



Научный обзор

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.10

УДК 534.213

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА УДАРА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ОТКЛИКА ВИБРОДАТЧИКОВ

Р.В. Цветков, И.Н. Шардаков, И.О. Глот, Г.Н. Гусев, В.В. Епин, А.П. Шестаков

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 23 октября 2022 г.

Одобрена: 10 ноября 2022 г.

Принята к публикации:

12 декабря 2022 г.

#### Ключевые слова:

вибродиагностика, локация, эксперимент, железобетонная конструкция, импульсная ударная нагрузка, идентификация места воздействия, вибрационный отклик, обработка сигналов, корреляционный анализ, деформационный мониторинг.

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты эксперимента по исследованию вибрационного отклика крупномасштабной железобетонной модельной конструкции на импульсную ударную нагрузку. Нагрузка была приложена ко всем основным элементам конструкции (колоннам, ригелям и плитам перекрытий) и представляла собой однотипные удары по нормали к поверхностям элементов. Вибрационный отклик регистрировался системой датчиков-акселерометров, распределенной по элементам конструкции и синхронизированной с акселерометром, установленным на ударнике. Результаты измерений виброграмм ускорений сохранены в виде числовых массивов. Массив виброграмм, зарегистрированных всем комплексом датчиками в ответ на диагностические удары по основным конструктивным элементам, составил вибрационный портрет конструкции. В результате обработки этой информации получен массив данных о времени распространения вибрационного сигнала от каждого источника сигнала до каждого из датчиков системы регистрации (базовый массив откликов).

Полученные данные использованы для решения задачи о локации произвольного удара по конструкции. Для этого вибрационный отклик, зарегистрированный системой датчиков при произвольном ударе, сопоставлялся с базовым массивом откликов. Сопоставление производилось на основе вычисления коэффициентов парной корреляции. Полученное пространственное распределение коэффициентов корреляции позволило идентифицировать позицию приложения ударной нагрузки, связав ее с элементом конструкции, которому соответствует максимальное значение коэффициента корреляции. Предложенный алгоритм продемонстрирован на примере, где в качестве неизвестной нагрузки выступил один из диагностических ударов, использованных при получении базового вибропортрета. В численном эксперименте, выполненном с использованием предложенного алгоритма, установлено, что точность определения места удара сопоставима с характерным шагом элементов модельной конструкции и продемонстрировано, как точность соотносится с количеством датчиков системы регистрации и их распределением по конструкции.

Разработанный алгоритм идентификации места приложения ударной нагрузки может эффективно использоваться при разработке автоматизированных систем деформационного мониторинга.

© ПНИПУ

© Цветков Роман Валерьевич – к.т.н., н.с., e-mail: [flower@icmm.ru](mailto:flower@icmm.ru).

Шардаков Игорь Николаевич – д.ф.-м.н., проф., зав. лаб., e-mail: [shardakov@icmm.ru](mailto:shardakov@icmm.ru).

Глот Ирина Олеговна – д.ф.-м.н., доц., с.н.с., e-mail: [glot@icmm.ru](mailto:glot@icmm.ru).

Гусев Георгий Николаевич – к.т.н., с.н.с., e-mail: [gusev.g@icmm.ru](mailto:gusev.g@icmm.ru).

Епин Валерий Валерьевич – инж.-исслед., e-mail: [pin.v@icmm.ru](mailto:pin.v@icmm.ru).

Шестаков Алексей Петрович – к.ф.-м.н., н.с., e-mail: [shap@icmm.ru](mailto:shap@icmm.ru).

Roman V. Tsvetkov – CSc in Technical Sciences, Researcher, e-mail: [flower@icmm.ru](mailto:flower@icmm.ru).

Igor N. Shardakov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of laboratory, e-mail: [shardakov@icmm.ru](mailto:shardakov@icmm.ru).

Irina O. Glot – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: [glot@icmm.ru](mailto:glot@icmm.ru).

Georgii N. Gusev – CSc in Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: [gusev.g@icmm.ru](mailto:gusev.g@icmm.ru).

Valery V. Yepin – Research Engineer, e-mail: [pin.v@icmm.ru](mailto:pin.v@icmm.ru).

Aleksey P. Shestakov – CSc in Physical and Mathematical Sciences, Researcher, e-mail: [shap@icmm.ru](mailto:shap@icmm.ru).



## IDENTIFICATION OF THE IMPACT POSITION IN A REINFORCED CONCRETE STRUCTURE BASED ON THE ANALYSIS OF THE RESPONSE OF VIBRATION SENSORS

R.V. Tsvetkov, I.N. Shardakov I.O. Glot, G.N. Gusev, V.V. Yepin, A.P. Shestakov

Institute of Continuous Media Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 23 October 2022  
Approved: 10 November 2022  
Accepted for publication:  
12 December 2022

#### Keywords:

vibration diagnostics, location, experiment, reinforced concrete structure, impulse impact load, impact site identification, vibration response, signal processing, correlation analysis, deformation monitoring.

### ABSTRACT

The article presents the results of an experiment to study the vibration response of a large-scale reinforced concrete model structure to an impulse load. The load was a series of impacts along the normal to the surface of the element and was applied to all the main structural elements (columns, crossbars and floor slabs). The vibration response was recorded by a system of sensors-accelerometers distributed over the structural elements and synchronized with the accelerometer mounted on the striker. The results of measurements of acceleration vibrograms were saved as digital files. An array of vibrograms recorded by the entire complex of sensors in response to test impacts on the main structural elements made up a vibration portrait of the structure. As a result of processing this information, an array of data was obtained on the propagation time of the vibration signal from each signal source to each of the sensors of the registration system (basic array of responses). *Key words:* Impact localization, accelerometer,

The data obtained were used to solve the problem of determining the location of an arbitrary impact on a structure. To do this, the vibration response recorded by the sensor system during an arbitrary impact was compared with the base array of responses. The comparison was made on the basis of the calculation of the pair correlation coefficients. The resulting spatial distribution of the correlation coefficients made it possible to identify the position of the shock load application. It corresponds to the structural element that has the maximum value of the correlation coefficient. The proposed algorithm was demonstrated on an example where one of the test shocks that participated in the FORMATION of the basic vibration portrait was used as an unknown load. In a numerical experiment using the proposed algorithm, it was found that the accuracy of the impact site identification corresponds to the characteristic step of the structural elements. It is shown that the accuracy correlates with the number of sensors of the registration system and their distribution throughout the structure.

The developed algorithm for identifying the place of impact load application can be effectively used in the development of automated systems for deformation monitoring.

© PNRPU

### Введение

Задача по определению места ударного механического воздействия на деформируемый объект имеет место в различных областях науки и техники. В частности, ее решение важно при организации мониторинга «здоровья» конструкции (Structural health monitoring), основной целью которого является оценка и прогноз механического состояния объекта. Идентификация внешней возмущающей силы представляет интерес, например, для контроля несанкционированного доступа к объекту, для определения места ударного контакта при анализе работы спортивного инвентаря [1], для оценки параметров карьерных взрывов [2] т.д. Задача определения места внутренних импульсных воздействий важна для нахождения очагов землетрясения по результатам сейсмических измерений [3; 4] или для нахождения источника акустической волны в образце при использовании метода акустической миссии [5].

Часто решение этой задачи рассматривается для объектов, представляющих собой однородные упругие тела – стержень, пластина, полупространство и т.п. Для таких идеальных случаев методы локации изучены еще в XX в. [6]. Современные исследования в этой области посвящены способам определения места ударного воз-

действия в пластинах из композитов [7–12], пластинах с вырезами [13–15], различных балках [16], элементах аэрокосмических конструкций [17–20], а также в деталях строительных конструкций из железобетона, таких как корпус реактора [21], фермы [22], колонны [23; 24], плиты [25; 26].

Однако реальные природные и технические объекты имеют сложную геометрию и неоднородные механические свойства. Строительные сооружения состоят из большого числа взаимодействующих между собой элементов с различными механическими свойствами и сложным образом расположенных в пространстве. В этих условиях распространение по элементам конструкции вибрационных процессов от места локализации импульсного воздействия имеет сложный пространственно-временной характер. Так, в работе [27] с помощью численного моделирования продемонстрировано, как при ударе по одной из колонн 4-этажной бетонной конструкции деформационная волна распространяется по межэтажному перекрытию, «перетекая» по колоннам с этажа на этаж. В значительной степени указанные обстоятельства обуславливают сложности решения задачи об определении места импульсного воздействия. Решению задачи локации в подобных конструкциях посвящено сравнительно небольшое количество

работ, при этом в основном исследуются каркасные конструкции [28; 29]. В связи с этим исследования, связанные с определением места ударного воздействия в реальных строительных сооружениях, являются актуальными.

В данной статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований по разработке подхода для определения места ударного воздействия на основе анализа вибрационных процессов. Возможности метода продемонстрированы на примере железобетонной четырехэтажной конструкции.

