



Construction of Unique Buildings and Structures



journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru



doi: 10.18720/CUBS.68.5

Идентификация повреждений методом подвижного фрактала при автоматизированном мониторинге

Damage identification using the moving fractal method for automated monitoring

В.Л. Венгринович¹, В.Н. Рябцев^{2*}

¹Институт прикладной физики Национальной Академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

V.L. Vengrinovich¹, V.N. Ryabtsev^{2*}

¹Institute of Applied Physics of the Belarus National Academy of Science, Minsk, Belarus

²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

мониторинг технического состояния;
строительные конструкции;
датчики;
дефект;
фрактал;

KEYWORDS

monitoring of technical condition;
building structures;
sensors;
damage;
fractal;

ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 03.04.2018

Принята: 26.07.2018

ARTICLE HISTORY

Submitted: 03.04.2018

Accepted: 26.07.2018

АННОТАЦИЯ

Автоматизированная система мониторинга технического состояния здания или сооружения предназначена для выдачи актуальной информацией о степени износа строительных конструкций, а также о появлении в них дефектов. Распознавание дефектов достигается обработкой многосенсорной матричной информации на выходе системы мониторинга, состоящей из большого числа датчиков, непрерывно измеряющих параметры сооружения: углы наклонов, ускорения, деформации несущих конструкций. В статье предложен метод распознавания дефектов, основанный на анализе периодически поступающих в компьютер данных, представленных в матричном виде. Каждая строка матрицы представляет из себя последовательность величин, считываемых с каждого датчика. Количество строк равно числу опрашиваемых датчиков. Для обработки этих данных из большой прямоугольной матрицы выделяют квадратную матрицу, из которой в процессе обработки выделяют ее характеристики: главные значения, главные вектора, коэффициенты корреляции и пр. Движущаяся квадратная матрица названа нами движущимся фракталом. В процессе моделирования системы определяются зависимости параметров матрицы от дефектов в конструкции. Практическое применение предлагаемого метода проиллюстрировано на компьютерной модели реального высотного здания. Выполненные исследования показывают, что метод подвижного фрактала позволяет идентифицировать появление дефектов в несущих конструкциях.

ABSTRACT

An automated system for Structural Health Monitoring of a building or structure is designed to provide its owner with up-to-date information on the degree of deterioration of building structures, as well as on the appearance of damages. However, up to the present time, the problem of recognizing damages and predicting their emergence is still far from being solved. This article suggests a method of damage recognition, based on the analysis of monitoring data on the technical condition of building structures. The method considered in the article is based on the matrix analysis of information coming from the sensors using a movable fractal. The practical application of the proposed method is illustrated on the computer model of a real high-rise building. The carried-out researches show that the method of the movable fractal allows to uniquely identify the appearance of defects in load-bearing structures.

Содержание

1.	Введение	53
2.	Методы	54
3.	Результаты и обсуждение	55
4.	Заключение	60

1. Введение

Непрерывный мониторинг высотных зданий и других уникальных, например, большепролетных, сооружений при помощи различного типа датчиков необходим для повышения безопасности этих конструкций при любых возможных внешних и внутренних воздействиях [1-4]. Датчики с назначаемой периодичностью передают в общий компьютер данные о состоянии (параметрах) элементов конструкции в месте их установки: ускорения, углы наклона и нагрузки на несущие элементы (колонны, несущие ядра и пр.). По экономическим соображениям число датчиков ограничено, но задача мониторинга состоит в обнаружении любого опасного дефекта или повреждения в режиме реального времени в любом месте сооружения (а не только в месте установки датчика). Ввиду особой ответственности конструкций определенные успехи достигнуты в этом направлении в авиастроении [5, 6]. В математическом смысле эта задача относится к классу задач прогнозирования технических систем по ограниченным данным [7, 8]. Другая задача мониторинга состоит в снижении затрат на эксплуатацию сооружений, которые могут в разы превышать затраты на строительство. На рис.1 на основании данных Национального объединения проектировщиков РФ [9] показаны усредненные затраты на протяжении жизненного цикла здания



Рисунок 1. Усреднённые затраты на протяжении жизненного цикла здания.

Как видно, эксплуатационные затраты составляют значительную часть всех затрат. В свою очередь, затраты на обнаружение дефектов в конструкции существующим методом периодического обследования также составляют весомую часть совокупных эксплуатационных затрат и могут быть уменьшены проведением полномасштабного текущего мониторинга [10, 11], называемого обычно SHM (STRUCTURAL HEALTH MONITORING), который состоит в обнаружении эксплуатационных дефектов и повреждений (далее по тексту – дефектов) по данным измерения некоторых характеристик элементов сооружения (углов наклона, нагрузок, ускорений, базовых расстояний, ветровых нагрузок [11, 12] и пр.), которые снимаются периодически. Дальнейшая задача состоит в своевременном распознавании дефектов [11] и определении степени их опасности в конструкции по этим большим данным мониторинга (big data) [13, 14].

Тогда как техническая задача съема и передачи текущей информации с датчиков, как правило, успешно решается, задачи распознавания и прогнозирования далеки от решения [14]. Они относятся математически к вероятностным задачам теорий надежности и управления, и предполагают на подготовительной стадии большой объем ситуационного моделирования [11, 15] (СМ) объекта. СМ относится к категории прямых задач, тогда как задача распознавания – к категории обратных [16-19]. Известно [5], что знание решения последних предполагает знание решения прямых задач [20]. В рамках SHM они формулируются так: определить показания датчиков при возникновении дефекта определенного типа. Эта задача рассматривается в настоящей статье с помощью предложенного авторами метода «движущегося фрактала». Решение этой задачи предваряет решение задачи типа: восстановить тип дефекта по набору показаний датчиков [19]. Эта обратная задача предполагается к рассмотрению в дальнейших статьях.

Задача предупреждения о появлении в конструкции опасных дефектов, угрожающих обрушению здания, как правило, решается путем сравнения результатов мониторинга в виде сигналов, характеризующих нормируемые параметры устойчивости сооружения (углы наклона, ускорения, нагрузки на несущие элементы и пр.), с аналогичными текущими значениями параметров. Очевидно, что такой подход не предназначен для обнаружения дефектов в любом месте сооружения, отличном от места установки датчика. Существует также более прогрессивный подход [23], который предполагает выделение характеристик прямоугольной матрицы в каждый текущий момент времени мониторинга, превращение ее в квадратную (т.к. только у квадратной матрицы можно выделить ее главные значения и другие чувствительные параметры), определение характеристик этой матрицы и сопоставление их со значениями, определяемыми на этапе моделирования. Такой подход связан: 1) с потерей данных в процессе преобразования прямоугольной матрицы в квадратную; 2) с необходимостью сравнения матриц, имеющих различный ранг по мере удлинения процесса мониторинга. В настоящей статье предлагается метод, названный «движущимся фракталом», в котором с момента начала эксплуатации создается квадратный фрактал в виде квадратной матрицы, равной количеству датчиков, который движется по мере накопления данных мониторинга всеми датчиками, а параметры квадратной матрицы при смещении на один шаг вычисляются и сравниваются с параметрами на предыдущем шаге и в процессе численного моделирования. В результате этого преодолевается 2-ой недостаток, а вместе с ним – и первый.

