

Управление параметрами расчетной модели пространственной конструкции по результатам натурных испытаний

Олег Александрович Иванов, Владимир Николаевич Сидоров,
Павел Игоревич Новиков

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. При численном моделировании механических систем близость расчетной модели к поведению объекта в значительной степени определяется адекватностью задаваемых граничных условий. На практике условия закрепления элементов конструкций нередко отличаются от идеализированных предположений, принимаемых в расчетных моделях, что приводит к расхождению расчетных и экспериментальных данных.

Материалы и методы. Рассматривается подход к оптимизации граничных условий конечно-элементной модели на основе эволюционного алгоритма CMA-ES. Объектом исследования стала пространственная рамная конструкция, над которой проведены инструментальные исследования динамических характеристик — собственных частот и свободных колебаний. Сравнение расчетных и экспериментальных частот и форм свободных колебаний осуществлялось с использованием получаемого значения коэффициента согласования форм свободных колебаний и относительной ошибки между значениями вычисляемых собственных частот расчетной модели и их величинами, устанавливаемыми экспериментально. На основе этих метрик формировалась целевая функция задачи оптимизации.

Результаты. Определялись оптимальные значения коэффициентов жесткости опорных связей в нижнем поясе конструкции в направлениях шести степеней свободы. Полученные результаты показали, что применение эволюционного подхода позволяет существенно снизить расхождения между модельными и натурными данными и тем самым повысить точность расчетной модели.

Выводы. Точность конечно-элементного моделирования конструкций можно увеличить за счет согласования модельных и экспериментальных динамических характеристик, используя эволюционные алгоритмы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: расчетная модель, конечно-элементное моделирование, граничные условия, оптимизация, формы собственных колебаний, собственные частоты, динамические характеристики, эволюционный алгоритм, OpenSeesPy, CMA-ES

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иванов О.А., Сидоров В.Н., Новиков П.И. Управление параметрами расчетной модели пространственной конструкции по результатам натурных испытаний // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1534–1541. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1534-1541

Автор, ответственный за переписку: Олег Александрович Иванов, olivanovpoch@yandex.ru.

Control of parameters of the calculation model of a spatial structure based on the results of full-scale tests

Oleg A. Ivanov, Vladimir N. Sidorov, Pavel I. Novikov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In numerical modelling of mechanical systems, the proximity of the computational model to the actual behaviour of the object is largely determined by the adequacy of the specified boundary conditions. In practice, the support conditions of structural elements often differ from the idealized assumptions adopted in computational models, which leads to discrepancies between calculated and experimental data.

Materials and methods. This study considers an approach to optimizing the boundary conditions of a finite element model using the evolutionary algorithm CMA-ES [1]. The object of investigation was a spatial frame structure, for which experimental studies of dynamic characteristics — natural frequencies and free vibrations — were conducted. The comparison of calculated and experimental frequencies and vibration modes was performed using the modal assurance criterion (MAC) and the relative error between the calculated eigenfrequencies of the model and their experimentally determined values. Based on these metrics, the objective function of the optimization problem was formulated.

Results. The optimization made it possible to determine the stiffness coefficients of the support connections in the lower chord of the structure in six degrees of freedom. The results showed that the application of the evolutionary approach signifi-

cantly reduced discrepancies between model and experimental data, thereby improving the accuracy of the computational model.

Conclusions. The accuracy of finite element modelling of structures can be improved by aligning the model and experimental dynamic characteristics through the use of evolutionary algorithms.

KEYWORDS: computational model, finite element modelling, boundary conditions, optimization, mode shapes, natural frequencies, dynamic characteristics, evolutionary algorithm, OpenSeesPy, CMA-ES

FOR CITATION: Ivanov O.A., Sidorov V.N., Novikov P.I. Control of parameters of the calculation model of a spatial structure based on the results of full-scale tests. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1534-1541. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1534-1541 (rus.).

