

DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-1-14-20

*Маилян Л.Р., доктор технических наук, профессор,
Зубрицкий М.А., главный специалист,
ООО «УралКонцептПроект», Россия,
Ушаков О.Ю., кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет, Россия,
Сабитов Л.С. *, кандидат технических наук, доцент,
Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Россия*
*Ответственный автор E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

РАСЧЕТ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ УРОВНЯ «КОНТРОЛЬНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ» НЕЛИНЕЙНЫМ СТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ПРИМЕРЕ АДЫГЕЙСКОЙ ВЭС

Аннотация: целью работы является апробация мультимодального нелинейного статического метода при сейсмическом воздействии уровня «Контрольное землетрясение» для высотных сооружений на примере ветроэлектрической установки (ВЭУ) мощностью 1,5-2,0 МВт Адыгейской ВЭС с помощью компьютерного моделирования в ПК Лира 10.10. Дополнительно выполнена верификация полученных результатов в ПК «Ansys». Основным несущим элементом ВЭУ является башня – труба со слабой конусностью, материалом которой является высокопрочная сталь С355. Оценка сейсмостойкости сооружения выполнена в физически и геометрически нелинейных постановках. При этом для стали была использована теория прочности Вон-Мизеса. Сравнение результатов расчёта доказывает эффективность мультимодального нелинейного статического метода. Рассматриваемый метод имеет ряд преимуществ: толерантность к исходным данным в части численного описания сейсмического воздействия, меньшая машинемкость расчета в сравнении с прямым динамическим методом, возможность полной автоматизации процесса расчета.

Ключевые слова: высотное сооружение, ветроэлектрическая установка, компьютерное моделирование, сейсмостойкость, контрольное землетрясение, Pushover-анализ, физическая нелинейность.

Введение

Расчет и проектирование строительных конструкций ветроэлектрических установок – процесс весьма нетривиальный и требующий особых инженерных знаний. Анализ литературы показал, что целостная методика расчёта такой системы на данный момент отсутствует. А при её разработке наиболее полно следует учесть следующие факторы:

- физическую и геометрическую нелинейность;
- циклическую усталость стали;
- динамические эффекты;
- резонансные явления.

Аналитически описать влияние всех перечисленных факторов полностью пока невозможно, что отражено в существующих нормах на проектирование ВЭУ [1, 2] и учебно-методической литературе [3]. При строительстве ВЭУ – сооружений повышенного уровня ответственности – в сейсмически опасных районах дополнительно возникает необходимость расчета на «Контрольное землетрясение» (КЗ). Согласно [4] расчеты, соответствующие КЗ, следует выполнять: во временной области с применением инструментальных или синтезированных акселерограмм (прямой динамический метод), по теории предельного равновесия или с использованием иных научно обоснованных методов. Наиболее точным из представленных методов является прямой динамический метод (ПДМ), но требует значительных затрат машинного времени при интегрировании уравнений движения, а также значительной квалификации инженера. Альтернативой ПДМ является нелинейный статический метод – Pushover-анализ, успешно использующийся при проектировании в Японии, США и Европе [5, 6]. Отклик системы на сейсмические воздействия определяется на основании нелинейного статического расчета расчетной динамической модели (РДМ) с одной степенью свободы, на которую действует система инерционных сил до тех пор, пока не будет достигнуто целевое перемещение или наступит разрушение. Предложенные системы распределения инерционных сил не учитывают влияние высших форм колебаний на общий отклик системы. Для решения данной проблемы в работах [7-12] предложены альтернативные системы распределения сил, но проведенные верификационные расчеты показали, что некоторые сейсмические воздействия вызывают дефицит сейсмостойкости. Авторами был предложен мультимодальный нелинейный статический метод («МНСМ») [13], позволяющий учесть необ-

ходимое количество форм высших колебаний. Предложенный метод значительно упрощает поиск характеристической точки на кривой несущей способности за счет введения понятия энергоемкости системы.