Целью настоящей статьи является предложение одного из методов обработки больших данных приборного мониторинга, позволяющего извлечение информации о дефектах в объекте из косвенных матричных данных, представляющих показания датчиков системы мониторинга технического состояния зданий и сооружений.

2. Методы

Множество данных на выходе SHM системы обычно представляется в виде двумерного динамического массива данных, фрагмент которого показан на рис 2а [13]. Такой массив данных непрерывно поступает в компьютер в течение всего времени мониторинга. Задача состоит в извлечении из этого массива данных информации о наличии дефектов в объекте. Для этого фрагмент массива конечных размеров представляют в виде прямоугольной матрицы. Наиболее полными считаются способы обработки матричных данных, называемые PCA (Principle Component Analysis) [14] и ICA (Independent Component Analysis). Недостаток обоих методов вытекает из структуры матрицы мониторинга. Для выделения свойств матрицы необходима квадратная матрица. Поэтому при необходимости проанализировать большую прямоугольную матрицу ее превращают в квадратную, теряя часть полезной информации, и лишь затем анализируют. В нашем алгоритме из прямоугольной матрицы выделяется первый фрактал в виде квадратной матрицы, в данном случае 10x10 (где 10 – число рядов, равное числу датчиков). Этот квадрат является фракталом, сдвигающимся каждый раз на один шаг при добавлении в матрицу очередного столбца после того, как проанализированы характеристики текущего фрактала.

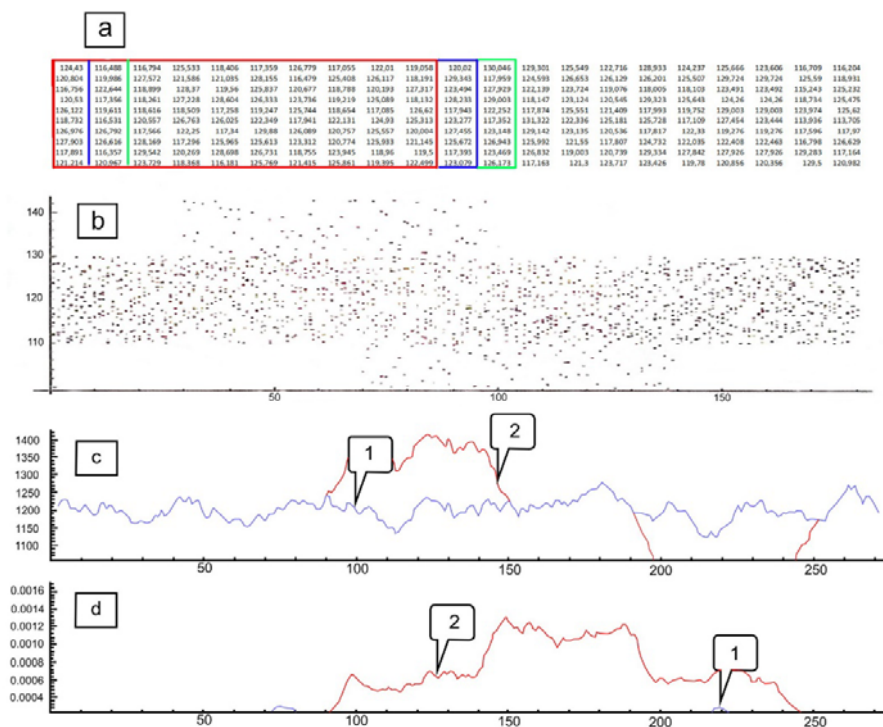


Рисунок 2. Способ оценки результатов мониторинга технического состояния с помощью движущегося фрактала

Выбор значимых матричных характеристик, реагирующих на появление повреждения в конструкции, составляет сущность последующего анализа фракталов и в целом мониторинга. На рис.2с показаны изменения 1-го собственного значения фракталов при мониторинге опорного кольца комплекса Минск-Арена. Видно, что незначительные изменения некоторых данных (рис.2а) вызывают значимые изменения 1-го собственного значения и 1-го собственного вектора, показанные на рис. 2d соответственно. Чувствительность других статистических характеристик матрицы оказалась недостаточной для надежного выявления дефекта.

Главной задачей системы SHM является обнаружение различного рода повреждений в конструкции, их характера и расположения. Как правило, к таким повреждениям относят изменение свойств материалов, изменение геометрических размеров сечений и условий закрепления несущих элементов строительных конструкций. Решение этой задачи не является технически простым. В качестве подтверждения этого тезиса достаточно привести пункт Б.4 действующего в РФ стандарта [21]: «В настоящее время не существует такого устройства, которое могло бы автоматически исследовать все части здания, конструкции, элементы конструкций, узлы соединения, выявить их дефекты и сделать надлежащие выводы».

Тем не менее, работы в этом направлении активно ведутся по всему миру. Достаточно сказать, что в США эти работы возглавляет группа известных математиков Лос-Аламосской национальной лаборатории [14, 22]. Исследователями рассматриваются реакции сооружения на различные критические воздействия, такие, как штормы, землетрясения, вибрации и пр. Наиболее распространёнными параметрами для описания реакции сооружения на внешнее воздействие являются следующие: изменение усилий и деформаций в элементах конструкции от статических и квазистатических воздействий, изменение взаимного перемещения элементов конструкции и конструкции в целом, изменение динамических характеристик конструкции.

Таким образом, следующим шагом в поиске и оценке повреждений с помощью системы SHM является поиск взаимосвязей значимых параметров фракталов с искомыми повреждениями в конструкции. Этот этап может выполняться путем ситуационного моделирования реакции измеряемых параметров на прогнозируемые повреждения объекта, например, изменения прочности бетона, или коррозии арматуры железобетона, или разрушение одной из колонн и т. д., т.е. выявление наиболее чувствительных к появлению дефектов параметров. Новая конструкция, как правило, не имеет значительных дефектов, и предсказать изменение поведения сооружения при появлении в конструкции дефекта оказывается возможным только путём сравнения свойств компьютерной модели сооружения без дефектов и с дефектами или повреждениями. Центральным при данном подходе является поиск таких параметров матрицы сигналов мониторинга, которые были бы взаимосвязаны с появляющимися дефектами в конструкции.