Corresponding author: Oleg A. Ivanov, olivanovpoch@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Ошибочное задание типов кинематических граничных условий в расчетных моделях является одной из ключевых причин расхождений между расчетными и натурными динамическими характеристиками конструкций. Базовые идеализированные типы назначаемых связей (жесткая заделка, скользящая заделка, неподатливое шарнирное опирание (элементарная связь)) нередко не отражают реального поведения опорных узлов, узловых соединений, взаимодействия с грунтовым основанием, что приводит к существенным расхождениям в проявлениях реальных механических систем и результатов их расчетного анализа [1, 2].

Актуальность задачи корректировки (калибровки) конечно-элементных моделей (КЭ-моделей), по экспериментальным сведениям, возрастает с совершенствованием систем мониторинга и необходимостью повышения достоверности расчетов при обосновании проектных решений, оценке прочности и диагностике повреждений [3]. Современные подходы в моделировании опорных связей (пружины, так называемые zero-length/bushing-элементы¹) позволяют ввести параметры жесткости опор в качестве управляемых величин, однако проблема оптимального выбора этих параметров в своем общем виде остается нерешенной [4].

В научной и инженерной практике для калибровки моделей применяют модальные метрики (собственные частоты, формы свободных колебаний) и критерии их согласования (например, Modal Assurance Criterion — MAC) в составе численного решения задач оптимизации. При этом MAC остается одной из стандартных мер корреляции форм свободных колебаний и широко используется при сопоставлении экспериментальных данных и результатов расчетов [5].

Эволюционные стратегии, в частности CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy), зарекомендовали себя как надежный инструмент в задачах оптимизации с большим числом управляемых параметров и сильной корреляцией между ними; их преимущества — адаптивный выбор ковариации и устойчивость к локальным минимумам — служат

основанием выбора этого алгоритма для подбора граничных условий КЭ-модели [6].

Цель настоящего исследования — разработать и продемонстрировать метод адаптации граничных условий КЭ-модели пространственной рамной конструкции на основе стратегий CMA-ES при решении задачи оптимизации с целевой функцией, объединяющей относительную ошибку в расхождении собственных частот и среднеквадратичную ошибку в сопоставлении форм свободных колебаний. Таким образом, метод ориентирован на уменьшение расхождений между результатами расчетов и натурными динамическими измерениями и на повышение интерпретируемости получаемых поправок к моделируемым условиям опирания. Используемый подход разработан с учетом ряда работ по направленному управлению параметрами КЭ-моделей и оценке применимости эволюционных алгоритмов в задачах структурной идентификации [7–13].

Практическое значение работы заключается в вероятности получить скорректированную расчетную модель, адекватно описывающую особенности реальных опорных связей (включая болтовые и сварные узловые соединения), что повышает точность прогноза динамического поведения конструкций, открывает новые возможности последующей диагностики появляющихся дефектов и снижает риск неверных инженерных решений при проектировании и экспертизе конструкций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — многоярусная пространственная каркасная конструкция, собранная по регулярной ортогональной сетке с шагом 0,4 м. Основной несущий каркас изготовлен из стальных тонкостенных трубчатых профилей квадратного сечения $20 \times 20 \times 1,2$ мм со сварными узловыми соединениями; поэтажные перекрытия выполнены из стальных листов $400 \times 800 \times 2$ мм, которые крепятся к каркасу болтами и накладными пластинами. Общий вид конструкции показан на рис. 1. Каркас опирается на развитые по высоте стальные опорные стойки, жестко закрепленные в сложной по форме опорной балочной системе (рис. 2).

Определение динамических характеристик стеновой конструкции проводилось в 2012 г. в Научно-исследовательской лаборатории инженер-

¹ *Minjie Zhu*. Библиотека OpenSees на Python — документация API // Oregon State University. 2025.