Методы и материалы

Объектом исследования является ВЭУ Acciona AW-82/1500 класса IEC ШВ на 1,5-2 МВт из [14, 15] проектируемой на территории Адыгейской ВЭС.

Ветроэлектрические установки состоят из следующих основных компонентов:

– Ветроколесо (ротор), преобразующее энергию набегающего ветрового потока в механическую энергию вращения оси турбины. Диаметр ветроколеса колеблется от нескольких метров до нескольких десятков метров. Частота вращения составляет от 15 до 100 об/мин;

– Мультипликатор – промежуточное звено между ветроколесом и электрогенератором, который повышает частоту вращения вала ветроколеса и обеспечивает согласование с оборотами генератора;

– Башня (ее иногда укрепляют стальными растяжками), на которой установлено ветроколесо. У ВЭУ большой мощности высота башни достигает 100 м. Обычно это цилиндрические мачты, хотя применяются и решетчатые башни;

– Основание (фундамент).

Общий вид и схема ветроэлектрической установки представлены на рис. 1.

Характеристики рассматриваемой ВЭУ представлены в табл. 1.

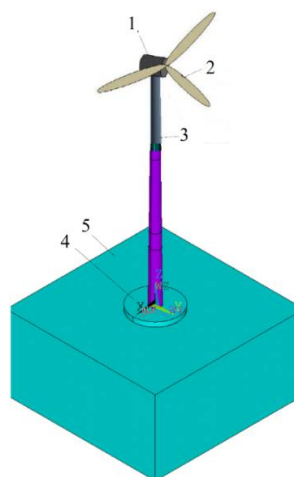


Рис. 1. Общий вид ветроэлектрической установки Acciona AW-82/1500 на 2 МВт:

1 – гондола; 2 – лопасти ротора; 3 – башня;

4 – сборно-разборный фундамент; 5 – грунт основания

Fig. 1. General view of the Acciona AW-82/1500 wind power installation at 2 MW:

1 - gondola; 2 - rotor blades; 3 - tower;

4 - collapsible foundation; 5 - base soil

Расчетная сейсмичность площадки строительства принята по результатам сейсмического микрорайонирования и составляет 8 баллов по шкале MSK-64. Сейсмическое воздействие задано однокомпонентной акселерограммой (рис. 2).

В качестве материала конструкций для расчетной динамической модели (РДМ) принята сталь, диаграмма деформирования которой представлена на рисунке 5. Для описания нелинейной работы элементов системы принята модель изотропного упрочнения материала (Bilinear Kinematic Hardening) [16]. Диаграммы деформирования стали при растяжении и сжатии принимают одинаковыми, с учетом нормируемых сопротивлений стали растяжению и сжатию. Поверхность текучести описывается критерием Вон-Мизеса и представляет из себя цилиндр, ось которого совпадает с осью гидростатического сжатия в осях главных напряжений.