## 1. Методы и подходы

Для оценки места и параметров механического воздействия на объект применяются различные методы, основанные на анализе характеристик волновых процессов, распространяющихся по конструкции. В качестве таких характеристик может выступать амплитуда, частота колебаний [30], фаза сигнала и изменение этих характеристик со временем.

Амплитудный метод пассивной локации, применяемый в сейсмологии [3], позволяет находить место воздействия по соотношению амплитуд сигналов, зарегистрированных разными датчиками, расположенными вдоль линии распространения волнового фронта на известном расстоянии друг от друга. Достоинство метода заключается в простоте обработки данных и в отсутствии необходимости синхронизации измеряемых сигналов. Основной недостаток состоит в необходимости использования значительного количества датчиков даже для объектов простой конфигурации, обладающих однородными свойствами, и тем более для конструкций сложной формы.

В сейсмологии и в работах, посвященных акустической эмиссии [5], широко распространен метод локации по разности времени прихода сигналов к распределенным по объекту датчикам. Этот метод предполагает, что волна распространяется по прямой между источником воздействия и датчиками, а профиль скорости волны однороден во всех направлениях. Зная время прохождения сигнала от источника до каждого датчика, можно оценить скорость волнового фронта и расстояние, которое пробегает за это время волна. Для каждого из пары датчиков строится кривая (в двумерном случае) или поверхность (для пространственного объекта), точки которой равноудалены от датчика на дистанцию пробега волны. Местоположение источника сигнала определяется путем построения точек пересечения этих кривых (поверхностей) [6]. К недостаткам метода относится необходимость синхронизации измерения сигналов датчиками. Кроме того, по мере увеличения расстояния от источника волновой фронт растягивается во времени и возникает вопрос о том, как определять время прибытия сигнала к месту расположения датчика.

Также для решения задачи локации применяют метод на основе анализа вибрационных мод. При этом используется предположение, что воздействие в некоторой точке конструкции вызывает колебания с определенными частотами, соотносящиеся между собой в некоторой пропорции. Так, в работе [31] этот подход использован для определения места удара по пластине, на которой установлен только один датчик. Для конструкции сложной формы с большим количеством степеней свободы число мод и форм колебаний велико, и существует много близких частот и схожих форм. В связи с этим возникают сложности с их идентификацией.

В ряде работ применяется метод обработки сигнала, построенный на обращении времени [32; 33], при котором детектирование осуществляется с помощью свертки неизвестного сигнала с набором известных сигналов, инвертированных во времени. Такой подход дает хорошие результаты для сопоставления близких воздействий и точной локации на их основе.

Суть предлагаемого в данной работе подхода по определению места приложения импульсного (ударного) механического воздействия по анализу вибрационного отклика пространственной железобетонной конструкции состоит в следующем. На элементах конструкции устанавливается пространственно распределенная система вибродатчиков (акселерометров), которые синхронно регистрируют в числовом формате виброграммы компонент ускорений в точках крепления датчиков. Осуществляется серия из  $K$  диагностических ударов по основным структурным единицам конструкции и регистрируется отклик  $N$  вибродатчиков на эти воздействия. В качестве структурной единицы могут быть межэтажные несущие колонны, участки плит перекрытий, стеновые плиты и т.п. Импульсное воздействие осуществляется ударником и сопровождается числовой регистрацией величины импульса на ударнике, синхронизированной с регистрацией отклика вибродатчиками.

Диагностические удары по конструкции осуществляются в  $K$  точках конструкции, заданных радиус-векторами  $\mathbf{RF}_j$  ( $j = 1 \dots K$ ). Совокупность этих точек можно представить матрицей-строкой  $\mathbf{RF} = \{\mathbf{RF}_1, \mathbf{RF}_2, \dots, \mathbf{RF}_K\}$ . Регистрация вибрационного отклика осуществляется в  $N$  точках конструкции, заданных радиус-векторами  $\mathbf{RS}_i$  ( $i = 1 \dots N$ ). Совокупность этих точек представим матрицей-строкой  $\mathbf{RS} = \{\mathbf{RS}_1, \mathbf{RS}_2, \dots, \mathbf{RS}_N\}$ .

Отклик конструкции на произвольный  $k$ -й диагностический удар по точке конструкции, заданной радиус-вектором  $\mathbf{RF}_k$ , представляет собой матрицу-столбец  $\mathbf{T}_k(\mathbf{RF}_k)$ , составленный из  $N$  виброграмм, каждая из которых привязана к точке размещения датчика, определенной радиус-вектором  $\mathbf{RS}_i$ . Размерность матрицы  $\mathbf{T}_k(\mathbf{RF}_k)$  будет  $N \times 1$ , где  $N$  – количество датчиков. Эта матрица имеет вид

$$\mathbf{T}_k(\mathbf{RF}_k) = \left\{ \begin{array}{l} f_{k,1}(\mathbf{RS}_1, \mathbf{RF}_k, t) \\ f_{k,2}(\mathbf{RS}_2, \mathbf{RF}_k, t) \\ \dots \\ f_{k,i}(\mathbf{RS}_i, \mathbf{RF}_k, t) \\ \dots \\ f_{k,N}(\mathbf{RS}_N, \mathbf{RF}_k, t) \end{array} \right\}. \quad (1)$$

Вся совокупность откликов конструкции на  $K$  диагностических ударов может быть представлена матрицей  $\mathbf{T}$ , имеющей с учетом соотношения (1) размерность  $N \times K$ :

$$\mathbf{T} = \{ \mathbf{T}_1(\mathbf{RF}_1), \mathbf{T}_2(\mathbf{RF}_2), \dots, \mathbf{T}_k(\mathbf{RF}_k), \dots, \mathbf{T}_K(\mathbf{RF}_K) \}. \quad (2)$$

Эта матрица содержит весь объем числовой информации, зарегистрированный всей совокупностью датчиков в процессе выполнения полного цикла диагностических ударов. Такой массив информации представляет собой базовый вибропортрет конструкции.

Численная обработка этой базовой информации позволяет получить различные параметры и зависимости, характеризующие отклик элементов конструкции на произвольное внешнее ударное воздействие. В частности, такими параметрами могут быть максимальная амплитуда сигнала, зарегистрированного датчиком, время прохождения вибрационного сигнала от места удара до места расположения вибродатчика, фурье- и вейвлет-образы виброграмм, и т.д.

Достаточно удобной числовой характеристикой вибрационного отклика является время прохождения сигнала от места удара до датчика. В качестве времени прибытия сигнала к датчику может считаться момент, когда величина сигнала в точке расположения датчика превысит определенное пороговое значение или когда скорость достигнет максимального значения. В данной работе используется критерий Акаике  $AIC(t)$ , хорошо зарекомендовавший себя в работе [13]. Согласно этому критерию, время прихода сигнала к датчику определяется из условия минимума функции

$$AIC(t) = t \log_{10} [\text{var}(a(1..t))] + (T - t - 1) \log_{10} [\text{var}(a(t..T))]. \quad (3)$$

где  $a$  – цифровое значение сигнала с виброграммы,  $T$  – длительность сигнала,  $\text{var}(a(1..t))$  – дисперсия сигнала за временной интервал от начала сигнала до момента времени  $t$ ;  $\text{var}(a(t..T))$  – дисперсия сигнала датчика за временной промежуток от  $t$  до конца сигнала  $T$ .

Использование определенного числового параметра  $f_{k,i}^*(\mathbf{RS}_i, \mathbf{RF}_k)$ , характеризующего отклик датчика взамен функции отклика  $f_{k,i}(\mathbf{RS}_i, \mathbf{RF}_k, t)$ , дает возможность представить отклик всей конструкции на  $k$ -е диагностическое воздействие в виде матрицы-столбца,

составленного из  $N$  чисел (в соответствии с количеством датчиков):

$$\mathbf{T}_k^*(\mathbf{RF}_k) = \left\{ \begin{array}{l} f_{k,1}^*(\mathbf{RS}_1, \mathbf{RF}_k) \\ f_{k,2}^*(\mathbf{RS}_2, \mathbf{RF}_k) \\ \dots \\ f_{k,i}^*(\mathbf{RS}_i, \mathbf{RF}_k) \\ \dots \\ f_{k,N}^*(\mathbf{RS}_N, \mathbf{RF}_k) \end{array} \right\}. \quad (4)$$

По аналогии с соотношением (2) вся совокупность матриц  $\mathbf{T}_k^*(\mathbf{RF}_k)$  формирует общую матрицу отклика  $\mathbf{T}^*$ , имеющую размерность  $N \times K$ :

$$\mathbf{T}^* = \{ \mathbf{T}_1^*(\mathbf{RF}_1), \mathbf{T}_2^*(\mathbf{RF}_2), \dots, \mathbf{T}_k^*(\mathbf{RF}_k), \dots, \mathbf{T}_K^*(\mathbf{RF}_K) \}. \quad (5)$$