Размеры дефекта значительно меньше размеров сооружения, вследствие чего параметры отклика модели при появлении дефекта в конструкции изменяются совсем незначительно; как правило, они составляют величину, сопоставимую с погрешностью измерений. Поэтому должны предъявляться жесткие требования к погрешности измерительных приборов и фильтрации данных. Эти задачи находятся за пределами данной работы. Метод фракталов [13] требует высокой чувствительности информативного параметра фрактала к данному типу повреждения.

3. Результаты и обсуждение

Для иллюстрации метода рассмотрен мониторинг высотного здания, изображение которого в плане на отметке +84,2м показано на рис.3.

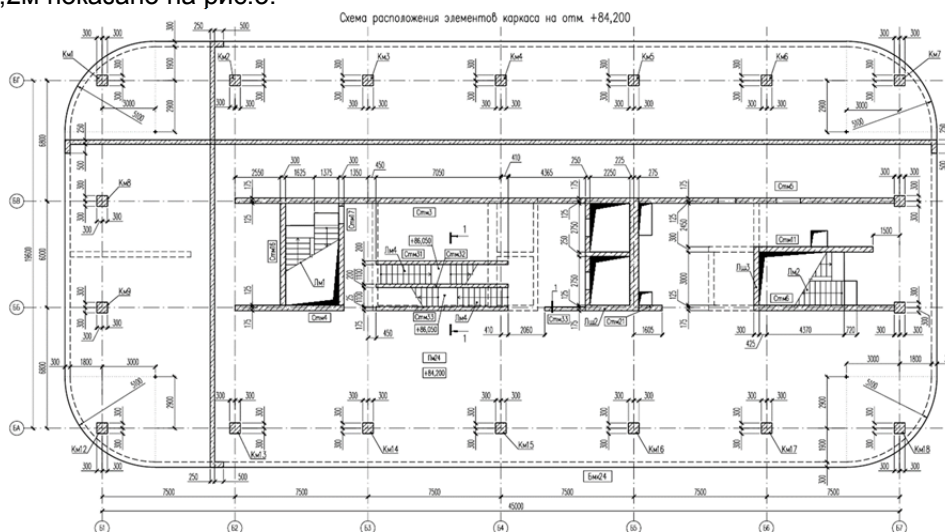


Рисунок 3. Схема расположения конструкций на отметке +84,200

Для изучения влияния дефектов на показания датчиков системы мониторинга использовалось ситуационное компьютерное моделирование здания.

Датчики ускорения на компьютерной модели «устанавливались» на отметке +84,200 в осях Б2-Б6, БВ, всего 5 датчиков.

Для простоты рассмотрим три типа повреждений конструкции: снижение рабочего сечения несущей колонны до 60%, уменьшение прочности бетона в одной из колонн и снижение жесткости узла сопряжения колонны с перекрытием вплоть до образования шарнира. Методика испытания состоит в обработке выходной информации с целью выделить путем моделирования из матрицы 5x5 по данным 5-и акселерометров, установленных на верхнем этаже здания, где горизонтальные отклонения и ускорения элементов максимальны с целью выделить значимую информацию об одном из трех указанных критических повреждений конструкции. Рассмотрим вначале, как отображается повреждение в колонне Б1-БА в данных датчиков, установленных равномерно на верхнем этаже. На рис.4а путем ситуационного моделирования показано изменение 1-го собственного значения фрактала в матрице 5x5, содержащей значения сигналов ускорений на верхнем этаже, при перемещении фрактала. Для получения динамического отклика компьютерной модели, она виртуально нагружалась динамической нагрузкой, имитирующей воздействие порыва ветра в направлении фасада здания в течение 0,385 сек. Расчет отклика СМ производился Методом Конечных Элементов (МКЭ) с помощью программы Autodesk Robot Structural Analysis. В качестве параметров отклика конструкции фиксировались ускорения элементов здания, в местах расположения датчиков (25 этаж). Частота дискретизации выбрана 100 герц, продолжительность исследования - 10 секунд. Значения собственных чисел фракталов в бездефектном участке (рис.4а) практически совпадают, поэтому разность этих значений (красная кривая) близка к нулю. При появлении дефектного участка картина существенно меняется; рис. 4б, на котором показано изменение разности первых собственных чисел фракталов. При появлении повреждения (дефекта) разности собственных значений начинают заметно осциллировать. Еще в большей степени это характерно для функции изменения значения 1-го собственного вектора фракталов, которые показаны на рис.4в, а разность изменений 1-го значения вектора – на рис. 4г. Возникновение таких изменений в матрице может легко читаться как возникновение дефекта данного типа. На рисунках 4–9 приведены зависимости значений первых собственных чисел и первых значений собственных векторов фрактала от времени колебаний (номера фрактала) для угловой и серединной колонн.

