

образования на железорудных карьерах [5]. Параметры технологических схем обеспечивают безопасные условия совместного ведения горных и отвальных работ в карьере.

Кафедра открытых горных работ в дальнейшем планирует на основе разработанной программы «Определения перспектив развития и параметров реконструкции карьеров Кривбасса с целью поддержания и увеличения промышленного потенциала ГОКов на основе местной сырьевой базы» выполнить научно-исследовательские работы по другим ГОКам Кривбасса.

Кроме того кафедра открытых горных работ участвует в целевой региональной программе «Переход горнодобывающих предприятий, подконтрольных Криворожскому горнопромышленному территориальному управлению Госгорпромнадзора Украины, на бестротиловые экологически безопасные взрывчатые вещества». В рамках данной программы было разработано новое дешевое взрывчатое вещество «Игданит МК-1» для дробления горных пород в условиях шахт и карьеров. Данное взрывчатое вещество «Игданит МК-1» прошло все необходимые испытания и приказом Госгорпромнадзора Украины было допущено к постоянному применению [6].

#### Список литературы

1. Вилкул Ю.Г., Близиюков В.Г., Бересневич П.В. Критерий эколого-экономической оценки комплексной механизации карьера // Проблемы повышения эффективности горнорудного производства. – НИГРИ, Кривой Рог, 1993. – С. 15 - 22.
2. Близиюков В.Г., Савицкий А.В. Определение границ карьеров при работе горнодобывающих предприятий в условиях рыночной экономики // Матеріали міжнародної конференції „Форум гірників - 2011”.- Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2011.
3. Луценко С.А., Баранов И.В., Близиюкова О.Ю. Определение производительности карьера по руде при заданном направлении развития горных работ // Разраб. рудн. месторожд. - Вып. 95(1). - Кривой Рог, 2012.
4. Баранов И.В. Определение экономической целесообразности производительности группы отвалов горнообогатительного комбината / И.В. Баранов // Разраб. рудн. месторожд., 2006. - Вып. 90. - С. 36-40.
5. В.Г. Близиюков, Баранов И.В. Технологические схемы отвалообразования при внутрикарьерном складировании вскрышных пород на железорудных карьерах // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників-2006». – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2006. - С. 119-123.
6. Вилкул. Ю.Г., Близиюков В.Г., Бригинец Ю.В. Бестротиловое ВВ «Игданит МК-1»/Комбинированные технологии разработки месторождений глубокими карьерами и шахтами. - Сб. науч. тр.- Дионис.- Кривой Рог, 2011.- 218 с.

Рукопись поступила в редакцию 11.04.13

УДК 621.926: 34.16

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Н.С. ПОДГОРОДЕЦКИЙ, канд. техн. наук, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

### ЭКСПЕРТНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКИ

Изложены основные принципы формирования диаграммы направленности ультразвуковой фазированной решетки для экспертного обследования строительных объектов.

**Ключевые слова:** экспертное обследование, ультразвуковой контроль, фазированная решетка.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Технология ультразвуковых фазированных решеток имеет ряд достоинств, которые выгодно отличают ее от других известных подходов неразрушающего контроля различных изделий и конструкций [1]:

различные углы ввода ультразвуковых пучков могут быть сгенерированы с помощью одного преобразователя, охватывающего гораздо большую контролируемую область, проверяемую на наличие дефектов;

большой охват позволяет, как уменьшать скорость сканирования объекта, так и увеличивать разрешающую способность контроля, или совмещать их;

ускоряется и упрощается получение реальных изображений положения и размеров дефектов, а также их интерпретация;

все данные, учитывающие последовательность контроля, могут быть записаны в реальном времени;

отчетные данные могут быть представлены в виде изображения, что облегчает анализ результатов контроля для персонала.

Однако, чтобы реализовать указанные преимущества фазированной решетки необходимо в каждом конкретном случае сформировать заданную диаграмму направленности ультразвукового пучка.