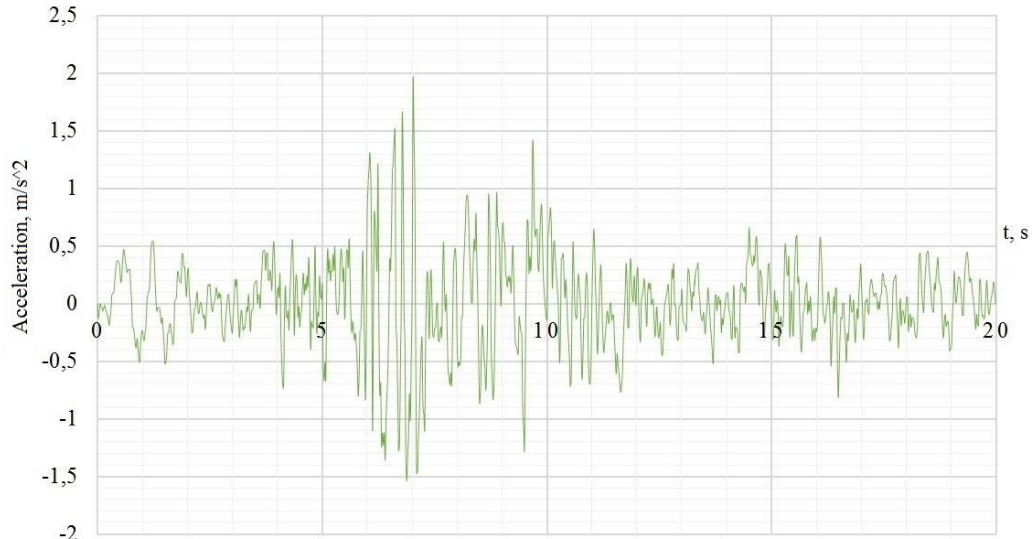


Рис. 2. Акселерограмма горизонтальной компоненты землетрясения
Fig. 2. Accelerogram of the Horizontal Component of the Earthquake

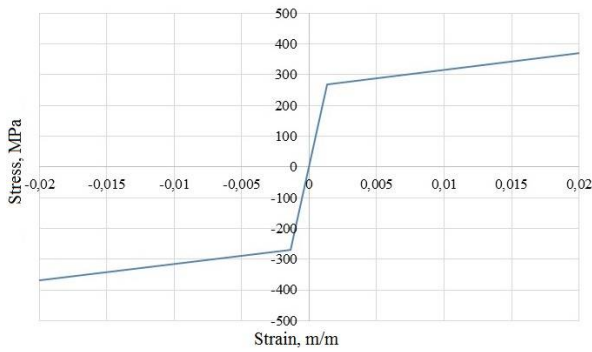


Рис. 3. Диаграмма деформирования стали
Fig. 3. Steel Deformation Diagram



Рис. 4. Общий вид расчетной модели в ПК ANSYS
Fig. 4. Calculation Model General View in ANSYS PC

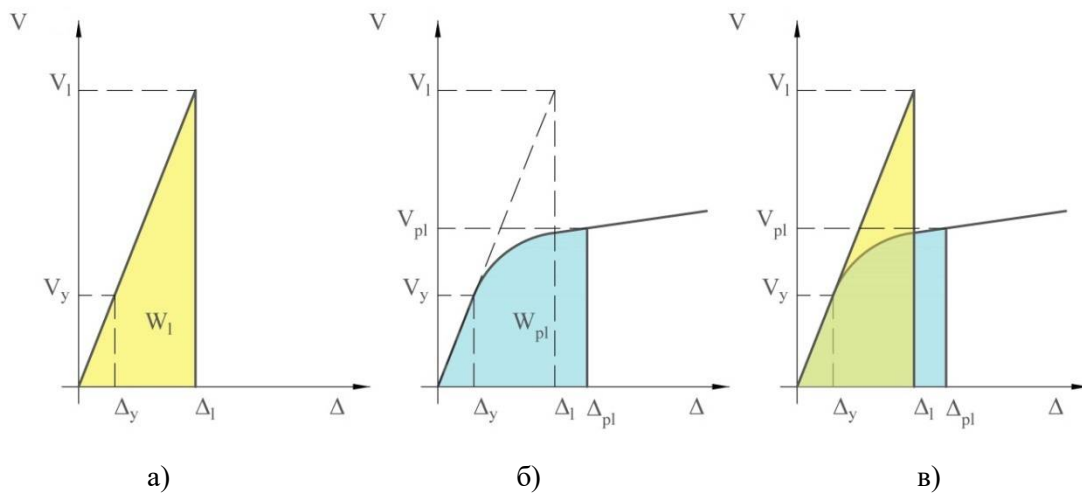


Рис. 5. Энергоемкость системы: а) упругая работа; б) упругопластическая работа; в) равенство энергии при упругой и упругопластической работе
Fig. 5. System Energy Intensity: a) Elastic Work; b) Elastoplastic Work; c) the Equality of Energy in Elastic and Elastoplastic Work

Результаты и обсуждения

Для вычисления системы сил для выполнения анализа сейсмостойкости системы мультимодальным нелинейным статическим методом [13] исходными данными являются инерционные силы первых трех форм колебаний, суммарная модальная масса которых менее 90% от общей [4].