Рис. 1. Общий вид конструкции
Fig. 1. General view of the structure

ных исследований и мониторинга строительных конструкций зданий и сооружений НИУ МГСУ методом стоячих волн [14–17]. Важная особенность физического стенда заключается в том, что при лабораторных измерениях расположение измерительного оборудования (акустические/сейсмические приемники и регистраторы) изменялось между сеансами — это вносило дополнительную изменчивость в инерционные характеристики перекрытий (масса приборов составляет заметную долю от общей массы стенда). Для выявления динамических характеристик использовался метод стоячих волн с применением автономных сейсмоприемников и регистраторов. Набор измерительных каналов включал несколько датчиков, перемещавшихся



Рис. 2. Опираание конструкции на балочную систему
Fig. 2. Support of the structure on the beam system

по уровням, и одну фиксированную опорную пару вблизи центра верхнего яруса, выбранную в качестве опорной точки. Датчики устанавливали на центральной продольной оси каждого уровня; для улучшения контакта с листами применялись магнитные основания (крепление болтами не использовалось). Собранные спектры амплитуд и фаз ускорений в точках измерений использовались для построения экспериментально полученных частот и форм свободных колебаний исследуемой конструкции.

Численное представление стенда выполнено в программной среде OpenSeesPy. OpenSeesPy представляет собой интерфейс к широко применяемой платформе Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), ориентированной на моделирование и анализ конструкций при сейсмических и динамических воздействиях. Среда предоставляет средства для построения конечно-элементных моделей, задания материалов и граничных условий, а также проведения статических и динамических расчетов. Использование Python-оболочки значительно упрощает процесс моделирования, позволяя автоматизировать вычислительные процедуры, использовать развитую структуру Python для обработки результатов и интегрировать расчетную модель в более сложные исследовательские сценарии.

Геометрические параметры (в том числе сечение труб, толщины листов) и физико-механические свойства материала конструктивных элементов были заданы в соответствии с описанием характеристик, приведенным в публикации [17]. Узлы КЭ-модели соотнесены с точками установки приборов, чтобы обеспечить прямую сопоставимость экспериментальных и расчетных модальных данных. Для моделирования реальной податливости опирания модели использовалась следующая схема: в каждом опорном узле нижнего пояса создавался дополнительный «фундаментный» узел, жестко фиксируемый по всем шести степеням свободы. Затем между «рабочим» узлом каркаса и «фундаментным» узлом «вставлялся» конечный элемент типа zeroLength с набором одноосных упругих связей с задаваемыми жесткостями $K_x, K_y, K_z, K_{rx}, K_{ry}, K_{rz}$. Такой прием позволяет непосредственно управлять жесткостями опорных связей расчетной модели в нужных степенях свободы DOF без изменения геометрических и физико-механических параметров КЭ в опорной зоне [18].

Из формируемых по результатам эксперимента таблиц со значениями амплитуд и фаз строились комплексные отклики в точках установки измерительных приборов для выделенных резонансных частот:

$$u_i = A_j e^{i\varphi_j},$$

где u_i — комплексный отклик в точке установки измерительного прибора j при выбранной резонансной частоте; A_j — амплитуда отклика в точке j , полученная из экспериментальных данных; φ_j — фаза

отклика в точке j , также взятая из экспериментальных данных; $e^{i\varphi_j}$ — комплексный множитель, представляющий фазовую часть в виде числа на комплексной плоскости (согласно формуле Эйлера: $e^{i\varphi_j} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi$).

Экспериментальная модальная форма для данной частоты формировалась как вектор комплексных компонент по узлам. Для сравнения с расчетной формой использовалась стандартная мера корреляции мод МАС, дающая значение в интервале от 0 до 1 (1 — полное совпадение) [7].

Параметризация коэффициентов жесткости zeroLength-связей велась по каждой из шести степеней свободы двенадцати опорных узлов расчетной модели. С целью уменьшения количества параметров и ускорения работы алгоритма было принято допущение, что коэффициенты жесткости во всех опорных узлах равны в разных направлениях, при этом узлы крепления нижних стержневых элементов к опорной балочной системе одинаковые. В качестве целевой функции применялось сочетание двух компонентов: относительной ошибки в значениях собственных частот (MAPE — mean absolute percentage error) и меры расхождения по формам свободных колебаний, взятой как RMSE (root mean square error) меры МАС, вычисляемой методом наименьших квадратов. Таким образом, целевая функция:

$$J = MAPE(f) + RMSE(1 - MAC),$$

где J — итоговая комбинированная метрика, которую минимизирует эволюционный алгоритм;

$$MAPE(f) = \frac{1}{N} \sum \frac{|f^{FE} - f^{EXP}|}{f^{EXP}}; \quad RMSE(1 - MAC) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (1 - MAC_{ii})^2};$$

f^{FE} — первые N собственных частот КЭ-модели; f^{EXP} — первые N собственных частот, полученных экспериментальным путем; MAC_{ii} — диагональные элементы МАС-матрицы.