**Анализ исследований и публикаций.** В литературе обсуждаются различные способы фокусирования ультразвука, основанные на применении одиночных фокусирующих преобразователей [1,2], линз, а также фазированных решеток [3-5].

Заметное преимущество в этом плане имеют ультразвуковые фазированные решетки [4], которые обеспечивают электронную динамическую фокусировку, т.е. возможность изменять местоположение и размеры области воздействия без перемещения пьезопреобразователя. Целесообразно использовать решетки, в которых элементы размещаются на поверхности в виде части сферы, тем самым комбинируя возможности электронной и геометрической фокусировки [3,5]. Поскольку фазированные решетки позволяют синтезировать несколько фокусов в заданных участках одновременно их применение позволяет существенно сократить время процедуры контроля относительно большого объема различных конструкций. Недостатками решеток являются присутствие в их акустическом поле вторичных максимумов интенсивности, обусловленных, в частности, наличием дискретной структуры решетки, а также их сложность и относительно высокая стоимость аппаратуры, необходимой для ее работы.

**Цель исследований.** Исследовать принципы формирования заданной диаграммы направленности ультразвуковых преобразователей на основе технологии фазированных решеток для построения систем контроля и диагностики.

**Изложение материала и результаты.** Диаграмма направленности ультразвуковых преобразователей в пространстве и на плоскости может быть задана определенными характеристиками. Основной лепесток - это луч акустического давления распространяющийся под заданным углом, т.е. область диаграммы направленности, включающая ее максимум и ограниченная ближайшими к нему нулями или достаточно глубокими минимумами [4-6].

Боковые лепестки возникают под небольшими углами к основному лепестком и являются результатом «утечки» звуковой энергии с элементов решетки и фактически являются областями диаграммы направленности, прилегающими к локальным максимумам, лежащими за пределами основного лепестка. Механизм возникновения боковых лепестков фазированной решетки в сущности тот же, что и для лепестков диаграммы направленности цельного пьезоэлектрического преобразователя.

Дополнительные лепестки возникают за счет синфазного сложения сигналов от различных элементов в направлениях, отличных от направления основного лепестка.

Направления дополнительных лепестков определяются выражением [6]

$$\beta_{\text{доп}} = \sin^{-1}(m\lambda / p), \quad (1)$$

где  $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Оптимизация конструкции ультразвукового преобразователя заключается в следующем:

минимизация ширины основного лепестка;

подавление боковых лепестков;

полное устранение дополнительных лепестков.

Рассмотрим определение параметров поля плоской фазированной решетки. Будем полагать  $F$  выражением поля в направлении  $(\theta, \phi)$  прямоугольной фазированной решетки. Допустим, что излучатель состоит из  $N$  рядов и  $M$  столбцов элементов, расположенных вдоль прямоугольной решетки с промежутком  $d_x$  в направлении  $x$  и  $d_y$  в направлении  $y$ . Тогда можно записать [7]

$$F(u, v) = d_x d_y \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_{mn}(u, v) A_{mn} e^{jk(md_x + nd_y)}, \quad (2)$$

где  $f_{mn}$  - нормализованный параметр элемента  $(m, n)$ ,  $A_{mn}$  - амплитуда,  $k$  - волновое число  $(2\pi/\lambda)$ ,  $\lambda$  - длина волны,  $u = \sin\theta\cos\phi$ ,  $v = \sin\theta\sin\phi$ .

Расчетное пространство определено как  $u^2 + v^2 \leq 1$ .

В случае крупномасштабной аппроксимации подразумевается, что апертурные эффекты края решетки незначительны, а все ее элементы испытывают одно и тоже влияние окружающей среды, т.е. каждый элемент формирует одно и тоже значение  $f(u, v)$ . В этом случае выражение

(2) может быть представлено в виде

$$F(u, v) = d_x d_y f(u, v) E(u, v), \quad (3)$$

$$E(u, v) = d_x d_y \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{mn} e^{jk(md_x + nd_y)}, \quad (4)$$

где  $E$  - коэффициент фазированной решетки.