Распределение инерционных сил и результирующая система сил получены на основании линейно-спектрального анализа.

Для вычисления коэффициента редуцирования инерционных сил выполнен статический расчет. Полученное значение коэффициента представлено в таблице 2. Также определена энергоемкость системы.

Следующим этапом оценки сейсмостойкости системы является выполнение нелинейного статического расчета при действии модифицированной системы инерционных сил, на основании которого строится кривая несущей способности в координатах «сдвигающая сила в основании – перемещение верха системы».

Поиск характеристической точки является итерационным: необходимо найти такую точку на графике несущей способности, чтобы площадь образованной под графиком фигуры соответствовала целевой энергоемкости системы (рис. 5).

На основании характеристической точки определено напряженно деформируемое состояние системы, соответствующее наиболее неблагоприятному состоянию системы за все время сейсмического воздействия.

Результатом расчета на контрольное землетрясения является оценка возможности несущих элементов воспринять сейсмическое воздействие. При этом допускается возникновение пластических шарниров, локальных разрушений и перемещений, превышающих предельно допустимых.

В табл. 1 приведены полученные перемещения в сравнении с перемещениями, полученными нелинейным статическим методом. На рисунке 6 представлены эпюры внутренних усилий и напряжений в элементах башни ВЭУ. Анализ полученных данным показал, что сейсмическое воздействие не является «доминантным» нагружением, максимальные напряжения в элементах ВЭУ не превышают 25 МПа.

Таблица 1

Оценка погрешности МНСМ для РДМ при сейсмическом воздействии

Table 1

MNSM Error Estimation for RDM under Seismic Impact

Параметр		Прямой динамический метод	Нелинейный статический метод	Погрешность, %
Горизонтальные перемещения, мм	Верхний узел H=80 m	133.99	130.71	-2.45
	Средний узел H=52 m	56.23	59.58	+5.62
	Нижний узел H=26 m	14.27	16.05	+11.09