Такой подход позволяет одновременно минимизировать расхождения в частотах и нарушение форм.

Для поиска оптимальных значений коэффициентов жесткости расчетной модели использовался эволюционный алгоритм СМА-ES. Эволюционные алгоритмы — стохастические методы оптимизации, вдохновленные механизмами естественного отбора; они работают с популяцией кандидатных решений, применяют операции мутации/рекомбинации и отбор по приспособленности, что делает их пригодными для негладких, многомодальных и дискретно-зависимых целевых функций [19]. СМА-ES — специализированная стратегия для непрерывных задач, где на каждой итерации кандидатные решения задачи оптимизации порождаются из многомерного нормального распределения; ключевая идея — адаптивное обновление ковариацион-

ной матрицы этого распределения, что дает возможность алгоритму «учиться» структурам корреляций между параметрами и эффективно направлять поиск в пространстве решений [6].

Преимущества примененного эволюционного алгоритма — автоматическая адаптация масштаба поиска и ковариации, хорошая устойчивость к шуму и локальным минимумам, способность работать без градиентов и с плотной корреляцией параметров, что важно при подборе множественных жесткостей. Недостатки — значительная вычислительная нагрузка при большом числе параметров из-за издержек на оценку популяции, требовательность к числу вызовов целевой функции и потенциальная необходимость ограничения размерности параметризации — группировка параметров по симметрии или типам [5, 6].

Алгоритм реализован на языке Python с использованием библиотеки `scipy`. Валидация полученных корректировок включала сравнение спектров частот, получаемых на диагонали матрицы МАС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построенная конечно-элементная модель пространственного каркаса показала удовлетворительное совпадение с натурными данными лишь при введении в расчет податливости опор. Жесткое закрепление нижних опорных узлов по всем направлениям приводило к систематическому завышению собственных частот и искажению форм колебаний, что подтверждает необходимость корректировки граничных условий. Значения частот при жестком закреплении по всем степеням свободы приведены в табл. 1, соответствующая матрица МАС показана на рис. 3. Элементы главной диагонали матрицы представляют собой коэффициенты корреляции между экспериментально полученными формами собственных колебаний и соответствующими формами, вычисленными в расчетной модели. Значение целевой функции при таком закреплении равно 8,436.

Для оптимизации параметров опорных связей использован алгоритм СМА-ES. В качестве целевой функции применялось комбинированное выражение, учитывающее относительное отклонение значений собственных частот, полученных в расчетах и экспериментально, MAPE и меру расхождения модальных форм RMSE на основе формирования и анализа матрицы МАС. Оптимизация проводилась в пространстве шести параметров жесткости в направлениях всех степеней свободы опорных узлов при размере популяции 12.

В результате 45 итераций (540 расчетов модели) удалось оптимизировать коэффициенты жесткости, при которых обеспечивалось значение целевой функции 0,508, что соответствует существенному снижению расхождения по сравнению с исходным вариантом. Собственные частоты и МАС-матрица форм обновленной модели отображены в табл. 2 и на рис. 4.

Табл. 1. Сравнение частот свободных колебаний КЭ-модели при жестком закреплении опорных стоек по всем направлениям и частот, измеренных в лабораторном эксперименте

Table 1. Comparison of natural frequencies of the finite element model with rigid fixation of support columns in all directions and frequencies measured in the laboratory experiment

FEM частота, Гц FEM frequency, Hz	Натурная частота, Гц Experimental frequency, Hz	Абсолютная относительная ошибка, % Absolute percentage error, %
6,431	4,639	38,6
6,845	5,188	31,9
9,096	6,897	31,9
20,072	15,625	28,5
20,204	17,273	17,0
21,320	20,142	5,9

Табл. 2. Сравнение частот свободных колебаний КЭ-модели после обновления жесткостных связей опорных стоек и частот, измеренных в лабораторном эксперименте