Левая часть уравнения (4) представляет собой усеченный двойной ряд Фурье, который связывает параметр  $A_{mn}$  и коэффициент фазированной решетки  $E$  посредством обратного дискретного преобразования Фурье. Коэффициент фазированной решетки  $E$  является периодическим в размерности  $u$  по интервалу  $\lambda/d_x$ , и периодическим в размерности  $v$  по интервалу  $\lambda/d_y$ . Прямоугольная область в пространстве  $u-v$ , покрытая единственным периодом  $E(u, v)$  определяется следующими ограничениями [7]

$$\left\{ -0,5\lambda/d_x \leq u < 0,5\lambda/d_x \text{ и } -0,5\lambda/d_y \leq v < 0,5\lambda/d_y \right\}. \quad (5)$$

Ввиду двойной периодичности в пространстве  $u-v$  для любой величины  $u$  и  $v$  справедливо

$$E(u, v) = E \left\{ \left[ u - \text{round} \left( \frac{u}{\lambda/d_x} \right) \lambda/d_x \right], \left[ v - \text{round} \left( \frac{v}{\lambda/d_y} \right) \lambda/d_y \right] \right\}. \quad (6)$$

В выражении (6) функция  $\text{round}$  определена как ближайшее целое число.

Периодичность  $E$  в пространстве  $u-v$  ответственна за возникновение дополнительных лепестков решетки. Дополнительные лепестки могут стать видимыми при условии, когда больше чем один период  $E$  коэффициента фазированной решетки вписывается в видимое пространство.

Поскольку уравнение (4) представляет дважды усеченный ряд Фурье, вычисление  $E$  может быть выполнено посредством обратного двумерного быстрого преобразования Фурье (FFT). К  $x$   $K$  положения выборки  $E$  в пространстве  $u-v$  определяются выражениями

$$u_p = \frac{P}{K} \frac{\lambda}{d_x}, \quad (7)$$

$$p = -\frac{K}{2} \dots \frac{K}{2} - 1, \quad (8)$$

$$v_q = \frac{q}{K} \frac{\lambda}{d_y}, \quad (9)$$

$$q = -\frac{K}{2} \dots \frac{K}{2} - 1. \quad (10)$$

Коэффициент фазированной решетки  $E$ , вычисленный с использованием обратного двумерного FFT, покрывает только один период в размерности  $v$  и  $u$ . Если интервал между элементами, превышает половину длины волны и периодический размер  $E$  в этом направлении меньше двух, то  $E$  не будет полностью покрывать видимое пространство. Вычисление части отсутствующей части  $E$  может тогда быть выполнено, используя уравнение (6).

На рис. 1 показаны результаты определения диаграммы направленности ультразвуковой фазированной решетки на плоскости, а на рис. 2 - в пространстве с использованием программного продукта ТАС (Transducer Array Calculation).

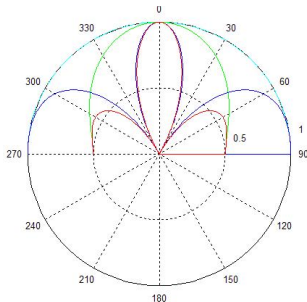


Рис. 1. Диаграмма направленности ультразвуковой фазированной решетки на плоскости

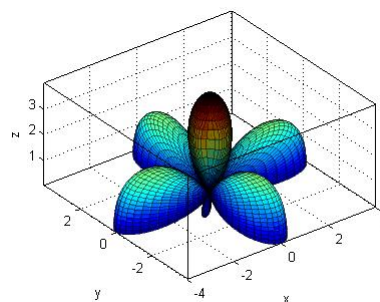


Рис. 2. Диаграмма направленности ультразвуковой фазированной решетки в пространстве

**Вывод.** Высокая точность определения положения, ориентации и размеров дефектов, улучшенная по сравнению с одиночными преобразователями фронтальная и лучевая разрешающая способность, возможность классификации дефектов по типу на основании изображений их образов позволяют сделать заключение о высокой эффективности контроля при помощи технологии ультразвуковых фазированных решеток с целью заключения о годности объектов различного назначения к эксплуатации.