Матрица  $\mathbf{T}^*$  позволяет сопоставить отклики конструкции на различные диагностические удары с целью оценки их близости. Такое сопоставление может быть осуществлено различным образом по различным нормам. В данной работе для сравнения откликов конструкции на удары по  $k$ -му и по  $m$ -му элементам конструкции была использована статистическая мера – коэффициент парной корреляции  $r_{km}(\mathbf{RF}_k, \mathbf{RF}_m)$ , определяемый соотношением [34]

$$r_{k,m}(\mathbf{RF}_k, \mathbf{RF}_m) = \quad (6)$$

$$= \frac{\sum_{j=1}^N (f_{k,j}^*(\mathbf{RS}_j, \mathbf{RF}_k) - \overline{f_k^*}(\mathbf{RF}_k)) (f_{m,j}^*(\mathbf{RS}_j, \mathbf{RF}_m) - \overline{f_m^*}(\mathbf{RF}_m))}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (f_{k,j}^*(\mathbf{RS}_j, \mathbf{RF}_k) - \overline{f_k^*}(\mathbf{RF}_k))^2 \sum_{j=1}^N (f_{m,j}^*(\mathbf{RS}_j, \mathbf{RF}_m) - \overline{f_m^*}(\mathbf{RF}_m))^2}},$$

где  $N$  – число датчиков,  $f_{k,j}^*(\mathbf{RS}_j, \mathbf{RF}_k)$  и  $f_{m,j}^*(\mathbf{RS}_j, \mathbf{RF}_m)$  – значения параметра отклика, зарегистрированные  $j$ -м датчиком при ударе по  $k$ -му и  $m$ -му элементам конструкции соответственно;  $\overline{f_k^*}(\mathbf{RF}_k)$  и  $\overline{f_m^*}(\mathbf{RF}_m)$  – соответствующие значения параметра отклика, осредненные по всем  $N$  датчикам.

Значения коэффициентов парной корреляции откликов, полученные для различных комбинаций точек удара, можно представить в виде симметричной матрицы размерностью  $K \times K$  с диагональными элементами  $r_{k,k}(\mathbf{RF}_k, \mathbf{RF}_k) = 1$ :

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & r_{1,2}(\mathbf{RF}_1, \mathbf{RF}_2) & \dots & r_{1,K}(\mathbf{RF}_1, \mathbf{RF}_K) \\ \dots & 1 & \dots & r_{2,K}(\mathbf{RF}_2, \mathbf{RF}_K) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Значения корреляционных коэффициентов  $r_{k,m}(\mathbf{RF}_k, \mathbf{RF}_m)$  имеют пространственную привязку к

элементам конструкции, поскольку каждый из диагностических ударов связан с определенной точкой конструкции, описанной соответствующим радиус-вектором. Для дальнейшего анализа представляет интерес характер пространственного распределения коэффициентов  $r_{k,m}(\mathbf{RF}_k, \mathbf{RF}_m)$  по элементам конструкции, задаваемым радиус-векторами  $\mathbf{RF}_m$  ( $m = 1, \dots, K$ ) при фиксированном значении радиус-вектора  $\mathbf{RF}_k$ . В соответствии с определением коэффициента корреляции [34] его максимальные значения будут соответствовать значениям главной диагонали матрицы (7), т.е. случаю, когда  $\mathbf{RF}_m = \mathbf{RF}_k$ .

Из этого следует, что если нанесен удар по конструкции в неизвестной точке с радиус-вектором  $\mathbf{RF}_x$ , вызвавший отклик датчиков  $\mathbf{T}_x^*(\mathbf{RF}_x)$ , то можно сопоставить этот отклик со всей последовательностью откликов на диагностические удары  $\mathbf{T}_m^*(\mathbf{RF}_m)$  ( $m = 1 \dots K$ ). Построенная при этом в соответствии с (7) последовательность корреляционных коэффициентов  $r_{x,m}(\mathbf{RF}_x, \mathbf{RF}_m)$  будет иметь максимум при таком значении  $\mathbf{RF}_m$ , которое окажется ближе всех остальных к точке локализации неизвестного удара  $\mathbf{RF}_x$ . Формализацию этого утверждения можно представить следующим образом: искомым радиус-вектор  $\mathbf{RF}_x$  должен находиться в окрестности радиус-вектора  $\mathbf{RF}_{m^*}$ , который определяется максимальным значением коэффициента корреляции

$$r_{x,m^*} = \max_{m \in (1,K)} [r_{x,m}(\mathbf{RF}_x, \mathbf{RF}_m)]. \quad (8)$$

Следует отметить, что окрестность любого радиус-вектора  $\mathbf{RF}_m$  охватывает пространство  $V_m$ , которое представляет собой часть всего пространства  $V$ , охватывающего исследуемую конструкцию. При этом вся совокупность областей  $V_m$  аппроксимирует непрерывно всю область  $V$ , а  $\mathbf{RF}_m$  определяют центры этих областей.

Для оценки «качества» определения места импульсного воздействия введем коэффициент локации  $L_{xm}$ , имеющий вид

$$L_{xm} = \frac{(r_{x,m} + 1)(V - V_m)}{\left[ \sum_{i=1}^K ((r_{x,i} + 1)V_i) - (r_{x,m} + 1)V_m \right]}. \quad (9)$$

Этот коэффициент характеризует отношение средневзвешенного значения коэффициента корреляции  $r_{x,m}$  в окрестности точки с радиус-вектором  $\mathbf{RF}_m$  к средневзвешенному значению совокупности остальных коэффициентов корреляции  $r_{x,i}$  ( $i = 1, 2, \dots, K, i \neq m$ ). Такое представление позволяет оценить, насколько в последо-

вательности коэффициентов корреляции  $r_{x,i}$  ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) каждая величина значима по сравнению с остальными с учетом неравномерного распределения радиус-векторов точек позиционирования диагностических ударов  $\mathbf{RF}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) по объему конструкции. При равномерном распределении этих точек формула (9) приобретает следующий вид:

$$L_{xm} = \frac{(r_{x,m} + 1)(K - 1)}{\left[ \sum_{i=1}^K (r_{x,i} + 1) - (r_{x,m} + 1) \right]}, \quad (10)$$

Коэффициент локации принимает максимальное значение  $L^*$  в той точке конструкции  $\mathbf{RF}_{m^*}$ , которая идентифицируется как зона нанесения «неизвестного» удара.

## 2. Исследуемая конструкция и оборудование

Для экспериментальной оценки возможностей разработанного алгоритма определения места ударного воздействия по анализу вибрационных процессов была использована модельная железобетонная конструкция, показанная на рис. 1. Она представляет собой четырехэтажный фрагмент здания из монолитного железобетона в масштабе 1:2. Размеры конструкции в плане 4×6 м, высота этажа 1,5 м, шаг колонн 2 м. Сечение колонны составляет 200×200 мм; сечение ригеля 200×250 мм; толщина плиты 150 мм. Используемый бетон марки В30 усилен арматурой диаметром 12 мм для колонн и нижнего пояса ригелей и арматурой диаметром 8 мм для остальных элементов. Нижняя часть колонн через специальные металлические захваты закреплена на фундаменте при помощи болтовых соединений. Модельная конструкция расположена на экспериментальном стенде ИМСС УрО РАН [35], который предназначен для выполнения экспериментов с крупномасштабными конструкциями. Стенд позволяет реализовывать внешние воздействия различного вида, от квазистатического до ударно-волнового, и дает возможность исследовать деформационные процессы от упругого состояния объекта до его полного разрушения.

В ходе проведенного масштабного эксперимента был исследован вибрационный отклик описанной модельной конструкции на серию диагностических ударов. Ударное воздействие осуществлялось при помощи металлического ударника массой 0,47 кг. Удары наносились по поверхности каждой колонны в ее центральном межэтажном сечении в двух взаимно перпендикулярных направлениях  $X$  и  $Y$ , а также по центрам плит перекрытий в направлении  $Z$ . В ходе эксперимента было произведено 96 тестовых ударов по колоннам – по 24 удара на 4 этажах. На рис. 1 показана нумерация колонн и этажей. Далее пространственная привязка колонн будет обозначаться таким образом: «Сечение Ряд/Этаж» (например, А1/3, В2/2).