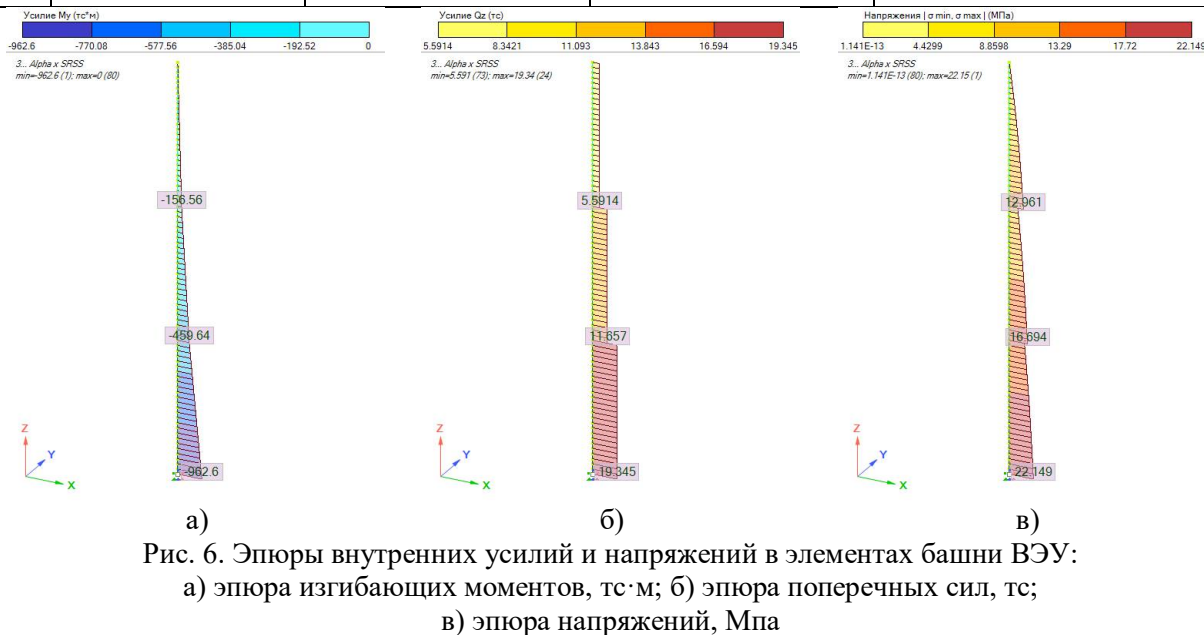


Рис. 6. Эпюры внутренних усилий и напряжений в элементах башни ВЭУ:
 а) эпюра изгибающих моментов, тс·м; б) эпюра поперечных сил, тс;
 в) эпюра напряжений, Мпа
 Fig. 6. Diagrams of Internal Forces and Stresses in The Elements of a Wind Turbine Tower:
 a) Diagram of Bending Moments, tf • m; b) a Diagram of the Transverse Forces, tf;
 c) Stress Diagram, MPa

Выводы

По результатам анализа сейсмостойкости мультимодальным нелинейным статическим методом конструкция башни ветроэлектрической установки Assiona AW-82/1500 способна воспринять сейсмическое воздействие уровня «Контрольное землетрясение», соответствующее 8 баллам по шкале MSK-64. Дополнительно выполнена верификация результатов прямым динамическим методом. Погрешность расчетов не превысила 12 %, обеспечивая профицит сейсмостойкости строительных конструкций. Дополнительно авторами предложено приложение для ПК Лира 10.10 [17], что позволит автоматизировать расчет на «Контрольное землетрясение». Последующие публикации будут посвящены апробации предложенного алгоритма на расчетных моделях, в которых вклад высших форм колебаний в общую деформацию системы значителен.

