



**Маилян  
Левон  
Рафаэлович**

доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

e-mail: mailyan@sroufo.ru

МАИЛЯН Л. Р.  
ЗУБРИЦКИЙ М. А.  
УШАКОВ О. Ю.  
САБИТОВ Л. С.  
БАМБУЛЕВИЧ М. Д.

ORCID: 0000-0002-7186-3191

## Оценка сейсмостойкости существующих фундаментов паротурбинных установок при сейсмических воздействиях



**Зубрицкий  
Максим  
Александрович**

аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Российская Федерация

e-mail: zubrickiy\_maksim@mail.ru

В статье рассмотрено применение мультимодального нелинейного статического метода (МНСМ) при оценке сейсмостойкости существующих фундаментов паротурбинных установок. Объектом исследования является рамный фундамент турбоагрегата блока № 7 Томь-Усинской ГРЭС. В статье предложен модифицированный алгоритм поиска характеристической точки при оценке сейсмостойкости нелинейным статическим методом. Результаты расчетов показали возможность дальнейшего использования существующих конструкций фундамента после частичной замены оборудования, несмотря на изменившуюся сейсмичность площадки строительства.

**Ключевые слова:** сейсмическое воздействие, проектное землетрясение, контрольное землетрясение, линейно-спектральный анализ, нелинейный статический метод (Pushover Analysis), фундамент паротурбинной установки.

*MAILYAN L. R., ZUBRITSKIY M. A., USHAKOV O. Yu., SABITOV L. S., BAMBULEVICH M. D. SEISMIC RESISTANCE ESTIMATION OF EXISTING TURBOGENERATOR FOUNDATION STRUCTURES UNDER DUCTILITY LEVEL EARTHQUAKE IMPACT BY NONLINEAR STATIC METHOD*

*The article considers the using of the multimodal nonlinear static method as a seismic resistance estimation method of existing turbogenerator foundation structures. The object of research is the turbogenerator foundation on the Tom-Usinsk State District Power Station. The article proposes a modified algorithm for the characteristic point search by the nonlinear static method. According to the calculations results, the existing foundation structures after a partial equipment replacement and the construction site increased seismicity are operational.*

*Keywords: seismic impact, strength level earthquake, ductility level earthquake, response spectrum analysis, nonlinear static method (Pushover Analysis), turbogenerator foundation structures.*



**Ушаков  
Олег  
Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: ushakovoleg@yandex.ru



**Сабитов  
Линар  
Салихзанович**

кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казанский федеральный университет, Казань, Российская Федерация

e-mail: sabitov-kgasu@mail.ru



**Бамбулевич  
Максим  
Дмитриевич**

аспирант, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

e-mail: bambulevich@list.ru

**Введение**

После успешной реализации программы модернизации объектов энергогенерации ДПМ, нацеленной на строительство новых генерирующих мощностей в российской электроэнергетике, Правительство Российской Федерации разработало новую программу ДПМ-2, в рамках которой планируется модернизировать имеющиеся старые мощности в общем объеме до 41 ГВт.

За время действия первой программы ДПМ обновлено около 15% всех установленных электрических мощностей в РФ. За период 2008–2017 гг. на это затрачено около 4 трлн руб. Но прогноз роста спроса на электроэнергию с начала реформы РАО ЕЭС не оправдался. Рецессия и медленное восстановление российской экономики в 2015–2018 гг. не принесли предполагаемого 4,3%-го среднегодового роста спроса на электроэнергию. В результате на рынке возник профицит мощности — пиковая нагрузка 151 ГВт против установленной мощности 243 ГВт.

Правительство РФ решило воспользоваться временным профицитом мощности и обновить парк старых тепловых генерирующих объектов, ведь для этого модернизируемые мощности необходимо временно выводить из эксплуатации. Была специально разработана программа модернизации объектов энергогенерации ДПМ-штрих, а ныне ДПМ-2. В сущности, она является аналогом первой программы ДПМ-1, но направлена на модернизацию самых старых тепловых генерирующих электрических мощностей (старше 45 лет) с целью снижения операционных затрат и повышения топливной эффективности. Ресурс обновленных электростанций должен быть продлен на 15–20 лет.