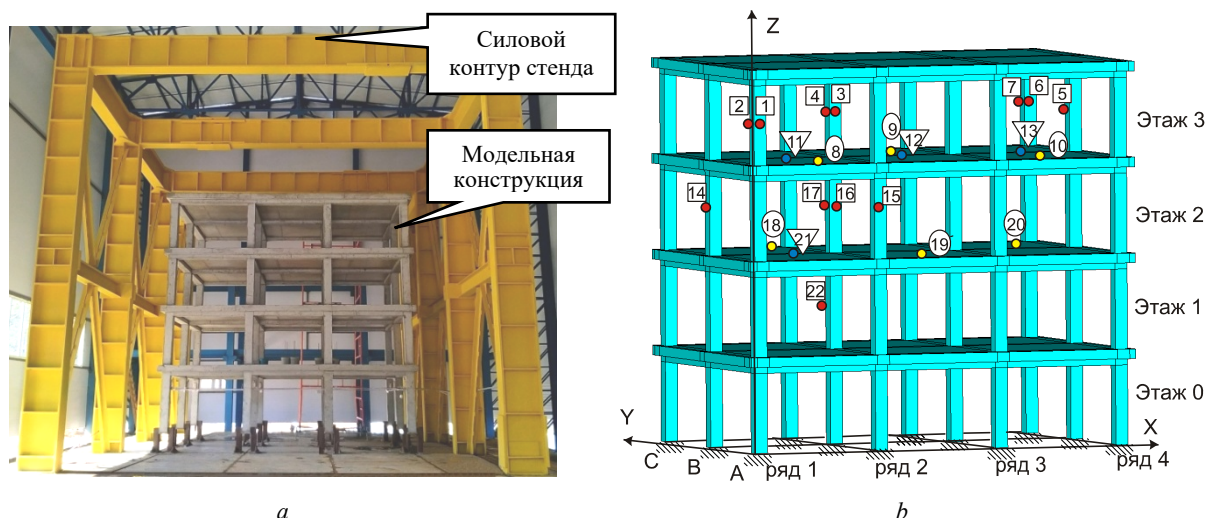


Рис. 1. Модельная железобетонная конструкция: *a* – внешний вид конструкции на испытательном стенде; *b* – схема конструкции с расположенными на ней датчиками

Fig. 1. Model reinforced concrete structure: *a* – the structure on the test bench, *b* – diagram of the structure with sensors located on it

Регистрация вибрационных процессов в элементах конструкции производилась синхронно 22 акселерометрами, расположенными согласно схеме рис. 1. Датчики измеряли ускорение, направленное по нормали к поверхностям, на которых они были установлены. Таким образом, датчики, расположенные на серединах колонн (красные кружки на схеме), регистрировали виброускорения в двух направлениях: № 2, 4, 5, 7, 14, 17, 22 – в направлении оси *X*, и № 1, 3, 6, 15, 16 – в направлении оси *Y*. Датчики, расположенные на серединах плит перекрытия (№ 8, 9, 10, 18, 19, 20 – желтые кружки) и на серединах ригелей (№ 11, 12, 13, 21 – синие кружки), регистрировали виброускорения по оси *Z*. На рисунке номера датчиков обозначены следующим образом: квадраты – датчики на колоннах, треугольники – датчики на ригелях, овалы – датчики на плитах. Акселерометр был установлен также на ударнике. Используемая в эксперименте аппаратура позволяет регистрировать колебания в диапазоне частот 0,5–10 000 Гц. Во время эксперимента с помощью 22 датчиков было получено 2112 виброграмм.

### 3. Результаты

Для дальнейшего анализа в качестве диагностических ударов будут рассматриваться только удары по центрам колонн конструкции в направлении оси *X*, а вибрационный отклик на эти удары будет регистрироваться только в направлении осей *X* и *Z*. В этом случае будут использованы датчики с номерами, представленными матрицей  $NS = \{2; 4; 5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 17; 18; 19; 20; 21; 22\}$  (см. рис. 1). Совокупность виброграмм, полученных с указанных датчиков в ответ на весь набор диагностических ударов, в соответствии с соотношением (2) составит матрицу  $T$ , определяющую базовый вибропортрет конструкции.

В соответствии с описанным выше подходом на основе базового вибропортрета строится базовая матрица откликов  $T^*$  (5), которая содержит совокупность откликов, полученных в ответ на весь набор диагностических ударов. Каждый отклик представляет собой набор значений времени прохождения сигнала от точки удара до каждого из датчиков, пронумерованных в матрице  $NS$ . Так, в ответ на *k*-й диагностический удар по колонне A4/3 отклик представляется матрицей  $T_k^*(RF_k) = \{1,90; 1,50; 1,04; 1,80; 1,52; 1,48; 0,62; 1,70; 1,22; 0,84; 2,00; 1,74; 2,66; 2,08; 2,08; 2,64; 2,30\}$ .

На рис. 2 представлено виброускорение, зарегистрированное на ударнике при диагностическом ударе по колонне C4/3, и соответствующая этому удару виброграмма ускорений, записанная акселерометром № 7, расположенным на ближайшей к месту удара колонне. Длительность импульсной ударной нагрузки, согласно измерению, составляет около 0,35–0,38 мс, и основная энергия импульса локализуется в диапазоне частот до 5 КГц. Характерная максимальная амплитуда воздействий составила 350–500 г. Основные параметры некоторых диагностических ударных воздействий и соответствующих откликов ближайшего к месту удара элемента конструкции приведены в табл. 1. Из представленных результатов видно, что вибрации, возникающие в различных элементах конструкции в ответ на воздействие ударника, имеют различную интенсивность. При этом максимальная амплитуда виброускорений в точках, ближайших к месту удара, почти на 2 порядка меньше, чем на самом ударнике. Максимальная амплитуда ускорений на колонне, расположенной на один этаж выше или ниже места удара, меньше на порядок, а при удалении от места удара в пределах одного этажа уменьшение вибраций выражено слабее.

Проведенный эксперимент позволил оценить время распространения вибрационных сигналов от места



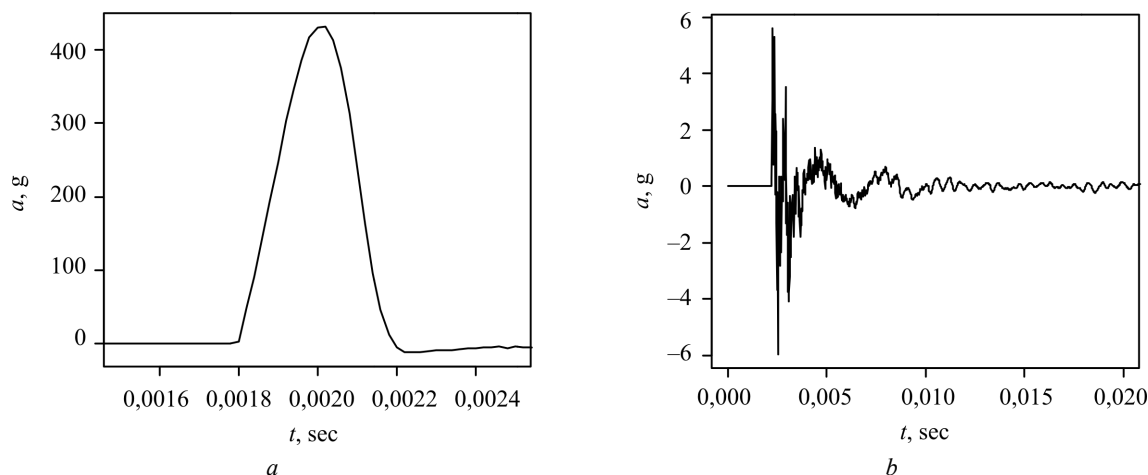


Рис. 2. Ускорения, зарегистрированные при воздействии на колонну C4/3: *a* – на акселерометре ударника; *b* – на датчике № 7

Fig. 2. Accelerations registered during the impact on column C4/3: *a* – on the accelerometer of the impactor, *b* – on sensor No. 7

Таблица 1/Table 1

Параметры диагностических ударных воздействий

Parameters of diagnostic impacts

Параметр	Значение						
	1	2		3			
Этаж							
Номер колонны	B2/1	B1/2	B2/2	A1/3	B2/3	B4/3	C4/3
Макс амплитуда на ударнике $a_{уд}$ , g	347	505	380	486	403	452	432
Длительность удара, мс	0,38	0,30	0,36	0,34	0,34	0,34	0,36
Максимальная амплитуда на ближайшем датчике $a_{датч}$ , g (№ ближайшего датчика, рис. 1)	4,15 (22)	5,73 (14)	5,59 (17)	6,85 (1)	6,25 (3)	5,60 (5)	5,97 (7)

приложения ударной нагрузки до каждого из датчиков. Самый длинный путь, который проходит сигнал по модельной конструкции (от угловой колонны 0-го этажа до противоположной угловой колонны 3-го этажа) преодолевается приблизительно за 3,5–4 мс. Эта величина лимитирует допустимую длительность диагностического сигнала.

На рис. 3 показана картина распределения значений времени распространения сигнала, полученная при диагностическом ударе по середине боковой поверхности колонны A4/3 в направлении оси *X*. На рисунке место приложения и направление удара показано стрелкой. Красными кружками обозначены датчики на колоннах, регистрирующие ускорения в направлении оси *X*, желтыми и синими кружками – соответственно датчики на плитах и ригелях, регистрирующие ускорения в направлении оси *Z*. Флажки на рисунке маркируют время (мс) прохождения сигнала от точки удара до соответствующего датчика. Уменьшение интенсивности окраски флажка от красного до серого соответствует увеличению этого интервала. Из данных рис. 3 хорошо видно, каким сложным образом распространяется по конструкции деформационная волна. Раньше всех на удар откликаются лежащие ниже точки

удара плита перекрытия и ригель, затем отклик распространяется по близлежащим колоннам 3-го этажа и элементам 2-го этажа и только после этого достигает элементов 1-го этажа.