Литература

1. СТО 70238424.27.100.059-2009 Ветроэлектростанции (ВЭС). Условия создания. Нормы и требования. М.: Некоммерческое Партнерство «Инновации в электроэнергетике», 2009. 192 с.
2. СТО РусГидро 03.01.102-2013 Ветроэлектростанции. Основные требования, критерии выбора ветроэнергетического оборудования для ветроэлектростанций. М.: ОАО «РУСГИДРО», 2013. 100 с.
3. Елистратов В.В. Панфилов А.А. Проектирование и эксплуатация установок нетрадиционной и возобновляемой энергетики. Ветроэлектрические установки: учебное пособие. Спб, Издательство Политехнического университета, 2011.
4. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. М.: 2014.
5. Applied Technology Council (ATC-40). (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Redwood, CA.
6. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings. EUR 25204 EN – 2012.
7. Fajfar P. and Fischinger M. N2-A Method for Nonlinear Seismic Analysis of Regular Structures. Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan. 1988. Vol. 5. P. 111 – 116.
8. Bracci J.M., Kunnath S.K. and Reinhorn A.M. Seismic Performance and Retrofit Evaluation for Reinforced Concrete Structures. American Society of Civil Engineers // Journal Structural Engineering. 1997. Vol. 123. N1. P. 3 – 10.
9. Gupta B. and Kunnath S.K. Adaptive Spectra-based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures. Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. 2000. Vol. 16. N2. P. 367 – 392
10. Paret T.F., Sasaki K.K., Eilbeck D.H., and Freeman, S.A. (1996). Approximate Inelastic Procedures to Identify Failure Mechanisms from Higher Mode Effects. Proceedings, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 966, Acapulco, Mexico
11. Sasaki K.K., Freeman S.A., Paret T.F. Multimode Pushover Procedure (MMP) – A Method to Identify the Effects of Higher Modes in a Pushover Analysis. Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Seattle, Washington. 1998.
12. Matsumori T., Otani S., Shiohara H. and Kabeyasawa T. Earthquake Member Deformation Demands in Reinforced Concrete Frame Structures. Proceedings, U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering, Methodology for R/C Bldg. Structures. Maui, Hawaii. 1999. P. 79 – 94.
13. Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y., Sabitov L.S (2019). 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. N1.
14. Umesh K.N., Bharath P. Mohamed Farzath Iyaz Design and analysis of 2-MW wind turbine tower // International Journal of Mechanical And Production Engineering. 2016. Vol. 4. Issue-10. P. 13 – 17.
15. Chawin Chantharasenawong, Pattaramon Jongpradist and Sasaraj Laoharatchapruerk Preliminary Design of 1.5 MW Modular Wind Turbine Tower // AEC17, 2nd TSME International Conference on Mechanical Engineering 19-21 October 2011.
16. ANSYS HELP [Electronic resource] // URL: <https://ansyshelp.ansys.com/>
17. Certificate of state registration of the program for electronic computer №2019667065. Multimodal nonlinear static method for system seismic evaluation MPA-1. Copyright holder: Zubritskiy Maksim Aleksandrovich. The authors: Sabitov L.S., Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y. Request 2019663503; state date registration in the electronic computer program registry 18.12.19

References

1. Company Standard STO 70238424.27.100.059-2009 Vetroelektrostancii (VES). Usloviya sozdaniya. Normy i trebovaniya. M.: Nekommercheskoe Partnerstvo «Innovacii v elektroenergetike», 2009. 192 p. (rus.)
2. Company Standard STO RusGidro 03.01.102-2013 Vetroelektrostancii. Osnovnye trebovaniya, kriterii vybora vetroenergeticheskogo oborudovaniya dlya vetroelektrostancij. M.: OAO «RUSGIDRO», 2013. 100 p. (rus.)
3. Elistratov V.V. Panfilov A.A. Proektirovanie i ekspluatatsiya ustanovok netraditsionnoj i vozobnovlyaemoj energetiki. Vetroelektricheskie ustanovki: uchebnoe posobie. Spb, Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2011. (rus.)
4. SP 14.13330.2014. Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah. M.: 2014. (rus.)
5. Applied Technology Council (ATC-40). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Redwood, CA. 1996.
6. Eurocode 8: Seismic Design of Buildings. EUR 25204 EN – 2012.
7. Fajfar P. and Fischinger M. N2-A Method for Nonlinear Seismic Analysis of Regular Structures. Proceedings, Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan. 1988. 5. P. 111 – 116.
8. Bracci J.M., Kunnath S.K. and Reinhorn A.M. Seismic Performance and Retrofit Evaluation for Reinforced Concrete Structures. American Society of Civil Engineers. Journal Structural Engineering. 1997. 123 (1). P. 3 – 10.
9. Gupta B. and Kunnath S.K. Adaptive Spectra-based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures. Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California. 2000. 16 (2). P. 367 – 392
10. Paret T.F., Sasaki K.K., Eilbeck D.H., and Freeman, S.A. Approximate Inelastic Procedures to Identify Failure Mechanisms from Higher Mode Effects. Proceedings, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 1996. Paper 966, Acapulco, Mexico.
11. Sasaki K.K., Freeman S.A., Paret T.F. Multimode Pushover Procedure (MMP) – A Method to Identify the Effects of Higher Modes in a Pushover Analysis. Proceedings, Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Seattle, Washington. 1998.
12. Matsumori T., Otani S., Shiohara H. and Kabeyasawa T. Earthquake Member Deformation Demands in Reinforced Concrete Frame Structures. Proceedings, U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering, Methodology for R/C Bldg. Structures. Maui, Hawaii. 1999. P. 79 – 94.
13. Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y., Sabitov L.S (2019). Account for the contribution of higher modes under system seismic resistance estimation by nonlinear static method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 570 (1).
14. Umesh K.N., Bharath P. Mohamed Farzath Iyaz Design and analysis of 2-MW wind turbine tower. International Journal of Mechanical And Production Engineering. 2016. 4 (10). P. 13 – 17.
15. Chawin Chantharasenawong, Pattaramon Jongpradist and Sasaraj Laoharatchapruerk Preliminary Design of 1.5 MW Modular Wind Turbine Tower. AEC17, 2nd TSME International Conference on Mechanical Engineering 19-21 October 2011.
16. ANSYS HELP [Electronic resource]. URL: <https://ansyshelp.ansys.com/>
17. Certificate of state registration of the program for electronic computer №2019667065. Multimodal nonlinear static method for system seismic evaluation MPA-1. Copyright holder: Zubritskiy Maksim Aleksandrovich. The authors: Sabitov L.S., Zubritskiy M.A., Ushakov O.Y. Request 2019663503; state date registration in the electronic computer program registry 18.12.19