Table 2. Comparison of natural frequencies of the finite element model after updating the stiffness connections of the support columns and frequencies measured in the laboratory experiment

FEM частота, Гц FEM frequency, Hz	Натурная частота, Гц Experimental frequency, Hz	Абсолютная относительная ошибка, % Absolute percentage error, %
4,613	4,639	0,6
5,155	5,188	0,6
6,822	6,897	1,1
16,351	15,625	4,6
17,630	17,273	2,1
20,059	20,142	0,4

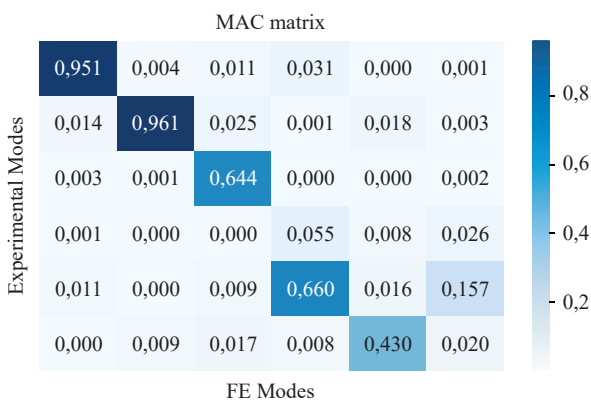


Рис. 3. MAC-матрица форм свободных колебаний при жестком закреплении по всем направлениям

Fig. 3. MAC matrix of mode shapes under rigid fixation in all directions

Относительная ошибка в значениях собственных частот снизилась с 5,9–38,6 % до 0,4–4,6 %. По MAC-матрице видно, что формы на 4-й и 5-й частотах, полученные в расчетной модели, стали лучше описывать свободные колебания реальной конструкции.

Полученные результаты подтверждают рабочую гипотезу о том, что адаптация граничных условий с использованием эволюционного алгоритма для рассматриваемой конструкции позволяет существенно повысить соответствие численных моделей динамики конструкций поведению их оригиналов. Особенно важно отметить, что учет податливости опорных узлов не только улучшает совпадение ча-

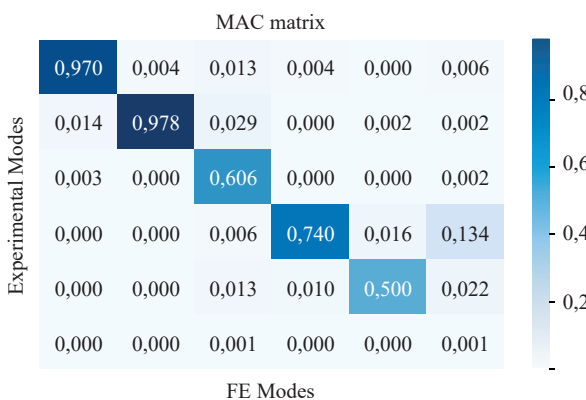


Рис. 4. MAC-матрица форм свободных колебаний обновленной модели

Fig. 4. MAC matrix of mode shapes of the updated model

стот, но и обеспечивает лучшее воспроизведение форм колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что точность конечно-элементного моделирования динамических характеристик конструкций зависит от корректности задания кинематических граничных условий в ее расчетной модели. Использование эволюционного алгоритма СМА-ES для оптимизации параметров податливости общих жесткостных характеристик опорных связей позволило существенно сократить ошибку в значениях собственных частот колебаний конструкции, полученных в расчетах по сравнению с результатами экспери-

мента, а также увеличить коэффициенты корреляции форм свободных колебаний. Предложенный подход продемонстрировал перспективность его применения