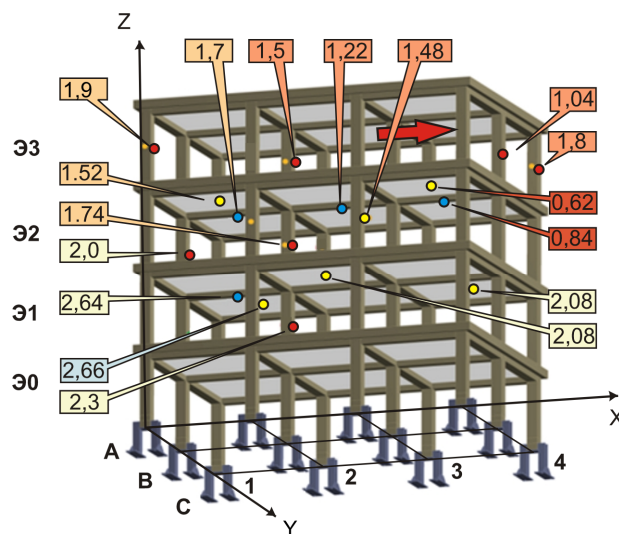


Рис. 3. Распределение времени (мс) распространения сигнала при воздействии на колонну A4/3 в направлении *X*

Fig. 3. Time distribution (ms) of signal propagation when exposed to the column A4/3 in the *X* direction

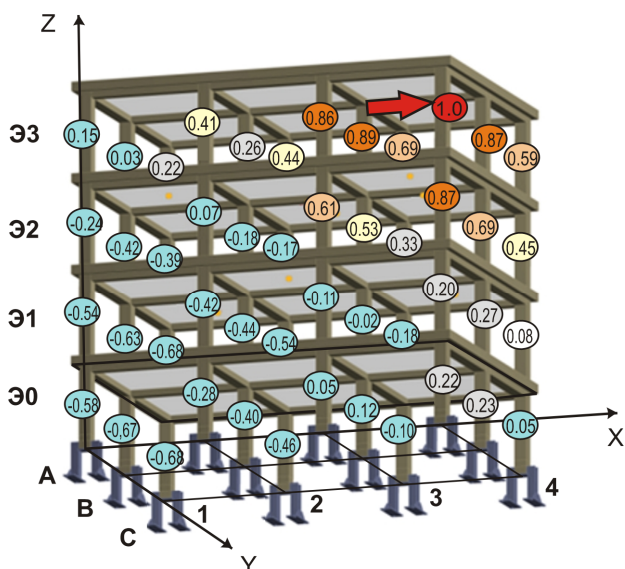


Рис. 4. Распределение коэффициентов корреляции по элементам конструкции, удар по колонне А4/3 в направлении X

Fig. 4. Distribution of correlation coefficients by structural elements, impact on column A4/3 in the X direction

При ударе по неизвестной точке конструкции, характеризуемой радиус-вектором  $\mathbf{RF}_x$ , распределенные датчики регистрируют вибрационный отклик, фиксируемый матрицей отклика  $\mathbf{T}_x^*(\mathbf{RF}_x)$ . Сопоставление этой матрицы со всеми матрицами базовых откликов производится путем вычисления корреляционных коэффициентов по формуле (6). В результате такого сравнения получен набор значений коэффициента корреляции  $r_{x,m}(\mathbf{RF}_x, \mathbf{RF}_m)$ , где  $m$  пробегает значения от 1 до  $K$ , каждое из которых привязано к определенной пространственной точке конструкции с радиус-вектором  $\mathbf{RF}_m$ . Можно представить этот набор значений как массив, распределенный в пространстве по базовым элементам конструкции. Элемент конструкции, отвечающий наибольшему значению коэффициента корреляции по формуле (8), соответствует месту приложения неизвестной нагрузки.

При тестировании данного алгоритма в качестве нагрузки неизвестной локализации был использован один из ударов, участвовавших в формировании массива базовых откликов. В этом случае коэффициент корреляции, равный единице, будет маркировать тот элемент конструкции, по которому нанесен удар неизвестной локализации.

На рис. 4 представлено распределение коэффициента корреляции  $r_{x,m}$  по элементам модельной конструкции, полученное при нанесении «неизвестного» удара по колонне А4/3. Место и направление удара показано стрелкой. Значения коэффициента корреляции, соответствующие каждой колонне на каждом уровне, обозначены цифрами. В точке удара это значение равно единице, а на колоннах, ближайших к месту удара, – от 0,8, до 1. На рисунке цветовая градация цифр от красного до серого соответствует уменьшению значений коэффициента корреляции от 1 до 0,2; меньшие значения маркированы го-

лубым цветом. Для более детального рассмотрения представим этот массив данных в виде табл. 2, в которой значения коэффициента корреляции привязаны к базовым элементам конструкции. Данные представлены в виде трех блоков, соответствующих трем сечениям модельной конструкции вертикальными плоскостями параллельными плоскости XOZ (сечения А, В, С). В пределах каждого блока-сечения значения распределены по рядам колонн (ряды 1–4) и этажам (этажи 0–3).

Данные о значениях коэффициентов корреляции, полученные при трех ударах по колоннам модельной конструкции, позиции которых мы считаем «неизвестными», приведены в табл. 2–4. Жирным шрифтом в таблице выделена позиция, соответствующая месту «неизвестного» удара. Цветной заливкой выделены значения более 0,6; увеличение интенсивности заливки соответствует росту коэффициента корреляции.

Из таблиц видно, что коэффициент корреляции близок к единице в структурных элементах конструкции, прилегающих к месту удара. По мере удаления от этой зоны значения коэффициента быстро уменьшаются. Во всех представленных примерах размеры области, в которой значения коэффициента корреляции близки к единице, сопоставимы с характерным шагом структурных элементов конструкции. Именно этот размер и определяет масштаб точности нахождения места удара. Приведенные примеры демонстрирует работоспособность предложенного подхода для идентификации зоны ударного воздействия.

Далее проанализирована точность локации в зависимости от количества датчиков измерительной сети. На рис. 5, а, приведены графики изменения максимального значения  $L^*$  коэффициента локации, вычисленного по соотношению (10), при изменении количества датчиков. При построении каждой точки графиков предполагалось, что из всего набора датчиков, размещенных на модельной конструкции, для вычисления коэффициента  $L_{xm}$  использовались показания только первых  $N$  датчиков, номера которых записаны в виде последовательности  $\mathbf{NS} = \{1; 7; 22; 20; 15; 4; 9; 18; 14; 19; 21; 5; 8; 12; 17; 2; 3; 6; 11; 13; 16\}$ . Для первой точки были взяты данные первых трех датчиков  $\{1; 7; 22\}$ , а для последней – весь массив. При этом были проанализированы отклики на удары, нанесенные в различных позициях (В1/1, А3/1, А4/0 и В3/2). Коэффициент локации характеризует, насколько коэффициент корреляции для точки, в которой находится предполагаемое место удара, превосходит средние значения по всему объему конструкции, то есть насколько ярко выражен максимум функции распределения коэффициента корреляции в этой точке. Из рисунка видно, что с увеличением количества датчиков, регистрирующих вибрационный отклик конструкции, значение коэффициента локации возрастает. Однако добиться увеличения точности локации за счет этого фактора удастся лишь до некоторого предела. Увеличение количества датчиков больше 9–12 практически не дает приращения  $L^*$ .