Сердцем энергетических станций образца 1950–1960-х гг. является паротурбинная установка. Для исправной работы машины такого типа требуется устройство рамного фундамента [4, 5, 7, 10], отвечающего не только требованиям прочности, но и безопасной и безотказной эксплуатации [3]. Рамный фундамент представляет собой ряд П-образных рам, жестко заделанных в фундаментную плиту и объединенных продольными балками (Иллюстрация 1).

Образованное рамами пространство необходимо для размещения конденсатора. При модернизации оборудования выполняется полная или частичная замена силовой установки и, при необходимости, конструкций фундамента. За последние 70 лет нормативные документы, регламентирующие проектирование строительных конструкций, претерпели серьезные изменения. В частности, уточнены карты сейсмического районирования (ОСР) [2], ведь современное оборудование зачастую позволяет более точно определить сейсмичность площадки строительства. При реконструкции электрических станций на территории Сибири после проведения работ по микросейсмозонированию фоновая сейсмичность площадки строительства зачастую изменяется в большую сторону, и фундаменты, запроектированные при сейсмичности 6 баллов по шкале MSK-64, требуют верификационных расчетов на сейсмическое воздействие уровня 7 баллов и выше по шкале MSK-6.

В статье представлена оценка сейсмостойкости существующих конструкций фундамента турбоагрегата блока №7 Томь-Усинской ГРЭС при замене генератора. Расчет на сейсмические воздействия выполнен с использованием мультимодального нелинейного статического метода [14–16].

**Методика учета высших форм колебаний**

Для определения отклика системы с учетом влияния высших форм колебаний рассмотрим следующий метод, для чего введем понятие *модифицированной системы инерционных сил*.

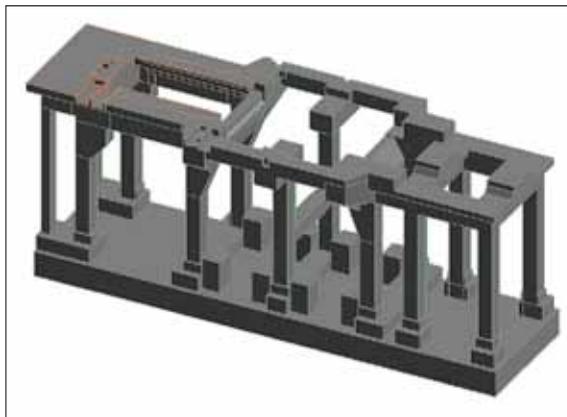


Иллюстрация 1. Рамный фундамент паротурбинной установки на Томь-Усинской ГРЭС. Аксонометрия. Автор М. А. Зубрицкий

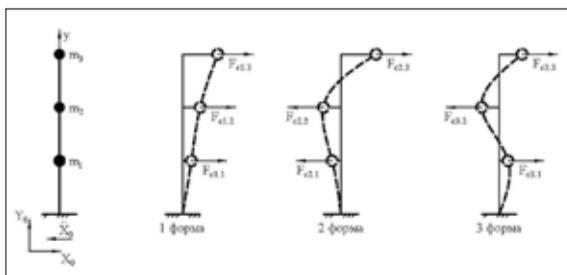


Иллюстрация 2. Графическое представление метода суммирования модальных откликов «корень квадратный суммы квадратов». Автор М. А. Зубрицкий

Под *модифицированной системой инерционных сил* будем понимать систему сил, полученную на основании суперпозиции сил методом «Корень Квадратный Суммы Квадратов» [6], при которой перемещение верха рассматриваемой расчетной модели будет соответствовать суммарным перемещениям, полученным на основании линейно-спектрального анализа. Графическое представление сложения инерционных сил выполнено на Иллюстрации 2.

Модифицированная система инерционных сил определяется выражением (1):

$$R_{Sun} = \alpha \left( \sum_{i=1}^n R_i^2 \right)^{1/2}, \tag{1}$$

где  $R_i$  — модальный отклик конструкции, соответствующий  $i$ -й форме собственных колебаний;

$\alpha = \frac{\Delta RSA}{\Delta SRSS}$  — коэффициент редуцирования, равный

соотношению максимального перемещения верха системы  $\Delta RSA$ , полученного на основании линейно-спектральной теории, к перемещениям  $\Delta SRSS$ , полученным на основании модифицированной системы сил.