при калибровке КЭ-моделей, обеспечивая более точное согласование результатов расчетов и динамических характеристик, полученных экспериментально.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Nomura M., Shibata M.* Cmaes: A Simple yet Practical Python Library for CMA-ES // arXiv: 2402.01373. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2402.01373
2. *Park Y.S., Kim S., Kim N., Lee J.J.* Finite element model updating considering boundary conditions using neural networks // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 150. Pp. 511–519. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.032
3. *Сидоров В.Н.* Алгоритм корректировки вычислительной расчетной модели сооружения при его мониторинге // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013. Т. 9. № 2. С. 118–123. EDN RDQZGR.
4. *Zhou S., Song W.* Environmental-effects-embedded model updating method considering environmental impacts // *Structural Control and Health Monitoring*. 2017. Vol. 25. Issue 3. P. e2116. DOI: 10.1002/stc.2116
5. *Allemang R.* The Modal Assurance Criterion (MAC): Twenty Years of Use and Abuse // *Journal of Sound and Vibration*. 2003. Vol. 37. Issue 8.
6. *Hansen N.* The CMA Evolution Strategy : a Tutorial // arXiv:1604.00772. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1604.00772
7. *Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z.* Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms : a survey // *Neural Computing and Applications*. 2018. Vol. 30. Issue 2. Pp. 389–411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1
8. *Ghahremani B., Bitaraf M., Rahami H.* A fast-convergent approach for damage assessment using CMA-ES optimization algorithm and modal parameters // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2020. Vol. 10. Issue 3. Pp. 497–511. DOI: 10.1007/s13349-020-00397-1
9. *Chen B., Starman B., Halilović M., Berglund L.A., Coppieters S.* Finite Element Model Updating for Material Model Calibration : a Review and Guide to Practice // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024. Vol. 32. Issue 4. Pp. 2035–2112. 10.1007/s11831-024-10200-9
10. *Chen Q., Zhou S., Xiao Y., Chen L., Zhou Y., Zhang L.* Modal test and finite element updating of sprayer boom truss // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-024-73640-0
11. *Li D., Zhou J., He X.* A unified approach for time-domain and frequency-domain finite element model updating // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 227. P. 112361. DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.112361
12. *Chen X., Zhang D., Beer M., Aadil M.* Improved efficiency and accuracy in Bayesian structural model updating via DREAMCMAZS sampling and Kriging surrogates // *Structures*. 2025. Vol. 80. P. 109856. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109856
13. *Liu H., Qin L., Zhou Z.* Knowledge-Based Perturbation LaF-CMA-ES for Multimodal Optimization // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Issue 19. P. 9133. DOI: 10.3390/app14199133
14. *Коргин А.В., Ермаков В.А.* Автоматизированная актуализация МКЭ-модели сооружения в ходе мониторинга // *Механизация строительства*. 2011. № 7 (805). С. 16–17. EDN NXBFFR.
15. *Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Нагибович А.И., Петряшев Н.О., Петряшев С.О.* Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 2: Верификация методики на стендовых моделях // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2012. Т. 8. № 4. С. 28–42. EDN PZEXJN.
16. *Каличава Д.К.* Адаптивные динамические конечноэлементные модели в основе мониторинга несущих конструкций высотных зданий : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 149 с. EDN SUOQDX.
17. *Новиков П.И.* Численно-аналитическая методика идентификации параметров жесткости пространственных конструкций на основе минимизации различия расчетных (конечноэлементных) и натуральных динамических характеристик // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 3. С. 64–71. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-64-71. EDN LFCLNA.
18. *Friswell M.I., Mottershead J.E.* Finite Element Model Updating in Structural Dynamics // *Solid Mechanics and its Applications*. 1995. DOI: 10.1007/978-94-015-8508-8
19. *Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z.* Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms : a survey // *Neural Computing and Applications*. 2018. Vol. 30. Issue 2. Pp. 389–411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1

Поступила в редакцию 15 сентября 2025 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 9 октября 2025 г.

О Б А В Т О Р А Х: **Олег Александрович Иванов** — аспирант кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; olivanovpoch@yandex.ru;

Владимир Николаевич Сидоров — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и прикладной математики, академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kanz@mgsu.ru, sidorov.vladimir@gmail.com;