#### Список литературы

1. Фазированные решетки. Режим доступа <http://www.harfangveo.ru>.
2. Ермолов И.Н. и др. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля. М.: Машиностроение, 1986. - 280 с.
3. Fry F.J. Intense focused ultrasound: Its production, effects and utilization, in *Ultrasound: Its Application in Medicine and Biology*, Part II, edited Fry F.J. New York: Elsevier, 1978. P. 689-736.
4. Hill C.R., ter Haar G.R. Review article: High intensity focused ultrasound - potential for cancer treatment // *Br. J. Radiology*. 1995. V. 68. № 816. P. 1296-1303.
5. Гаврилов Л.Р., Хэнд Дж. У. Двумерные фазированные ультразвуковые решетки для применения в хирургии: перемещение одиночного фокуса, акустический журнал, 2000, том 46. – С. 456-466.
6. Introduction to Ultrasonic Technology Applications. Advanced Practical NDT Series. - KJII, R/D Tech, 2007 г. /Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных решеток. - Перевод С.В. Реука, 2011 г. – Режим доступа <http://defectoscofia.narod.ru>.
7. Keizer W.P.M.N. APAS: An Advanced Phased-Array Simulator. – Режим доступа: <http://arraysoft.nl/Downloads/APASpropmag>
8. Transducer Array Calculation (TAC) GUI. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35657-transducer-array-calculation-tac-gui>.

Рукопись поступила в редакцию 15.03.13

УДК 621.311.004.56: (621.316+ 621.317)

А.П. СІНОЛИЦЬЙ, д-р техн. наук, проф., В.А. КОЛЬСУН, канд. техн. наук, доц.,  
В.С. КОЗЛОВ, аспірант, ДВНЗ «Криворізький національний університет»

### ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОТОТИПУ ПРИСТРОЮ АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТИПУ СПОЖИВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Створено прототип пристрою автоматичної ідентифікації типу споживача електричної енергії, що є основною ланкою нової нетрадиційної системи діагностики та прогнозування енергетичних показників електричної мережі живлення. Перевірено низьку чутливість алгоритму, за яким працює прилад, до завад у каналі виміру.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Вирішення задачі якісної діагностики та прогнозу енергетичного стану мережі живлення групи енергоємних споживачів можливо за наявності інформації про математичні моделі та параметри навантаження. Таку інформацію неможливо отримати від лічильників електричної енергії, за допомогою яких оцінюють енергетичний стан мережі живлення на вітчизняних підприємствах [1]. Отже існує необхідність у пристроях автоматичного визначення типу споживача електричної енергії, які можна було б інтегрувати до існуючих систем технічного обліку та корекції енергетичних показників.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Математичний апарат однієї з системи нетрадиційного технічного контролю енергетичних показників запропоновано в [2] та практично реалізовано в [3]. Першим кроком вищенаведеної системи є введення типу електроспоживачів, що підключені до досліджуваної мережі. Даний захід можна автоматизувати використавши запропоновану систему ідентифікації типу споживачів електричної енергії [4].

**Постановка завдання.** Використовуючи математичний апарат ідентифікації типу споживача електричної енергії, розглянутий у [4], створити та практично перевірити прототип пристрою ідентифікації для поодиноких споживачів. Перевірити стійкість алгоритму до завад у каналі виміру та обґрунтувати відсутність необхідності у засобах додаткової цифрової фільтрації.

**Викладення матеріалу та результати.** Задача майбутньої системи ідентифікації - визначити усі типи споживачів електричної енергії, підключених до мережі, не втручаючись до роботи останніх. Знаючи математичну модель кожного зі споживачів електричної енергії, можли-