Согласно [8, 9], для разрушения материала, независимо от того, какая будет приложена нагрузка (т.е. статическое медленное нагружение, динамическое — быстрое нагружение, однократное или многократное), необходимо затратить одно и то же количество энергии. Отсюда, энергия деформации линейной системы с модифицированной системой инерционных сил тождественна энергии деформации системы с учетом пластических деформаций. Целевое значение энергоемкости системы возможно определить на основании модифицированной системы инерционных сил (Иллюстрация 3):

$$W_I = \frac{V_I \Delta_I}{2}, \quad (2)$$

где  $V_I$  — сдвигающая сила в основании системы, полученная на основании линейно-спектрального анализа;  $\Delta_I$  — перемещение верха системы.

Следующим этапом оценки сейсмостойкости является построение на основании нелинейного статического расчета системы с одной степенью свободы при действии модифицированной системы инерционных сил графика зависимости «Усилие в основании  $V$  — Смещение верха системы  $\Delta$ » — график несущей способности. Учитывая, что энергии упругой и упругопластической деформации равны, полученное значение перемещения верха системы  $\Delta_{pl}$  является целевым значением для оценки сейсмостойкости всей системы в целом, на основании которого возможно определить междуэтажные смещения, внутренние усилия в элементах системы, а также проанализировать заупругую работы узлов и элементов системы.

В зависимости от положения характеристической точки на кривой несущей способности возможно оценить общий характер повреждения конструкции в целом.

### Постановка задачи и описание расчетной модели

Общая характеристика паротурбинной установки представлена в Таблице 1.

Расчетная сейсмичность площадки строительства принята по результатам сейсмического микрорайонирования и составляет 7 баллов по шкале MSK-64. Исходное сейсмическое воздействие задано в виде графика коэффициента динамичности согласно п. 5.6 (Иллюстрация 4).

Материал конструкций принят в соответствии с заключением по результатам обследования. Физическая нелинейность элементов фундамента определена диаграммами деформирования арматурной стали и бетона.

Информация о фактическом армировании принята на основании рабочей документации, выполненной в 1962 г. Ленинградским отделением МЭС СССР института «Тепло-ЭлектроПроект». Сечения элементов и их материал подтверждены натурным обследованием фундамента паротурбинной установки.

Линейные элементы расчетной модели (ригели и колонны) замоделированы при помощи физических и геометрически нелинейных конечных элементов стержней КЭ410, плитные части нижнего и верхнего строения фундаментов — при помо-

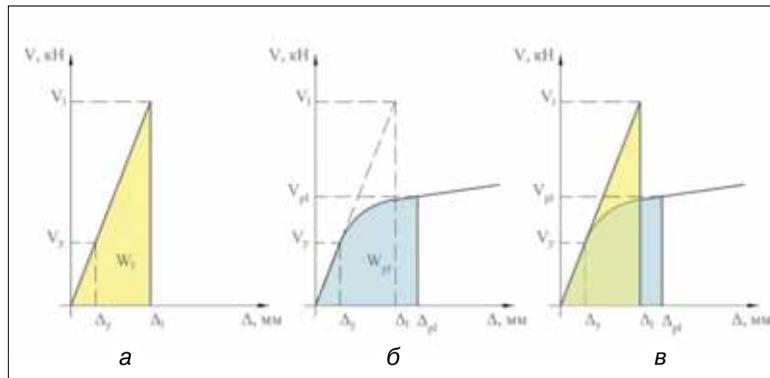


Иллюстрация 3. Определение энергии при упругом и упругопластическом поведении системы с одной степенью свободы: а — упругая работа; б — упругопластическая работа; в — равенство энергии при упругой и упругопластической работе. Автор М. А. Зубрицкий