Павел Игоревич Новиков — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kanz@mgsu.ru, novikov.mgsu@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nomura M., Shibata M. Cmaes: A Simple yet Practical Python Library for CMA-ES. *ArXiv:2402.01373*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2402.01373
2. Park Y.S., Kim S., Kim N., Lee J.J. Finite element model updating considering boundary conditions using neural networks. *Engineering Structures*. 2017; 150:511-519. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.07.032
3. Sidorov V.N. Structure numerical model updating algorithm on the results of monitoring. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013; 9(2):118-123. EDN RDQZGR. (rus.).
4. Zhou S., Song W. Environmental-effects-embedded model updating method considering environmental impacts. *Structural Control and Health Monitoring*. 2017; 25(3):e2116. DOI: 10.1002/stc.2116
5. Allemang R. The Modal Assurance Criterion (MAC): Twenty Years of Use and Abuse. *Journal of Sound and Vibration*. 2003; 37(8).
6. Hansen N. The CMA Evolution Strategy : a Tutorial. *ArXiv:1604.00772*. 2016. DOI: 10.48550/arXiv.1604.00772
7. Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms : a survey. *Neural Computing and Applications*. 2018; 30(2): 389-411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1
8. Ghahremani B., Bitaraf M., Rahami H. A fast-convergent approach for damage assessment using CMA-ES optimization algorithm and modal parameters. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2020; 10(3): 497-511. DOI: 10.1007/s13349-020-00397-1
9. Chen B., Starman B., Halilović M., Berglund L.A., Coppieters S. Finite Element Model Updating for Material Model Calibration : a Review and Guide to Practice. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2024; 32(4):2035-2112. 10.1007/s11831-024-10200-9
10. Chen Q., Zhou S., Xiao Y., Chen L., Zhou Y., Zhang L. Modal test and finite element updating of sprayer boom truss. *Scientific Reports*. 2024; 14(1). DOI: 10.1038/s41598-024-73640-0
11. Li D., Zhou J., He X. A unified approach for time-domain and frequency-domain finite element model updating. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025; 227:112361. DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.112361
12. Chen X., Zhang D., Beer M., Aadil M. Improved efficiency and accuracy in Bayesian structural model updating via DREAMCMASZS sampling and Kriging surrogates. *Structures*. 2025; 80:109856. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.109856
13. Liu H., Qin L., Zhou Z. Knowledge-Based Perturbation LaF-CMA-ES for Multimodal Optimization. *Applied Sciences*. 2024; 14(19):9133. DOI: 10.3390/app14199133
14. Korgin A.V., Ermakov V.A. Automated update of the FEM-model of the facilities in the monitoring. *Mechanization of Construction*. 2011; 7(805):16-17. EDN NXBFFR. (rus.).
15. Belostotsky A.M., Kalichava D.K., Nagibovich A.I., Petryashev N.O., Petryashev S.O. Adaptive finite element models as the base of dynamic monitoring of tall buildings. Part 2. Verification procedures for experimental models. *International Journal for Computational*

Civil and Structural Engineering. 2012; 8(4):28-42. EDN PZEXJN. (rus.).

16. Kalichava D.K. *Adaptive dynamic finite element models for monitoring load-bearing structures of high-rise buildings : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2012; 149. EDN SUOQDX. (rus.).

17. Novikov P.I. Numerical analysis technique for stiffness parameters identification of spatial structures by minimizing the difference between the calculated (finite element) and natural dynamic characteristics. *Intelligent Systems in Production*. 2020; 18(3):64-71.

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-64-71. EDN LFCLNA. (rus.).

18. Friswell M.I., Mottershead J.E. *Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Solid Mechanics and its Applications*. 1995. DOI: 10.1007/978-94-015-8508-8

19. Alkayem N.F., Cao M., Zhang Y., Bayat M., Su Z. Structural damage detection using finite element model updating with evolutionary algorithms : a survey. *Neural Computing and Applications*. 2018; 30(2):389-411. DOI: 10.1007/s00521-017-3284-1

Received September 15, 2025.

Adopted in revised form on September 28, 2025.

Approved for publication on October 9, 2025.

Bionotes: Oleg A. Ivanov — postgraduate student of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; olivanovpoch@yandex.ru;

Vladimir N. Sidorov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Science and Applied Mathematics, Academician of RAASN; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kanz@mgsu.ru, sidorov.vladimir@gmail.com;

Pavel I. Novikov — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Computer Science and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kanz@mgsu.ru, novikov.mgsu@gmail.com.

Authors' contribution: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.