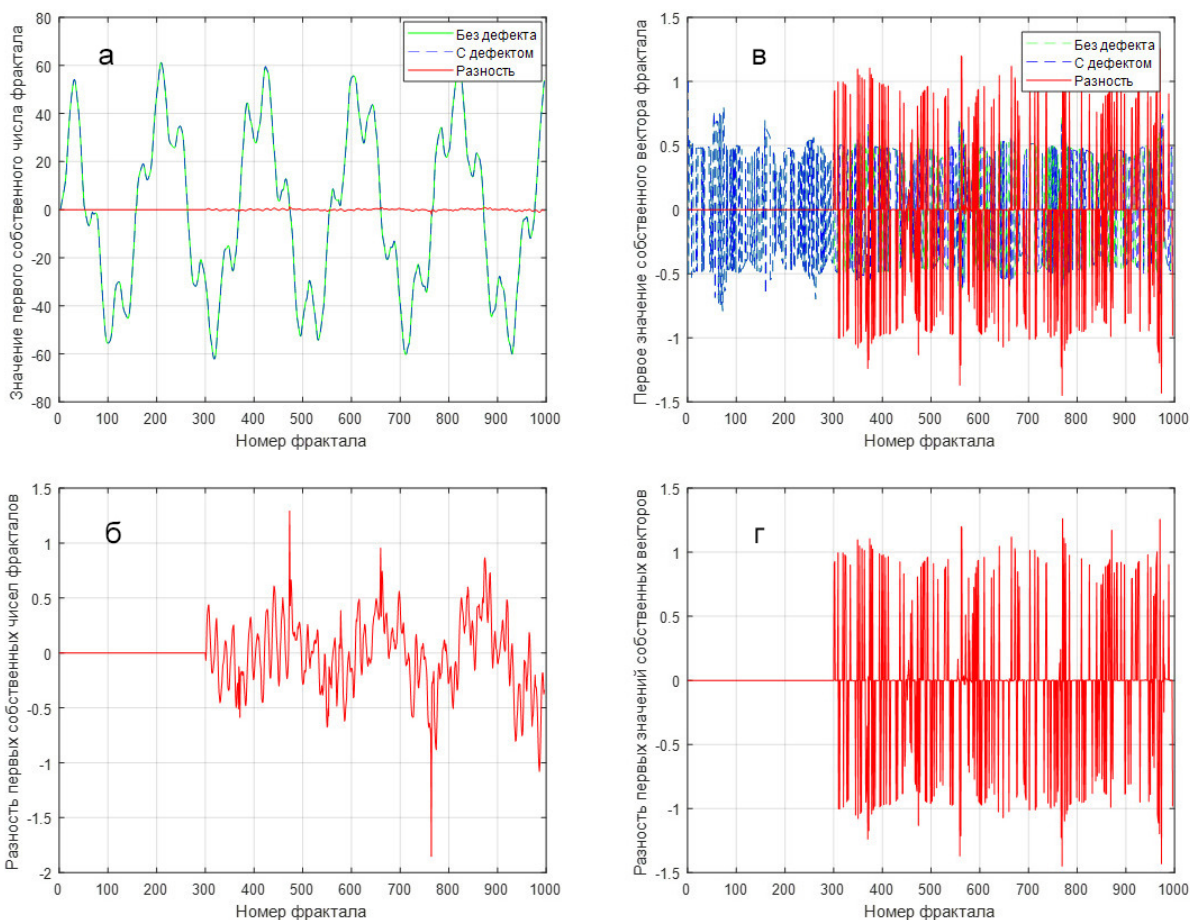


Рисунок 4. Зависимость значений первых собственных чисел и первых значений собственных векторов фрактала от времени колебаний (номера фрактала) для колонны Б1-БА первого этажа с уменьшенной на 2/3 площади сечения

Аналогичная ситуация возникает при появлении повреждения в колонне Б1-БА первого этажа с уменьшением класса бетона до С18/22,5 при исходном С30/37 (рисунок 5). Последовательность графиков на рис. 5 и последующих соответствует последовательности графиков на рис. 4. На рис. 6 показаны аналогичные изменения собственных чисел и собственных векторов фракталов при появлении в колонне Б1-БА первого этажа вместо жесткого сочленения ее с перекрытием шарнира в верхней части колонны. Как видно, все три рассматриваемые типа дефектов вызывают значимые изменения разности первых собственных значений и первых значений собственных векторов матрицы, что позволяет однозначно идентифицировать наличие одного из дефектов этих типов.

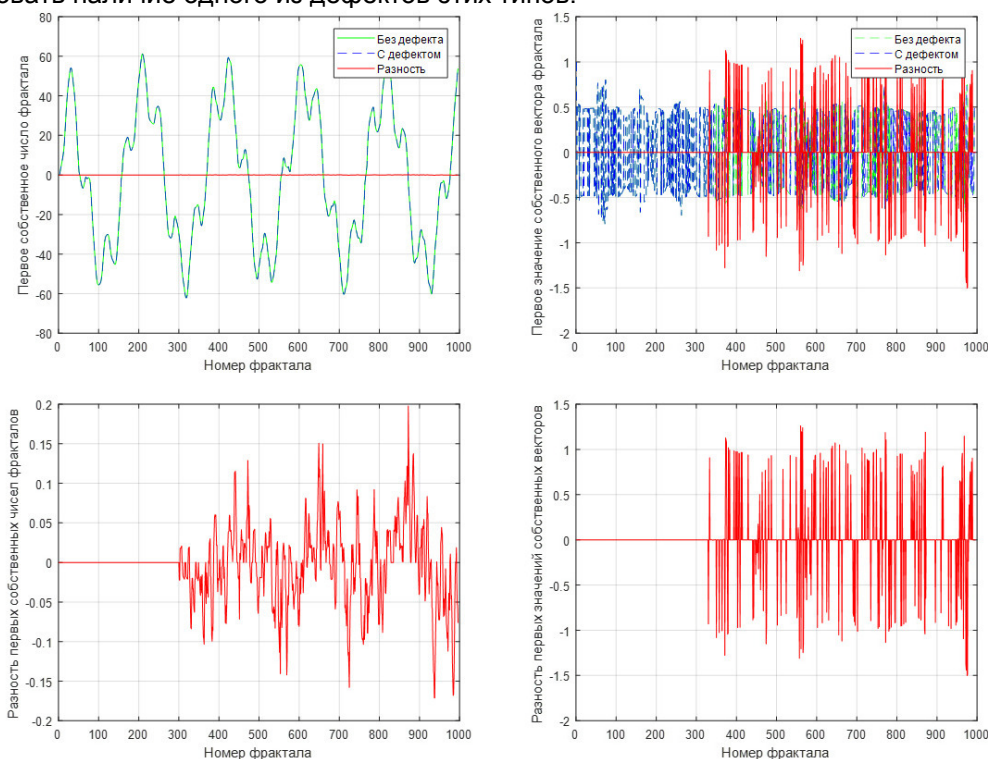


Рисунок 5. Зависимость значений первых собственных чисел и первых значений собственных векторов фрактала от времени колебаний (номера фрактала) для колонны Б1-БА первого этажа с уменьшенным до С18/22,5 классом бетона при исходном С30/37