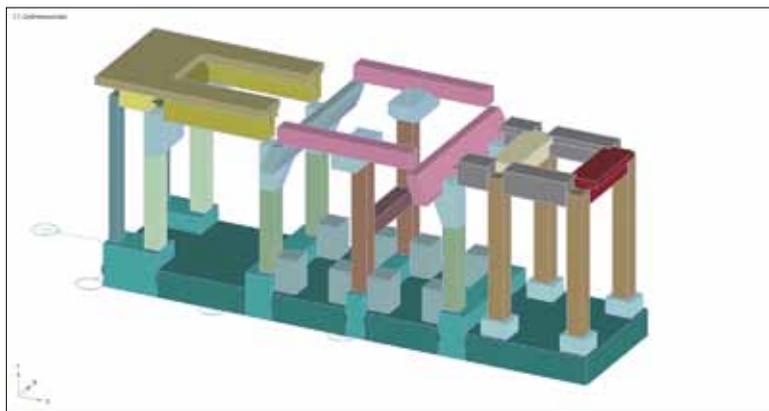


Иллюстрация 4. Общий вид расчетной схемы. Автор М. А. Зубрицкий

Таблица 1. Характеристики паротурбинной установки

№	Наименование	Значение
1	Мощность, МВт	225
2	Напряжение, В	15750
3	Номинальная частота вращения, об/мин	3000
4	Критическая частота вращения I/II, об/мин	930/2590
5	Масса статора монтажная (с рамами), кг	175 050
6	Масса ротора, кг	44 900
7	Масса подшипника, кг	5300
8	Масса щита торцевого, кг	3700
9	Масса газоохладителя, кг	920

щи физически и геометрически нелинейных элементов оболочки КЭ442. Места сопряжений ригелей и колонн выполнены в объеме и с использованием абсолютных жестких тел.

Общий вид расчетной модели представлен на Иллюстрации 4.

Система инерционных сил для мультимодального нелинейного статического метода принята на основании модального анализа системы [11–13]. В статье представлены результаты расчетов при сейсмическом воздействии вдоль оси паровой турбины (вдоль оси  $X$ ). Аналогичные

расчеты были выполнены для сейсмического воздействия, направленного поперек оси паровой турбины (вдоль оси  $Y$ ).

При анализе форм собственных колебаний фундамента турбины найдена форма, модальная масса которой составляет более 85% (Иллюстрация 5). В случае, когда модальная масса главной формы колебаний близка к 90% от общей модальной массы, учет высших форм колебаний не требуется, так как их влияние на общий отклик системы будет незначительно.

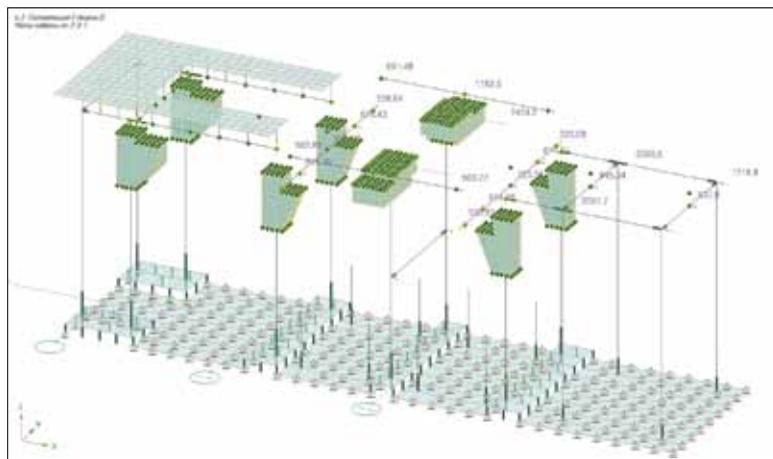


Иллюстрация 5. Система инерционных сил для оценки сейсмостойкости нелинейным статическим методом. Схема. Автор М. А. Зубрицкий

За систему инерционных сил при сейсмическом воздействии уровня «Контрольное землетрясение» принято распределение сил, соответствующее главной форме собственных колебаний системы.

### Результаты исследования

На основании линейно-спектральной теории, используя выражение (2), найдены следующие значения:

- максимальное перемещение верха системы при действии модифицированной системы сил — 6,80 мм;
- сдвигающее усилие в основании фундамента — 3496 кН;
- энергоемкость системы — 11,886 кДж.

Для определения наиболее благоприятного отклика выполнен нелинейный статический анализ и построена кривая несущей способности — график зависимости перемещений и сдвигающих усилий в основании системы. Характеристической точкой на графике является точка, образующая фигуру под кривой, площадь которой соответствует целевому значению энергоемкости системы. Кривая несущей способности с указанием характеристической точки представлена на Иллюстрации 6.