Таблица 2/Table 2

Распределение коэффициентов корреляции  $r_{x,m}$  при локализации «неизвестного» удара в позиции А4/3

Distribution of correlation coefficients  $r_{x,m}$  when localizing an "unknown" impact in position A4/3

Этаж	Ряд	Сечение А				Сечение В				Сечение С			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
3		0,148	0,409	0,864	1,000	0,030	0,264	0,895	0,873	0,220	0,442	0,689	0,587
2		-0,243	0,058	0,608	0,866	-0,420	-0,180	0,525	0,695	-0,389	-0,167	0,327	0,451
1		-0,539	-0,425	-0,114	0,199	-0,631	-0,437	-0,016	0,274	-0,680	-0,535	-0,182	0,077
0		-0,579	-0,280	0,054	0,225	-0,670	-0,403	0,122	0,235	-0,677	-0,461	-0,103	0,050

Таблица 3/Table 3

Распределение коэффициентов корреляции  $r_{x,m}$  при локализации «неизвестного» удара в позиции А4/1

Distribution of correlation coefficients  $r_{x,m}$  when localizing an "unknown" impact in position A4/1

Этаж	Ряд	Сечение А				Сечение В				Сечение С			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
3		-0,618	-0,319	-0,029	0,199	-0,496	-0,202	0,263	0,168	-0,507	-0,349	-0,090	-0,157
2		-0,395	-0,094	0,527	0,525	-0,175	0,165	0,670	0,460	-0,175	0,076	0,316	0,195
1		-0,188	0,115	0,771	1,000	-0,013	0,287	0,890	0,714	0,075	0,303	0,657	0,465
0		-0,260	0,329	0,774	0,935	-0,202	0,170	0,840	0,684	-0,007	0,296	0,595	0,475

Таблица 4/Table 4

Распределение коэффициентов корреляции  $r_{x,m}$  при локализации «неизвестного» удара в позиции А4/0

Distribution of correlation coefficients  $r_{x,m}$  when localizing an "unknown" impact in position A4/0

Этаж	Ряд	Сечение А				Сечение В				Сечение С			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
3		-0,649	-0,346	-0,063	0,225	-0,546	-0,291	0,234	0,230	-0,610	-0,394	-0,096	-0,065
2		-0,462	-0,138	0,483	0,562	-0,287	0,028	0,619	0,510	-0,320	-0,080	0,279	0,264
1		-0,268	0,033	0,667	0,935	-0,125	0,207	0,795	0,737	-0,055	0,182	0,575	0,519
0		-0,272	0,274	0,760	1,000	-0,248	0,067	0,829	0,773	-0,044	0,225	0,612	0,580

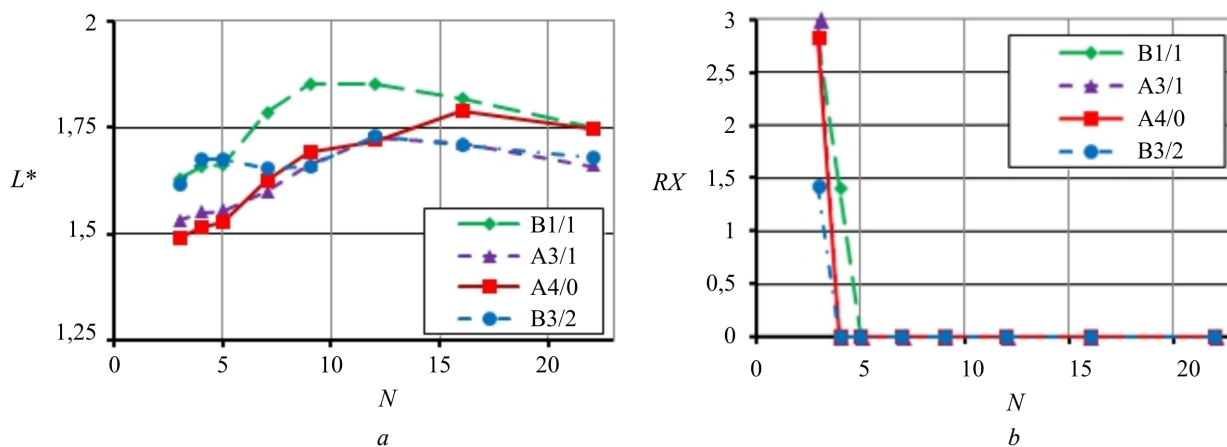


Рис. 5. Качество локации в зависимости числа датчиков  $N$ :  $a$  – максимальные значения коэффициента локации  $L^*$ ;  $b$  – расстояние между истинной и предсказанной точками удара

Fig. 5. Location quality depending on the number of sensors  $N$ :  $a$  – the maximum value of the location coefficient  $L^*$ ,  $b$  – the distance between the true and predicted points of impact

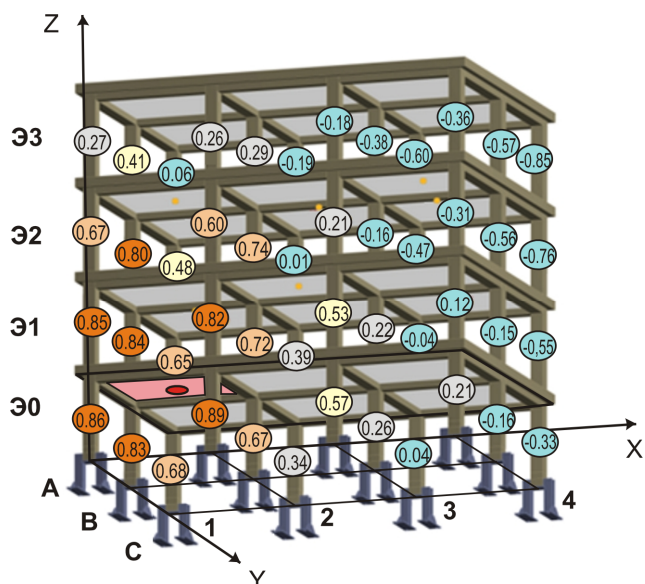


Рис. 6. Распределение коэффициентов корреляции по элементам конструкции, удар по плите A1B2/1 в направлении Z

Fig. 6. Distribution of correlation coefficients by structural elements, impact on plate A1B2/1 in direction Z

При малом количестве датчиков (менее 5 в нашем эксперименте) предложенный алгоритм в ряде случаев дает недостаточно точную идентификацию места ударного воздействия. В качестве найденной точки удара предлагаются точки конструкции, расположенные рядом с истинной. На рис. 5, b, оценено расстояние RX между истинной и найденной точкой ударного воздействия (отнесенное к характерному шагу конструкции) в зависимости от количества датчиков. Как показывает рисунок, при использовании регистрирующей системы, имеющей 5 датчиков и более, точка воздействия идентифицируется верно ( $R_X = 0$ ).

Отдельной проблемой является выбор места расположения датчиков на конструкции. Эксперимент показывает, что размещение всех датчиков вдали от места ударного воздействия приводит к ошибочной идентификации места удара. Так, при ударе по колонне A4/0 набор из 5 датчиков, сосредоточенных на колоннах верхнего этажа (№ 2, 4, 5, 6) и перекрытии того же этажа (№ 8), значение коэффициента локализации в истинной точке удара составляет  $L^* = 1,32$ , тогда как его макси-

мальные значения реализуются на расстоянии  $R_X = 1,5$  от этой точки. Другой набор датчиков – на трех колоннах 2-го и 3-го этажей (№ 4, 5, 15) и двух плитах перекрытия (№ 9, 10), при такой же позиции точки удара дает максимальные значения коэффициента  $L^* = 1,60$  в точке истинного удара.

Следующий пример иллюстрирует результаты применения разработанного алгоритма для случая, когда при формировании вибропортрета диагностические удары были осуществлены только по колоннам, а удар неизвестной локализации приходился на структурный элемент другого типа (в данном примере – на плиту перекрытия). На рис. 6 изображено распределение коэффициентов корреляции по элементам конструкции при локализации «неизвестного» удара в центре плиты A1B2/1. Красной окружностью выделена позиция точки удара, цветовая градация цифр от красного до серого соответствует уменьшению значений коэффициента корреляции от 1 до 0,2; меньшие значения маркированы голубым цветом. Из рисунка видно, что, поскольку позиция точки удара не совпадает с позициями точек, для которых рассчитаны коэффициенты корреляции, единичного значения коэффициента не получено. Однако на колоннах, примыкающих к плите, испытывающей удар, значения коэффициента корреляции существенно превосходят фоновые. Таким образом, выделилась зона, чувствительная к удару. Она ограничена ячейками модельной конструкции, прилегающими сверху и снизу к зоне удара.

Распределение коэффициентов корреляции по элементам конструкции можно подробно рассмотреть в табл. 5. Структура и интерпретация таблицы такая же, как в предыдущих примерах. В таблице выделены жирным шрифтом позиции, соответствующие колоннам, прилегающим к плите, испытывающей удар. Цветной заливкой выделены позиции колонн, для которых коэффициент корреляции больше 0,6, при этом интенсивность заливки усиливается с ростом значения. Из данных табл. 5 видно, что зона, в которой значения коэффициента корреляции существенно превосходят фоновые значения, лежит в области, ограниченной колоннами A1/0, A1/1, A2/0, A2/1 в сечении А и B1/0, B1/1, B2/0, B2/1 в сечении В.

Таблица 5/Table 5

Распределение коэффициентов корреляции  $r_{x,m}$  при локализации «неизвестного» удара в позиции: плита A1B2/1

Distribution of correlation coefficients  $r_{x,m}$  when localizing an "unknown" impact in position A1B2/1

Этаж \ Ряд	Сечение А				Сечение В				Сечение С			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
3	0,272	0,263	-0,180	-0,358	0,414	0,288	-0,376	-0,573	0,058	-0,193	-0,602	-0,848
2	0,671	0,600	0,211	-0,306	0,799	0,745	-0,166	-0,567	0,483	0,014	-0,467	-0,762
1	<b>0,853</b>	<b>0,825</b>	0,535	0,117	<b>0,839</b>	<b>0,727</b>	0,224	-0,155	0,652	0,391	-0,041	-0,546
0	<b>0,860</b>	<b>0,892</b>	0,576	0,209	<b>0,832</b>	<b>0,671</b>	0,256	-0,163	0,682	0,338	0,044	-0,332

## Заключение

Предложен подход, позволяющий на основании анализа вибрационных свойств сложной пространственной конструкции определять место локализованного ударного воздействия на нее. Возможности данного подхода продемонстрированы на примере конструкции, представляющей собой модель 4-этажного железобетонного здания в масштабе 1:2.