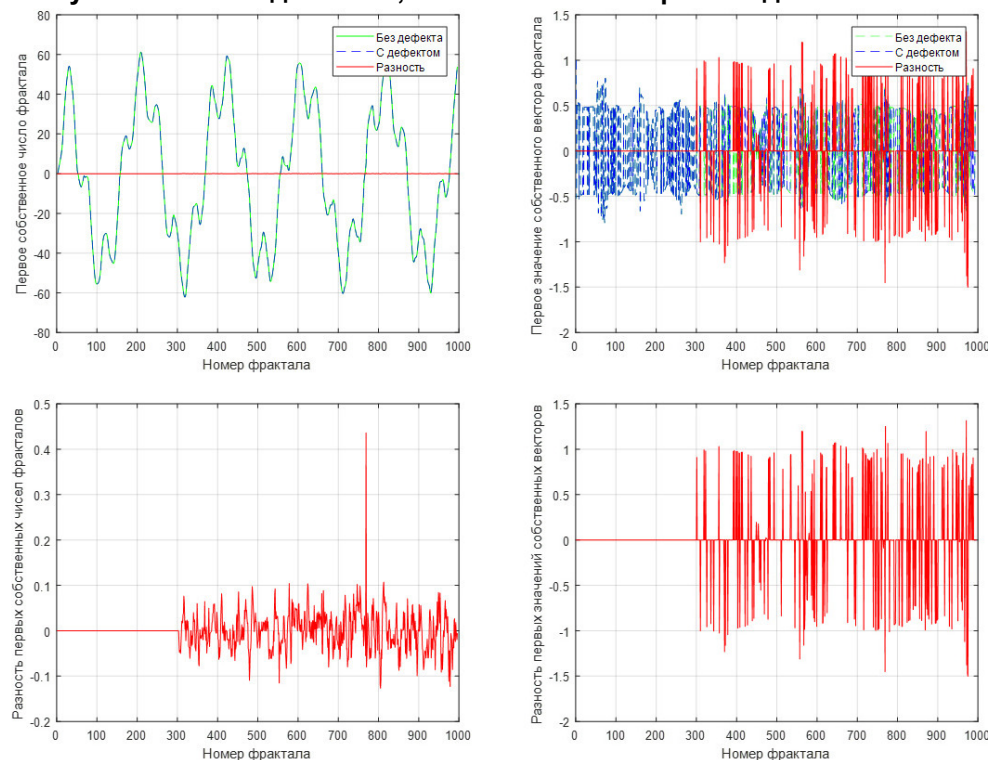


Рисунок 6. Зависимость значений первых собственных чисел и первых значений собственных векторов фрактала от времени колебаний (номера фрактала) для колонны Б1-БА первого этажа с шарниром в верхней части колонны

Появление такого типа дефектов или повреждений в колоннах, более близких к центру сопровождается еще более значимыми изменениями собственных значений чисел и векторов. Это видно из рисунков 7, 8 и 9.

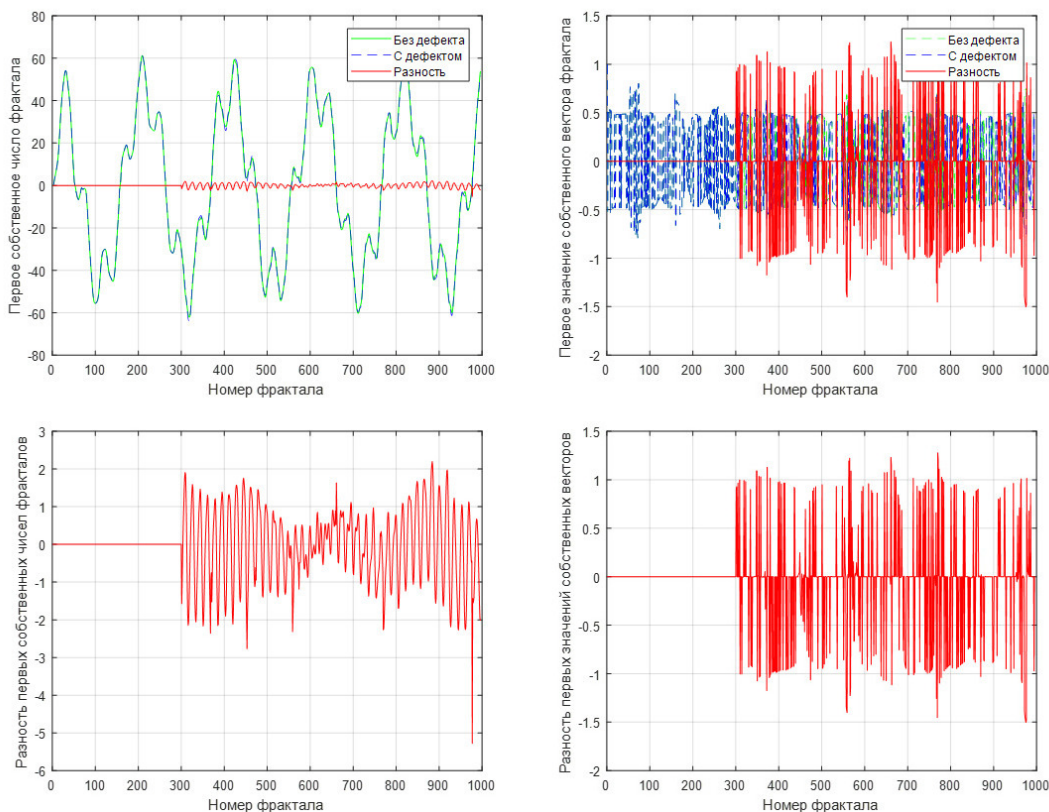


Рисунок 7. Зависимость значений первых собственных чисел и первых значений собственных векторов фрактала от времени колебаний (номера фрактала) для колонны Б4-Б1 первого этажа с уменьшенной на 2/3 площадью сечения