На основании расположения точки на кривой несущей способности можно сделать следующие выводы:

- существующий фундамент паротурбинного агрегата блока №7 Томь-Усинской ГРЭС способен воспринять сейсмическое воздействие уровня 7 баллов по шкале MSK-64;
- деформации сооружения при сейсмическом воздействии — упругие, что говорит о значительном резерве несущей способности;

- максимальное перемещение верха фундамента — 6,9 мм.

### Заключение

В процессе математического исследования выполнены статические и динамические расчеты, построена кривая несущей способности для расчетной модели несущих конструкций фундамента паротурбинной установки.

На основании модального анализа определена достаточность учета только главной формы собственных колебаний, так как ее модальная масса близка к 90%. Для последующего поиска характеристической точки использована гипотеза равенства энергий. По результатам расчетов определены максимальные перемещения верха системы, внутренние усилия и напряжения в элементах, а также упругий характер общего отклика системы. В процессе анализа авторами использован алгоритм, позволяющий автоматизировать нелинейный статический метод [1].

Дополнительно при анализе графика несущей способности определено максимальное горизонтальное перемещение при сейсмическом воздействии в 9 баллов по шкале MSK-64—31.6 мм. При этом деформации фундамента — упругопластические. Пластические деформации возникают в местах сопряжений колонн с фундаментами и ригелями.

Отметим, что использованный метод толерантен к исходным данным в части сейсмического воздействия — достаточно использования проектного спектра [2], а при меньших затратах машинного времени мультимодальный нелинейный статический метод может быть достойной альтернативой прямому динамическому методу.

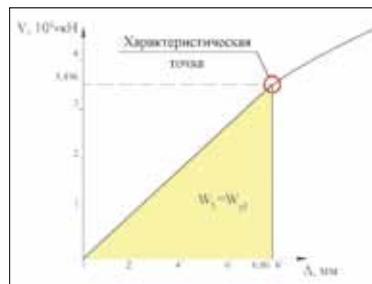


Иллюстрация 6. График несущей способности сооружения. Автор М. А. Зубрицкий

### Список использованной литературы

- 1 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667065. Мультимодальный нелинейный статический метод при оценке сейсмостойкости систем МРА-1. Правообладатель: Зубрицкий Максим Александрович. Авторы: Сабитов Л. С., Зубрицкий М. А., Ушаков О. Ю. Заявка 2019663503; дата гос. регистр. в реестре программ для ЭВМ 18.12.19 г. — 1 с.
- 2 Свод правил: СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах: нормативно-технический материал. — М.: [б.и.], 2014. — 125 с.
- 3 Свод правил: СП 26.13330.2012 Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05–87: нормативно-технический материал. — М.: [б.и.], 2014. — 70 с.
- 4 Абашидзе А. И., Сапожников Ф. В., Казанджян А. Т. Фундаменты машин тепловых электростанций. — М.: Энергия, 1975. — 256 с.
- 5 Абросимов Н. А., Аграновский Г. Г., Бабский Е. Г. и др. Динамические характеристики фундамента под турбоагрегат мощностью 1000 МВт на 3000 об/мин, определенные теоретически и в натуральных условиях // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева: сб. науч. трудов. — 1990. — Т. 218. — С. 22–25.
- 6 Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. — СПб.: Наука, 1998. — 255 с.
- 7 Лавелин В. Е., Ямов В. И. Активная виброизоляция фундаментов турбоагрегатов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. — 2015. — № 1. — С. 77–80.
- 8 Мкртычев О. В. Безопасность зданий и сооружений при сейсмических и аварийных воздействиях. — М.: МГСУ, 2010. — 152 с.

