x_1 x_2 (x_2 - x_1) + y_2^2 x_2 - y_1^2 x_2}{2(x_1 y_2 - x_2 y_1)}; \quad (16)$$

$$R = \frac{(A_1 K_1 + A_2 K_2 \pm \sqrt{A_1^2 A_2^2 - (A_1 K_2 + A_2 K_1)^2})}{(K_1^2 K_2^2 - 1)}. \quad (17)$$

Представленные формулы позволяют определять координаты источника при произвольном расположении приемников.

Выводы

Преимуществами метода акустической эмиссии перед другими методами неразрушающего контроля являются: интегральность метода, которая заключается в том, что используя один или несколько датчиков, установленных неподвижно на поверхности объекта, можно проконтролировать весь объект целиком. В отличие от сканирующих методов неразрушающего контроля метод акустической эмиссии не требует тщательной подготовки поверхности объекта контроля. Обнаружение регистрации развивающихся дефектов позволяет классифицировать дефекты не только по их размерам, но и по степени их опасности.

Предложенное математическое обеспечение построения моделей определения координат источников акустической эмиссии позволяет локализовать дефекты, наглядно просмотреть или накопить информацию о поведении дефекта.

Метод акустической эмиссии позволяет обнаруживать дефекты структуры материала на уровне скопления дислокаций. При этом анализируется только развивающиеся дефекты.

Список литературы:

1. Miller, R. K. Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5. Acoustic Emission Testing [Text] / R. K. Miller, P. McIntire. – 2nd ed. – Amer Society for Nondestructive, 1987. – 603 p.
2. Drouillard, T. F. Production Acoustic Emission Testing of Braze Joint [Text] / T. F. Drouillard, T. G. Glenn // J. Acoust. Emiss. – 1985. – Vol. 1, Issue 2. – P. 81–85.
3. Vahaviolos, S. Real Time Detection of Microcracks in Brittle Materials Using Stress Wave Emission (SWE) [Text] / S. Vahaviolos // IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging. – 1974. – Vol. 10, Issue 3. – P. 152–159. doi: [10.1109/tphp.1974.1134857](https://doi.org/10.1109/tphp.1974.1134857)
4. Неразрушающий контроль: Справочник. Т. 7, Кн. 1 [Текст] / ред. В. В. Клюев. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
5. Серьезнов, А. Н. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии [Текст] / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев. – М.: Машиностроение, 2004. – 392 с.
6. Бунина, Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии [Текст] / Н. А. Бунина. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. – 176 с.
7. Букетов, А. В. Влияние изменения дислокационной структуры на акустические характеристики материалов [Текст] / А. В. Букетов, В. Д. Нигалатий, С. А. Рожков, А. В. Шарко // Наукові нотатки. – 2015. – Вип. 48. – С. 220–224.
8. Кайно, Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов [Текст] / Г. Кайно. – М.: Мир, 1990. – 652 с.
9. Pärtzel, K. H. Acoustic Emission for Crack Inspection During Fully Automatic and Manual Straightening of Transmission Shafts, in

- Proceedings of the Acoustic Emission Symposium (Bad Nauheim) [Text] / K. H. Pärtzel // Deutsche Gesellschaft für Metallkunde. – 1988. – P. 157–164.
10. Parry, D. L. Industrial Application of Acoustic Emission Analysis Technology [Text] / D. L. Parry // Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission. – 1975. – P. 150–150-34. doi: [10.1520/stp32249s](https://doi.org/10.1520/stp32249s).
 11. Fowler, T. J. Recent Developments in Acoustic Emission Testing of Chemical Process Equipment [Text] / T. J. Fowler // Progress in Acoustic Emission IV, Proceedings of the Ninth International Acoustic Emission Symposium. – 1988. – P. 391–404.
 12. Cole, P. C. Acoustic Emission. Part 7 [Text] / P. C. Cole // The Capabilities and Limitations of NDT. The British Institute of Non-Destructive Testing. – 1988.

References

1. Miller, R. K., McIntire, P. (1987). Nondestructive Testing Handbook. Vol. 5. Acoustic Emission Testing. Amer Society for Nondestructive, 603.
2. Drouillard, T. F., Glenn, T. G. (1985). Production Acoustic Emission Testing of Braze Joint. J. Acoust. Emiss, 1 (2), 81–85.
3. Vahaviolos, S. (1974). Real Time Detection of Microcracks in Brittle Materials Using Stress Wave Emission (SWE). IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging, 10 (3), 152–159. doi: [10.1109/tphp.1974.1134857](https://doi.org/10.1109/tphp.1974.1134857).
4. Klyuev, V. V. (Ed.) (2005). Nerazrushayushchiy kontrol': Spravochnik. Vol. 7, Kn. 1. Moscow: Mashinostroenie, 829.
5. Ser'eznov, A. N., Stepanova, L. N., Murav'ev, V. V. (2004). Diagnostika ob'ektov transporta metodom akusticheskoy emissii. Moscow: Mashinostroenie, 392.
6. Bunina, N. A. (1990). Issledovanie plasticheskoy deformatsii metallov metodom akusticheskoy emissii. Leningrad: Izd-vo LGU, 176.
7. Buketov, A. V., Nigalaty, V. D., Rozhkov, S. A., Sharko, A. V. (2015). Vliyanie izmeneniya dislokatsionnoy struktury na akusticheskie harakteristiki materialov. Naukovi notatky, 48, 220–224.
8. Kayno, G. (1990). Akusticheskie volny: Ustroystva, vizualizatsiya i analogovaya obrabotka signalov. Moscow: Mir, 652.
9. Pärtzel, K. H. (1988). Acoustic Emission for Crack Inspection During Fully Automatic and Manual Straightening of Transmission Shafts, in Proceedings of the Acoustic Emission Symposium (Bad Nauheim). Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, 157–164.
10. Parry, D. L. (1975). Industrial Application of Acoustic Emission Analysis Technology. Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission, 150–150-34. doi: [10.1520/stp32249s](https://doi.org/10.1520/stp32249s).
11. Fowler, T. J. (1988). Recent Developments in Acoustic Emission Testing of Chemical Process Equipment. Progress in Acoustic Emission IV, Proceedings of the Ninth International Acoustic Emission Symposium, 391–404.
12. Cole, P. C. (1988). Acoustic Emission. Part 7. The Capabilities and Limitations of NDT. The British Institute of Non-Destructive Testing.

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Математична модель визначення координат дефектів як джерел акустичної емісії/ Савченко С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С. 8–12. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Математическая модель определения координат дефектов как источников акустической эмиссии/ Савченко С. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – No 33(1255). – С.8–12. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-5459.

Mathematical model of definition of coordinates of defects as sources of acoustic emission/ Savchenko S. //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 33 (1255). – P. 8–12. – Bibliogr.:12. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Савченко Сергій Васильович – аспірант, Кафедра виробництва приладів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», проспект Перемоги 37, м. Київ, Україна, 03056, e-mail:savchenko0102@ukr.net.

Савченко Сергей Васильевич – аспирант, Кафедра производства приборов, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», проспект Победы 37, г. Киев, Украина., 03056, e-mail:savchenko0102@ukr.net.

Sergey Savchenko – postgraduate student, Department of Instrument Production, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", 37, Peremohy ave., Kyiv, Ukraine, 03056, E-mail: savchenko0102@ukr.net.