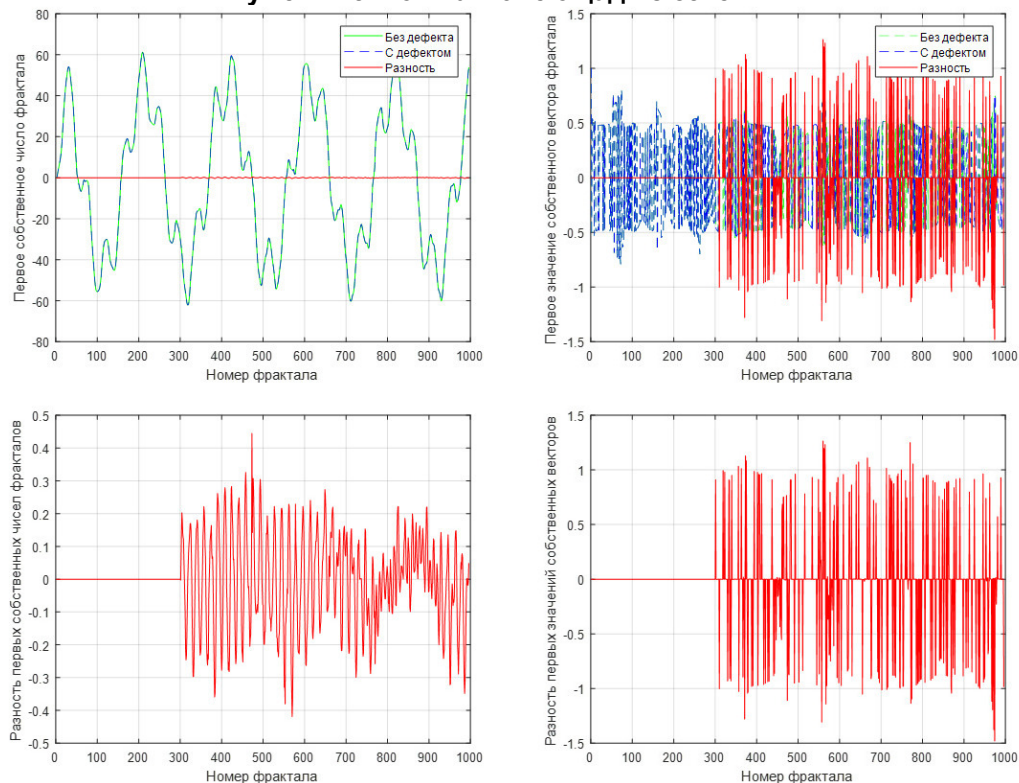


Рисунок 8. Зависимость значений первых собственных чисел и первых значений собственных векторов фрактала от времени колебаний (номера фрактала) для колонны Б4-Б1 первого этажа с уменьшенным до C18/22,5 классом бетона при исходном C30/37

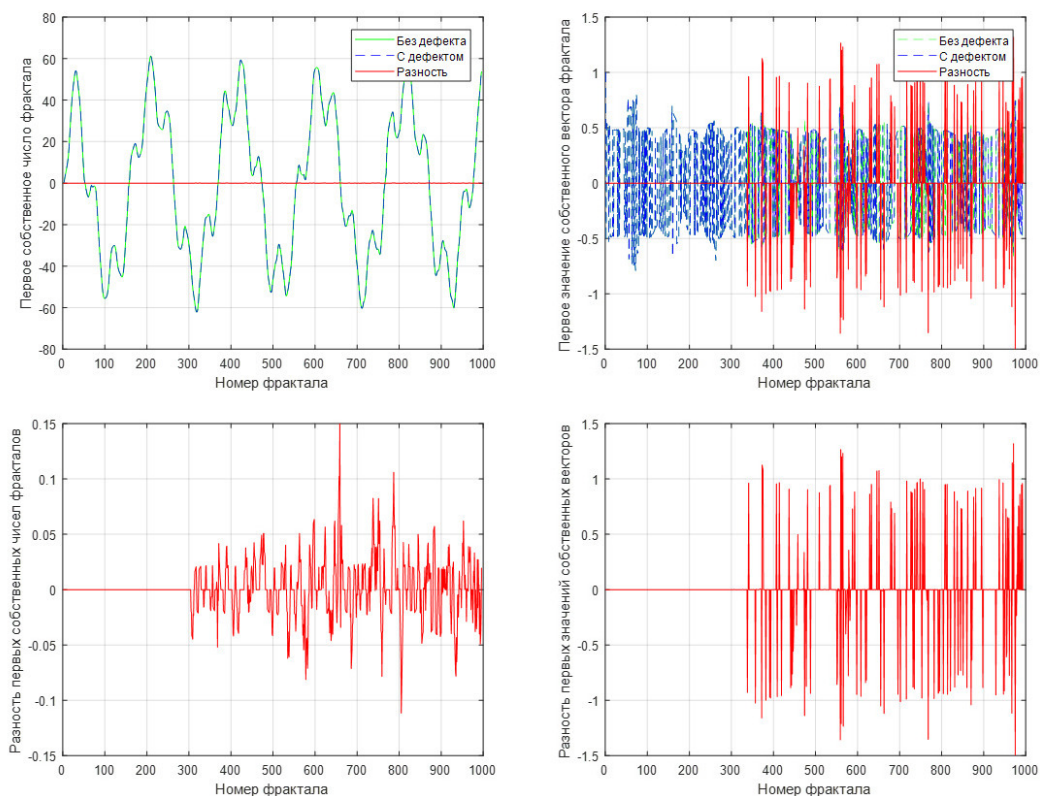


Рисунок 9. Зависимость значений первых собственных чисел и первых значений собственных векторов фрактала от времени колебаний (номера фрактала) для колонны Б4-БА первого этажа с шарниром в верхней части колонны

Анализ приведенной на графиках информации позволяет сделать вывод о высокой эффективности предлагаемого метода выявления дефектов.

В целях оценки чувствительности метода выполнены расчёты коэффициентов корреляции массивов первых значений собственных векторов фрактала для сооружения при наличии шарниров различной жёсткости в угловой колонне первого этажа в осях Б1-БА, и без шарнира. Коэффициент жёсткости шарнира, равный нулю – соответствует отсутствию жёсткости в шарнире, равный единице – отсутствию шарнира. Зависимость коэффициента корреляции от жёсткости шарнира для упомянутого выше случая приведена на рисунке 10.

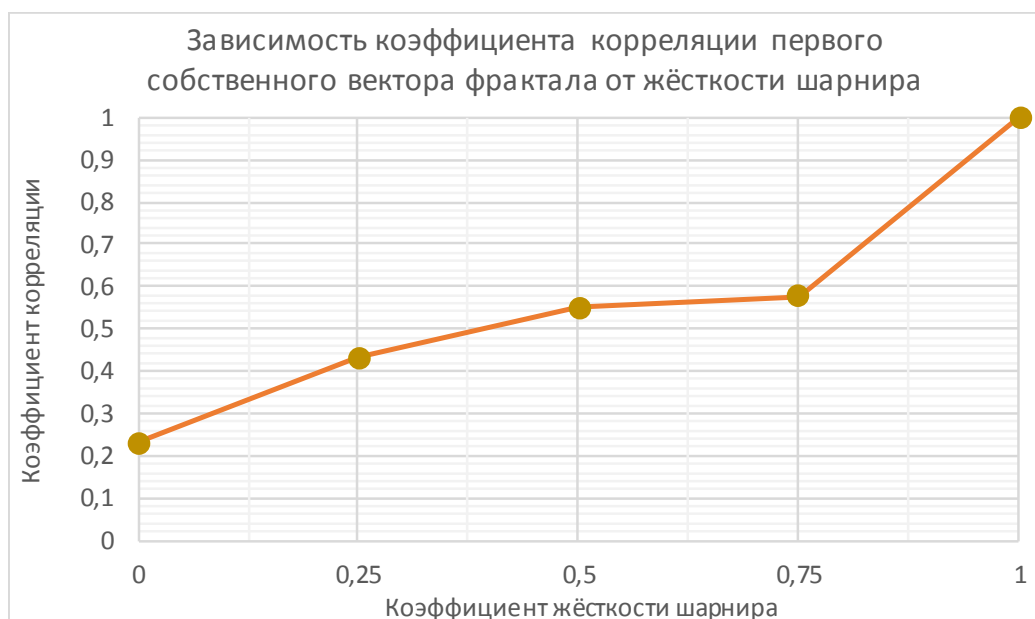


Рисунок 10. Зависимость корреляции массивов первых значений собственных векторов фрактала для сооружения при наличии шарниров различной жёсткости в угловой колонне первого этажа в осях Б1-БА, и без шарнира.