- 9 Мкртычев О. В., Джинчвелашвили Г. А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). — М.: МГСУ, 2012. — 192 с.
- 10 Савинов О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Стройиздат, 1979. — 200 с.
- 11 Applied Technology Council: ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. — Redwood, CA, 1996. — 334 p.
- 12 EUROPEAN STANDARD: EUR 25204 EN. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings — Worked examples. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. — 522 p.
- 13 FEMA-356. Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings // American Society of Civil Engineers (ASCE). — Reston, VA, 2000. — 519 p.
- 14 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Account for the contribution of higher modes under system seismic resistance estimation by nonlinear static method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 570, N 1. — 7 p.
- 15 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Account for the contribution of higher vibration modes under seismic resistance estimation of system with elastomeric supports by nonlinear static method // J. of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1425, N 1. — 7 p.
- 16 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Performance-based seismic evaluation methods for the estimation of inelastic deformation demands // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 570, N 1. — 7 p.
- 10 Savinov O. A. Sovremennye konstrukcii fundamentov pod mashiny i ih raschet. — 2-e izd., pererab. i dop. — L.: Strojizdat, 1979. — 200 s.
- 11 Applied Technology Council: ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. — Redwood, CA, 1996. — 334 p.
- 12 EUROPEAN STANDARD: EUR 25204 EN. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings — Worked examples. — Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. — 522 p.
- 13 FEMA-356. Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings // American Society of Civil Engineers (ASCE). — Reston, VA, 2000. — 519 p.
- 14 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Account for the contribution of higher modes under system seismic resistance estimation by nonlinear static method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 570, N 1. — 7 p.
- 15 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Account for the contribution of higher vibration modes under seismic resistance estimation of system with elastomeric supports by nonlinear static method // J. of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1425, N 1. — 7 p.
- 16 Zubritskiy M. A., Ushakov O. Y., Sabitov L. S. Performance-based seismic evaluation methods for the estimation of inelastic deformation demands // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Vol. 570, N 1. — 7 p.

Статья поступила в редакцию в июле 2020 г.  
Опубликована в декабре 2020 г.

## References

- 1 Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2019667065. Mul'timodal'nyj nelinejnyj staticheskij metod pri ocenke sejsmostojkosti sistem MPA-1. Pravoobladatel': Zubrickij Maksim Aleksandrovich. Avtory: Sabitov L. S., Zubrickij M. A., Ushakov O. Yu. Zayavka 2019663503; data gos. registr. v reestre programm dlya EVM 18.12.19 g. — 1 s.
- 2 Svod pravil: SP 14.13330.2014. Stroitel'stvo v sejsmicheskijh rajonah: normativno-tekhnicheskij material. — М.: [b.i.], 2014. — 125 s.
- 3 Svod pravil: SP 26.13330.2012 Fundamenty mashin s dinamicheskimi nagruzkami. Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.02.05–87: normativno-tekhnicheskij material. — М.: [b.i.], 2014. — 70 s.
- 4 Abashidze A. I., Sapozhnikov F. V., Kazandzhyan A. T. Fundamenty mashin teplovyh elektrostancij. — М.: Energiya, 1975. — 256 s.
- 5 Abrosimov H. A., Agranovskij G. G., Babskij E. G. i dr. Dinamicheskie harakteristiki fundamenta pod turboagregat moshchnost'yu 1000 MVt na 3000 ob/min, opredelennye teoreticheski i v naturnyh usloviyah // Izv. VNIIG im. B.E. Vedeneeva: sb. nauch. trudov. — 1990. — T. 218. — S. 22–25.
- 6 Birbraer A. N. Raschet konstrukcij na sejsmostojkost'. — SPb.: Nauka, 1998. — 255 s.
- 7 Lavelin V. E., Yamov V. I. Aktivnaya vibroizolyaciya fundamentov turboagregatov // Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN. — 2015. — № 1. — S. 77–80.
- 8 Mkrtychev O. V. Bezopasnost' zdaniy i sooruzhenij pri sejsmicheskijh i avarijnyh vozdeystviyah. — М.: MGSU, 2010. — 152 s.
- 9 Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A. Problemy ucheta nelinejnostej v teorii sejsmostojkosti (gipotezy i zabluzhdeniya). — М.: MGSU, 2012. — 192 s.

## Levon Mailyan

Doctor of Engineering Sciences, professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation  
e-mail: mailyan@sroufo.ru

## Maksim Zubritskiy

Postgraduate, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation  
e-mail: zubrickiy\_maksim@mail.ru

## Oleg Ushakov

Ph.D. in Engineering Sciences, Assistant professor, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation  
e-mail: ushakovoleg@yandex.ru

## Linar Sabitov

Ph.D. in Engineering Sciences, Assistant professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation  
e-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

## Maxim Bambulevich

Postgraduate, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation  
e-mail: bambulevich@list.ru