Обработка полученных экспериментальных результатов в соответствии с предложенным алгоритмом позволила

установить место ударного воздействия на конструкцию с точностью, соответствующей характерному шагу элементов конструкции. Продемонстрирована зависимость качества идентификации места приложения импульсного воздействия от числа датчиков системы регистрации вибрационного отклика и порядка из распределения по конструкции.

В целом полученные результаты демонстрируют конструктивизм и эффективность предложенного подхода и открывают перспективы его использования для мониторинга деформационного состояния сложных инженерных сооружений различного типа.

## Библиографический список

1. Притыкин В.Н., Долганев Ю.Г. Использование датчиков акустических волн для определения координат отражения мяча от щита при баскетбольных бросках [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–2. – С. 127. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19893> (дата обращения: 10.09.2022).
2. Обнаружение региональных фаз объемных сейсмических волн с помощью группы трехкомпонентных датчиков / И.О. Китов, С.Г. Волосов, С.Б. Кишкина, Н.Л. Константиновская, К.С. Непейна, М.А. Нестеркина, И.А. Санина // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 27–45.
3. Syten'ky V.D. Determination of coordinates of seismic wave source by amplitude method of passive location // *Geodynamics & Tectonophysics*. – 2012. – Vol. 3 (4). – P. 409–416. DOI: 10.5800/GT2012340082.
4. Magotra N., Ahmed N., Chael E. Seismic Event detection and source Location Using Single-Station (Three-Component) Data // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1987. – Vol. 77 (3). – P. 958–971.
5. Grosse C.U., Ohtsu M. *Acoustic Emission Testing* // Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. – 406 p. DOI: 10.1007/978-3-540-69972-9
6. Tobias A. Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors // *Non-Destructive Testing*. – 1976. – Vol. 9, iss. 1. – P. 9–12.
7. Low-velocity impact localization on composites under sensor damage by interpolation reference database and fuzzy evidence theory / H.Y. Li, Z. Wang, J. Forrest [et al.] // *IEEE Access*. – 2018. – Vol. 6. – P. 31157–31168. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2844802
8. Wave-based impact localization on laminated composite plates using a coarse network of sensors / T.C. Theodosiou, C.S. Rekatsinas, C.V. Nastos, D.A. Saravanos // *Structural Health Monitoring*. – 2019. – Vol. 18, is. 5–6. – P. 2040–2055. DOI: 10.1177/1475921719830066
9. Ciampa F., Meo M., Barbieri E. Impact localization in composite structures of arbitrary cross section // *Structural Health Monitoring*. – 2012. – Vol. 11 (6). – P. 643–655. DOI: 10.1177/1475921712451951
10. Si L., Baier H. An in situ ensemble impact monitoring and identification technique for fiber composite structures under multiple disturbances // *Structural Health Monitoring*. – 2016. – Vol. 15, iss. 3. – P. 247–265. DOI: 10.1177/1475921716636334
11. Метод локализации воздействия в композитном материале с помощью волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии / С.Д. Бочкова, С.А. Волковский, М.Е. Ефимов [и др.] // *Приборы и техника эксперимента*. – 2020. – № 4. – С. 73–77. DOI: 10.31857/S0032816220040230
12. Impact localization with a weighted spectral cross correlation method / W. Jiang, L. Du, Z. Luo, Z. Wang, H. Song // *Aerospace Science and Technology*. – 2022. – Vol. 126. – P. 107591
13. Locating acoustic emission sources in complex structures using gaussian processes / J. Hensman, R. Mills, S. Pierce, K. Worden, M. Eaton // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2010. – Vol. 24 (1). – P. 211–223.
14. Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique / S.Kh. Al-Jumaili, M.R. Pearson, K.M. Holford, M.J. Eaton, R. Pullin // *Mech. Syst. Signal Process.* – 2016. – Vol. 72–73. – P. 513–524. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.11.026
15. A Bayesian methodology for localising acoustic emission sources in complex structures / M.R. Jones, T.J. Rogers, K. Worden, E.J. Cross // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2022. – Vol. 163. – 108143. DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.108143
16. Li Q., Lu Q. Impact localization and identification under a constrained optimization scheme // *Journal of Sound and Vibration*. – 2016. – Vol. 366. – P. 133–148. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.12.010
17. Impact source localisation in aerospace composite structures / M.E. De Simone, F. Ciampa, S. Boccardi, M. Meo // *Smart Materials and Structures* – 2017. – Vol. 26 (12). – P. 125026. DOI: 10.1088/1361-665x/aa973e
18. Zemic R., Bartosek J., Kroupa T. Impact reconstruction and localization on laminated structure // *Mater. Today Proc.* – 2018. – Vol. 5 (13). – P. 26596–26602. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.08.122
19. B Park and all Impact localization in complex structures using laser-based time reversal // *Structural Health Monitoring*. – 2012. – Vol. 11 (5). – P. 577–588. DOI: 10.1177/1475921712449508
20. Shrestha P., Park Y., Kim C.-G. Low velocity impact localization on composite wing structure using error outlier based algorithm and FBG sensors // *Composites Part B: Engineering*. – 2017. – Vol. 116. – P. 298–312. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.068
21. Three-Dimensional Impact Localization on Concrete Structures Using Novel Enhanced Cross-Correlation Algorithm and Designed Concrete Implantable Module / Q. Chen, Z. Yang, X. Li, X. Sun, Q. Kong // *Frontiers in Materials*. – 2022. – P. 909006. DOI: 10.3389/fmats.2022.909006
22. Saleem M.M., Jo H. Impact force localization for civil infrastructure using augmented Kalman filter optimization // *Smart Mater. Struct.* – 2019. – Vol. 23 (2). – P. 123–139. DOI: 10.1088/1361-665x/aa6768
23. Estimation of impact location on concrete column / J. Zhu, S.C.M. Ho, Q. Kong, D. Patil, Y.-L. Mo, G. Song // *Smart Materials and Structures*. – 2017. – Vol. 26 (5). – P. 055037. DOI: 10.1088/1361-665x/aa6768

24. Detection of source locations in RC columns using machine learning with acoustic emission data / A. Jierula, S. Wang, T.-M. Oh, J.-W. Lee, J. Lee // *Engineering Structures*. – 2021. – Vol. 246. – P. 112992. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112992
25. Manawadu A., Qiao P. Impact identification on concrete panels using a surface-bonded smart piezoelectric module system // *Smart Materials and Structures*. – 2022. – Vol. 31 (1). – P. 015044. DOI: 10.1088/1361-665x/ac3c03
26. Structural monitoring: Identification and location of an impact on a structurally dissipating rock-shed structure using the inverse method / Z. Boukria, P. Perrotin, A. Bennani, F. Dupray, A. Limam // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2012. Vol. 16 (1). – P. 20–42. DOI: 10.1080/19648189.2012.667204
27. Пространственно-временное распределение деформационных процессов в железобетонной конструкции при ударно-волновом воздействии (расчет, эксперимент) / И.О. Глот, В.П. Матвеев, Р.В. Цветков, И.Н. Шардаков, А.П. Шестаков // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. – 2019. – № 2. – С. 72–84. DOI: 10.1134/S0572329919020053
28. Martin M.T., Doyle J.F. Impact force location in frame structures // *International Journal of Impact Engineering*. – 1996. – Vol. 18, no. 1. – P. 79–97. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00016-9.
29. A wavelet-based scheme for impact identification of framed structures using combined genetic and water cycle algo-

- rithms / S.H. Mahdavi, F.R. Rofooei, A. Sadollah, C. Xu // *Journal of Sound and Vibration*. – 2019. – Vol. 443. – P. 25–46. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.11.022
30. Neziric E., Isic S. Impact Force Localization Using Eigenfrequency Measurement in Plane Frames // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2020. – Vol. 128. – P. 39–47. DOI: 10.1007/978-3-030-46817-0\_4
31. Single-sensor approach for impact localization and force reconstruction by using discriminating vibration modes / D. Goutaudier [et al.] // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – Vol. 138. – 106534 DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.106534
32. In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process / R.K. Ing, N. Queffrin, S. Cathelinea, M. Fink // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 87. – 204104. DOI: 10.1063/1.2130720
33. Douma J., Niederleithinger E., Snieder R. Locating Events Using Time Reversal and Deconvolution: Experimental Application and Analysis // *J Nondestruct Eval.* – 2015. – Vol. 34. – P. 2. – DOI: 10.1007/s10921-015-0276-x
34. Pearson K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents // *Proceedings of the Royal Society of London*. – 1895. – Vol. 58. – P. 240–242.
35. Experimental study of deformation processes in large-scale concrete structures under quasistatic loading / I. Shardakov, I. Glot, A. Shestakov, R. Tsvetkov, V. Yepin, G. Gusev // *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. – 2020. – Vol. 15, no. 5. – P. 619–633. DOI: 10.2140/jomms.2020.15.619