Предлагаемый авторами метод или его аналоги не описаны в исследованных научно-технических источниках. Аналитический программный модуль, построенный на основе предлагаемого метода, не сложен в реализации, и может быть легко встроен в уже действующую систему приборного мониторинга технического состояния несущих конструкций. Учитывая простоту и эффективность использования, его применение для анализа больших данных системы мониторинга может быть весьма перспективным.

4. Заключение

1. Предложен новый фрактальный метод быстрой идентификации повреждений по текущим данным системы приборного мониторинга высотных зданий. В отличие от методов PCA и ICA предлагаемый метод позволяет в реальном времени оценивать некоторые дефекты конструкции, по данным мониторинга. В методе имеются потенциальные возможности, позволяющие применить его для диагностики и прогнозирования поведения других ответственных конструкций.
2. Фрактальный метод оценки рассмотренных повреждений по сигналам акселерометров, установленных на верхнем этаже высотного здания, показал высокую чувствительность к повреждениям несущих колонн и нарушению жесткости стыка колонны с перекрытием практически на любом этаже.
3. Разность первых собственных значений собственных векторов фракталов для конструкции без дефекта и с дефектом оказывается большей, чем сами первые значения примерно в полтора раза для всех рассматриваемых видов дефектов и мест их расположения. Это позволяет использовать этот показатель как надёжный признак появления дефекта в конструкции.
4. Разность первых собственных значений фракталов индивидуальна для каждого типа дефекта и каждой его дислокации. Это позволит в будущем использовать эту разность для однозначной идентификации дефекта после проведения соответствующего ситуационного моделирования.
5. Дальнейшее развитие метода предполагает изучение возможности его применения для выявления других типов дефектов в конструкциях других типов. Необходимо сосредоточить усилия на моделировании и возможности количественного разделения дефектов по количественным характеристикам их фракталов.

Литература

- [1]. Worden, Keith; Farrar, Charles R.; Manson, Graeme; Park, Gyuhae. The fundamental axioms of structural health monitoring // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, vol. 463, issue 2082, pp. 1639-1664
- [2]. S. Thöns. On the Value of Monitoring Information for the Structural Integrity and Risk Management // Computer Aided Civil and Infrastructural Engineering. 2018, vol.33, pp. 79-94.
- [3]. Mohamed Abdel-Basset Abdo. Structural Health Monitoring: History, Applications and Future. A Review Book. Open Science Publishers, 2014, New York, pp. 1-115.
- [4]. Jiaqi Xu, Billie F. Spencer Jr., Xilin Lu, Xinzhong Chen and Lei Lu. Optimization of Structures Subject to Stochastic Dynamic Loading // Computer Aided Civil and Infrastructural Engineering. - 2017, vol.32, issue 6, pp. 657–673.
- [5]. Новожилов Г.В., Неймарк М., Цесарский Л.Г. Безопасность полета самолета. Москва.: Машиностроение, 2003. 144 с.
- [6]. Kollgaard J.R., LaRiviere S.G. NDE Challenges with Future Commercial Aircraft-A Boeing. Review of Progress in QNDE, ed. by D.O. Tompson and D.E. Chimenti // v. 27B, American Institute of Physics, Melville-N.Y., 2008, pp.23.
- [7]. Ugalde U., Anduaga J., Martínez F., Iturrospe A. A SHM method for detecting damage with incomplete observations based on VARX modelling and Granger causality. [Электронный ресурс]. Систем. требования: AdobeAcrobatReader. The Computing Research Repository (CoRR). eprint arXiv:1501.01905, 2015. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1501/1501.01905.pdf>
- [8]. Andrés D. González, Airlie Chapman, Leonardo Dueñas-Osorio, Mehran Mesbahi and Raissa M. D'Souza. Efficient Infrastructure Restoration Strategies Using the Recovery Operator // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, vol. 32, issue 8, pp. 991-1006.

References

- [1]. Worden, Keith; Farrar, Charles R.; Manson, Graeme; Park, Gyuhae. The fundamental axioms of structural health monitoring. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, vol. 463, issue 2082, pp. 1639-1664
- [2]. S. Thöns. On the Value of Monitoring Information for the Structural Integrity and Risk Management. Computer Aided Civil and Infrastructural Engineering. - 2018, vol.33, pp. 79–94.
- [3]. Mohamed Abdel-Basset Abdo. Structural Health Monitoring: History, Applications and Future. A Review Book. Open Science Publishers, 2014, New York, pp. 1-115.
- [4]. Jiaqi Xu, Billie F. Spencer Jr., Xilin Lu, Xinzhong Chen and Lei Lu. Optimization of Structures Subject to Stochastic Dynamic Loading. Computer Aided Civil and Infrastructural Engineering. 2017, vol.32, issue 6, pp. 657–673.
- [5]. Novozhilov G.V., Neymark M., Tsesarskiy L.G. Bezopasnost poleta samoleta [Flight safety]. Moscow. : Mashinostroyeniye, 2003. 144 p. (rus)
- [6]. Kollgaard J.R., LaRiviere S.G. NDE Challenges with Future Commercial Aircraft-A Boeing. Review of Progress in QNDE, ed. by D.O. Tompson and D.E. Chimenti. v. 27B, American Institute of Physics, Melville-N.Y., 2008, pp.23.
- [7]. Ugalde U., Anduaga J., Martínez F., Iturrospe A. A SHM method for detecting damage with incomplete observations based on VARX modelling and Granger causality. [Online]. System requirement: AdobeAcrobatReader. The Computing Research Repository (CoRR). eprint arXiv:1501.01905, 2015. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1501/1501.01905.pdf>
- [8]. Andrés D. González, Airlie Chapman, Leonardo Dueñas-Osorio, Mehran Mesbahi and Raissa M. D'Souza. Efficient Infrastructure Restoration Strategies Using the Recovery Operator. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, vol. 32, issue 8, pp. 991-1006.
- [9]. Metodika rascheta zhiznennogo tsikla zdaniya s uchetom stoimosti sovokupnykh zatrat [Method for calculating the life cycle