*Mailyan L.R., Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,
Zubritskiy M.A., Chief Specialist,
LLC «UralConceptProekt», Russia,
Ushakov O.Yu., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Ural Federal University, Russia,
Sabitov L.S. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Kazan (Volga region) Federal University, Russia*
*Corresponding author E-mail: sabitov-kgasu@mail.ru

CALCULATION OF HIGH-RISE BUILDINGS UNDER SEISMIC EFFECT OF “CONTROLLING EARTHQUAKE” LEVEL BY NONLINEAR STATIC METHOD ON THE EXAMPLE OF ADYGHE WIND POWER PLANT

Abstract: the aim of this work is to test a multi-modal nonlinear static method for seismic impact of the "controlling earthquake" level for high-rise structures on the example of a wind power plant (WPP) with a capacity of 1.5-2.0 mW of the Adyghe WPP using computer modeling in the LIRA 10.10 PC. Additionally, the results were verified in the PC “Ansys”. The main bearing element of the WPP is a tower-pipe with a weak taper, the material of which is high-strength steel S355. The assessment of the structure seismic resistance is performed in physically and geometrically nonlinear settings. At the same time, the Vaughn-Mises strength theory was used for steel. Comparison of the calculation results proves the effectiveness of the multi-modal nonlinear static method. The method under consideration has a number of advantages: tolerance to the initial data in terms of numerical description of the seismic impact, less machine capacity of the calculation in comparison with the direct dynamic method, and the ability to automate the calculation process fully.

Keywords: high-rise structure, wind power plant, computer modeling, seismic resistance, ductility level earthquake, Pushover analysis, physical nonlinearity

Для цитирования: Маилян Л.Р., Зубрицкий М.А., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С. Расчет высотных сооружений при сейсмическом воздействии уровня «контрольное землетрясение» нелинейным статическим методом на примере адыгейской вэс // Строительные материалы и изделия. 2020. Том 3. №1. С. 14 – 20. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-1-14-20

For citation: Mailyan L.R., Zubritskiy M.A., Ushakov O.Yu., Sabitov L.S. Calculation of high-rise structures under the seismic effect of “controlling earthquake” level by a nonlinear static method on the example of Adyghe wind power plant. Construction Materials and Products. 2020. 3 (1). P. 14 – 20. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-1-14-20

Поступила в редакцию 25 декабря 2019 г.
Принята в доработанном виде 12 января 2020 г.
Одобрена для публикации 20 февраля 2020 г.

Received: December 25, 2019.
Revised: January 12, 2020.
Accepted: February 20, 2020.