## References

1. Pritykin V.N., Dolganov Yu.G. Ispol'zovanie datchikov akusticheskikh voln dlya opredeleniya koordinat otrazheniya myacha ot shchita pri basketbol'nyh broskah [Acoustic wave sensors using to localize the coordinates of the reflection of the ball from the shield during basketball throws]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia – Modern Problems of Science and Education*, 2015, No. 1-2, pp. 127. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=19893> (дата обращения: 10.09.2022).
2. Kitov I.O., Volosov S.G., Kishkina S.B., Konstantinovskaya N.L., Nepeina K.S., Nesterkina M.A., Sanina I.A. Detection of regional phases of seismic body waves using an array of three-component sensors. *Seismic Instruments*, 2016, Vol. 52, pp. 19–31. DOI: 10.3103/S0747923916010060
3. Syten'ky V.D. Determination of coordinates of seismic wave source by amplitude method of passive location. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2012, Vol. 3 (4), pp. 409–416. DOI: 10.5800/GT2012340082.
4. Magotra N., Ahmed N., Chael E. Seismic Event detection and source Location Using Single-Station (Three-Component) Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, Vol. 77 (3), P. 958-971.
5. Grosse C.U., Ohtsu M. Acoustic Emission Testing. *Berlin, Heidelberg: Springer*, 2008, 406p. DOI: 10.1007/978-3-540-69972-9.
6. Tobias A. Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors. *Non-Destructive Testing*, 1976, Vol. 9, iss. 1, pp. 9–12.
7. H.Y. Li, Z. Wang, J. Forrest, et al., Low-velocity impact localization on composites under sensor damage by interpolation reference database and fuzzy evidence theory. *IEEE Access*, 2018, Vol. 6, P. 31157-31168. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2844802
8. Theodosiou T.C., Rekatsinas C.S., Nastos C.V., Saravanos D.A. Wave-based impact localization on laminated composite plates using a coarse network of sensors. *Structural Health monitoring*, 2019, Vol. 18, is.5-6, P. 2040-2055. DOI: 10.1177/1475921719830066
9. Ciampa, F., Meo, M., Barbieri, E. Impact localization in composite structures of arbitrary cross section. *Structural Health Monitoring*, 2012, Vol. 11 (6), P. 643-655. DOI: 10.1177/1475921712451951
10. Si L., Baier H. An in situ ensemble impact monitoring and identification technique for fiber composite structures under multiple disturbances. *Structural Health Monitoring*, 2016, Vol.15, iss.3, P. 247-265. DOI: 10.1177/1475921716636334
11. Bochkova S.D., Volkovsky S.A., Efimov M.E., Deineka I.G., Smirnov D.S., Litvinov E.V. A method for determining the locations of impacts in a composite material using fiber optical acoustic emission sensors. *Instruments and Experimental Techniques*, 2020, Vol. 63, No. 4, P. 507-510. DOI: 10.31857/S0032816220040230
12. Jiang W., Du L., Luo Z., Wang Z., Song H. Impact localization with a weighted spectral cross correlation method. *Aerospace Science and Technology*, 2022, V.126, P. 107591
13. Hensman J., Mills R., Pierce S., Worden K., Eaton M. Locating acoustic emission sources in complex structures using gaussian processes. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, Vol. 24 (1), P. 211–223.
14. Al-Jumaili S.Kh., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin R. Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique. *Mech. Syst. Signal Process*, 2016, Vol. 72–73, P. 513-524. DOI: 10.1016/j.ymsp.2015.11.026
15. Jones M.R., Rogers T.J., Worden K., Cross E.J. A Bayesian methodology for localising acoustic emission sources in complex structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, Vol.163, 108143. DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.108143
16. Li Q., Lu Q. Impact localization and identification under a constrained optimization scheme. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, Vol. 366, P. 133–148. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.12.010

17. De Simone, M.E., Ciampa, F., Boccardi, S., Meo, M. Impact source localisation in aerospace composite structures. *Smart Materials and Structures* – 2017, Vol. 26 (12), P. 125026. DOI: 10.1088/1361-665x/aa973e
18. Zemčík R., Bartosek J., Kroupa T. Impact reconstruction and localization on laminated structure. *Mater. Today Proc*, 2018, Vol. 5 (13), P. 26596–26602. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.08.122
19. B Park and all Impact localization in complex structures using laser-based time reversal. *Structural Health Monitoring*, 2012, Vol. 11 (5), P. 577–588. DOI: 10.1177/1475921712449508
20. Shrestha, P., Park, Y., Kim, C.-G. Low velocity impact localization on composite wing structure using error outlier based algorithm and FBG sensors. *Composites Part B: Engineering*, 2017, Vol. 116, P. 298–312. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.10.068
21. Chen Q., Yang Z., Li X., Sun X., Kong Q. Three-Dimensional Impact Localization on Concrete Structures Using Novel Enhanced Cross-Correlation Algorithm and Designed Concrete Implantable Module. *Frontiers in Materials*, 2022, P. 909006. DOI: 10.3389/fmats.2022.909006
22. Saleem M.M., Jo H. Impact force localization for civil infrastructure using augmented Kalman filter optimization. *Smart Mater. Struct*, 2019, Vol. 23 (2), P. 123–139. DOI: 10.12989/sss.2019.23.2.123
23. Zhu, J., Ho, S.C.M., Kong, Q., Patil, D., Mo, Y.-L., Song, G. Estimation of impact location on concrete column. *Smart Materials and Structures*, 2017. Vol. 26 (5). P. 055037. DOI: 10.1088/1361-665X/aa6768
24. Jierula, S. Wang, T-M Oh, J-W. Lee, J. Lee. Detection of source locations in RC columns using machine learning with acoustic emission data. *Engineering Structures*, 2021, Vol. 246. P. 112992. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112992
25. Manawadu, A., Qiao, P Impact identification on concrete panels using a surface-bonded smart piezoelectric module system. *Smart Materials and Structures*, 2022, Vol. 31 (1), P. 015044. DOI: 10.1088/1361-665x/ac3c03
26. Boukria Z., Perrotin P., Bennani A., Dupray F., Limam A. Structural monitoring: Identification and location of an impact on a structurally dissipating rock-shed structure using the inverse method. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2012. Vol. 16 (1), P. 20–42. DOI: 10.1080/19648189.2012.667204
27. Glot I.O., Matveenko V.P., Tsvetkov R.V., Shardakov I.N., Shestakov A.P. Spatiotemporal Distribution of Deformation Processes in Reinforced Concrete Structure under Shock-Wave Exposure (Simulation & Experiment). *Mechanics of solids*, 2019, Vol. 54, iss. 3, P. 420–428. DOI: 10.3103/S0025654419020055
28. Martin M.T., Doyle J.F. Impact force location in frame structures. *International Journal of Impact Engineering*, 1996, Vol. 18, No. 1, P. 79–97. DOI: 10.1016/0734-743X(95)00016-9.
29. Mahdavi S.H., Rofooei F.R., Sadollah A., Xu C. A wavelet-based scheme for impact identification of framed structures using combined genetic and water cycle algorithms. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, Vol. 443.– P. 25–46. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.11.022
30. Neziric E., Isic S. Impact Force Localization Using Eigenfrequency Measurement in Plane Frames. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2020, Vol. 128, P.39–47. DOI: 10.1007/978-3-030-46817-0\_4
31. Goutaudier D. et al. Single-sensor approach for impact localization and force reconstruction by using discriminating vibration modes. *Mechanical Systems and Signal Processing* 138 (2020) 106534 DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106534
32. Ing R.K., Quieffin N., Cathelinea S., Fink M. In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process. *Appl. Phys. Lett.* 2005, Vol. 87, 204104. DOI: 10.1063/1.2130720
33. Douma J., Niederleithinger E., Snieder R. Locating Events Using Time Reversal and Deconvolution: Experimental Application and Analysis. *J Nondestruct Eval* (2015) 34: 2 DOI: 10.1007/s10921-015-0276-x
34. Pearson K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1895, Vol. 58, P.240–242.
35. Shardakov I., Glot I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V., Gusev G. Experimental study of deformation processes in large-scale concrete structures under quasistatic loading. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2020, Vol. 15, No. 5, P. 619–633. DOI: 10.2140/jomms.2020.15.619

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00108, <https://rscf.ru/project/22-19-00108>.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Financing.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00108, <https://rscf.ru/project/22-19-00108>.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.