- [9]. Методика расчета жизненного цикла здания с учётом стоимости совокупных затрат: Москва, 2014, 72 с.
- [10]. Webb G. T., Vardanega P. J., Middleton C. R. Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities // Journal of Bridge Engineering. Volume 20 Issue 11, November 2015.
- [11]. Lunhai Zhi, Li Q.S., Mingxin Fang. Identification of Wind Loads and Estimation of Structural Responses of Super-Tall Buildings by an Inverse Method // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2016. vol. 31, issue 12, pp. 966-982.
- [12]. Yi-zhou Lin, Zhen-hua Nie, Hong-wei Ma. Structural Damage Detection with Automatic Feature-Extraction through Deep Learning // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2017. vol.32, issue12, pp. 102-1046.
- [13]. Vengrinovich V., Lykov V.. Big data Fractal Analysis for Structural Health Monitoring // Journal of Non-Destructive Testing and Diagnostics. No 2, 2015. pp.5-16 (in russian).
- [14]. Donoho D. L., Johnstone I. M., Hoch J. C., and Stern A. S. Maximum Entropy and the Near Black Object // J. Roy. Stat. Soc. 1992, B 54, (1), pp. 41-81.
- [15]. Tikhonov A.N. On stability of inverse problems. // Dokl. Akad. Nauk SSSR 39, 195-198, 1943, v.39, 195-198 (in Russ.), 1943.
- [16]. Vengrinovich V., Klimenko S., Klimenko A., Rotkov S.. Bionics for safety: approach of animate beings applied to the safety of engineering systems (Inv. lect.) // Proc. International Conf. CPT_2013, Larnaka, Cyprus, May 13-19, 2013, pp.i-ix.
- [17]. Skilling J. Probabilistic data analysis: an introductory guide // Journal of Microscopy. Vol.190, Pts.1/2 pp.28–36, 1998.
- [18]. Zellner A. Optimal information processing and Bayes theorem. American Statistician.: 1998, v.42, N4, pp.278-284.
- [19]. Vengrinovich V.L. Bayesian Image and Pattern Reconstruction from Incomplete and Noisy Data. Tutorial. Int.J., "Pattern Recognition and Image Analysis", Vol. 22, No. 1, 2012, pp.99-108.
- [20]. Vengrinovich V.L., Denkevich Y.B., Tillack G.-R. Reconstruction of Three_Dimensional Binary Structures from an Extremely Limited Number of Cone_Beam X-ray Projections. Choice of Prior // Journal of Physics. D:Appl. Phys. 1999, Vol. 32, P. 2505–2514.
- [21]. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга (с Изменением N 1, с Поправкой). Москва: Стандартинформ, 2012.
- [22]. Hoon Sohn, Farar C., Froncois M. Hemez et.al. A Review of Structural Health Monitoring Literature. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2004. pp. 1-311.
- [23]. Jianqing Fan and Jinchi Lv. A selective overview of variable selection in high dimensional feature space. Invited review article. Princeton University and University of Southern California. Statistica Sinica 20 (2010), Pp. 101-148
- of a building with the total costs]. : Moscow, 2014, 72 p.
- [10]. Webb G. T., Vardanega P. J., Middleton C. R. Categories of SHM Deployments: Technologies and Capabilities. Journal of Bridge Engineering. Volume 20 Issue 11, November 2015
- [11]. Lunhai Zhi, Li Q.S., Mingxin Fang. Identification of Wind Loads and Estimation of Structural Responses of Super-Tall Buildings by an Inverse Method. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2016. vol. 31, issue 12, pp. 966–982.
- [12]. Yi-zhou Lin, Zhen-hua Nie, Hong-wei Ma. Structural Damage Detection with Automatic Feature-Extraction through Deep Learning. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2017. vol.32, issue12, pp. 1025–1046.
- [13]. Vengrinovich V., Lykov V.. Big data Fractal Analysis for Structural Health Monitoring. Journal of Non-Destructive Testing and Diagnostics. No 2, 2015. pp. 5-16 (rus).
- [14]. Donoho D. L., Johnstone I. M., Hoch J. C., and Stern A. S. Maximum Entropy and the Near Black Object. J. Roy. Stat. Soc. 1992, B 54, (1), pp. 41-81.
- [15]. Tikhonov A.N. On stability of inverse problems. Dokl. Akad. Nauk SSSR 39, 195-198, 1943, v.39, 195-198, 1943. (rus)
- [16]. Vengrinovich V., Klimenko S., Klimenko A., Rotkov S.. Bionics for safety: approach of animate beings applied to the safety of engineering systems (Inv. lect.). Proc. International Conf. CPT_2013, Larnaka, Cyprus, May 13-19, 2013, pp.i-ix.
- [17]. Skilling J. Probabilistic data analysis: an introductory guide. Journal of Microscopy. Vol.190, Pts.1/2 pp.28–36, 1998.
- [18]. Zellner A. Optimal information processing and Bayes theorem. American Statistician.: 1998, v.42, No. 4, pp.278-284.
- [19]. Vengrinovich V.L. Bayesian Image and Pattern Reconstruction from Incomplete and Noisy Data. Tutorial. Int.J., "Pattern Recognition and Image Analysis", Vol. 22, No. 1, 2012, pp.99-108.
- [20]. Vengrinovich V.L., Denkevich Y.B., Tillack G.-R. Reconstruction of Three_Dimensional Binary Structures from an Extremely Limited Number of Cone_Beam X-ray Projections. Choice of Prior. Journal of Physics. D:Appl. Phys. 1999, Vol. 32, P. 2505–2514.
- [21]. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга (с Изменением N 1, с Поправкой) [Monitoring the technical condition of unique buildings and structures. Rules for the design and installation of stationary monitoring systems (stations) (with Amendment No. 1)]. Moscow: Standartinform, 2012
- [22]. Hoon Sohn, Farar C., Froncois M. Hemez et.al. A Review of Structural Health Monitoring Literature. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2004. pp. 1-311.
- [23]. Jianqing Fan and Jinchi Lv. A selective overview of variable selection in high dimensional feature space. Invited Review Article. Princeton University and University of Southern California. Statistica Sinica 20 (2010), Pp. 101-148

Контактная информация

- +375(17)2842344, veng@iaph.bas-net.by (Венгринович Валерий Львович, д.т.н., профессор, заведующий лабораторией)
- * +375(17)2813577, grieves@yandex.ru (Рябцев Владимир Николаевич, аспирант)

Contact information

- +375(17)2842344, veng@iaph.bas-net.by (Valery Vengrinovich, Ph.D., Professor, Head of Laboratory)
- * +375(17)2813577, grieves@yandex.ru (Vladimir Ryabtsev, Postgraduate)