

Москалёва Т. В.

Полушина М. В.

Государственное
высшее учебное
заведение
«Национальный горный
университет»

Moskalyova T. V.

Polushyna M. V.

State Higher Educational
Institution «National
Mining University»

УДК 624.159.1

МОДЕЛЬ ФУНДАМЕНТА ТУРБОАГРЕГАТА МОЩНОСТЬЮ 300 МВт ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗОК

Создана конечно-элементная модель фундамента турбоагрегата на основе программного комплекса SolidWorks Simulation. С помощью этой модели проведены исследования влияния статической и динамической нагрузок на распределение напряжений и перемещений на примере типового рамного фундамента турбоагрегата мощностью 300 МВт. Точность модели подтверждена задачами верификации, имеющих известное аналитическое решение. Результаты численных расчетов напряженно-деформированного состояния фундамента соответствуют действующим нормам. Модель может использоваться в процессе проектирования работ по реконструкции турбоагрегатов.

Ключевые слова: фундамент, турбоагрегат, колебания, метод конечных элементов.

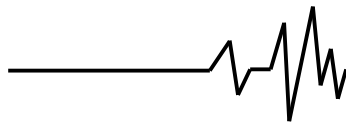
Постановка задачи. В соответствии с энергетической программой Украины до 2030 года необходимо технически переоснастить и модернизировать большинство тепловых электростанций Украины. Это связано с исчерпанием их ресурса, а также увеличением установленной мощности турбоагрегатов, что особенно актуально в современных условиях. Большая часть в общем количестве модернизируемых турбоагрегатов соответствует агрегатам мощностью 300 МВт. При замене оборудования в процессе реконструкции, на стадии проектирования изменений, возникает необходимость исследования напряженно-деформированного состояния фундамента в связи с изменением нагрузок, действующих на него, а также возможных небольших конструктивных изменений. С этой целью создана конечно-элементная модель рамного фундамента турбоагрегата мощностью 300 МВт для исследования ее на действие статической и динамической нагрузок.

Анализ предыдущих исследований и публикаций. Вопросом исследования напряженно-деформированного состояния фундаментов под турбоагрегаты занималось много организаций и авторов. Среди них следует выделить: Институт проблем машиностроения им. А.Н.Подгорного

НАН Украины, в частности Шульженко Н.Г., Воробьева Ю.С., Билетченко В.П.; Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е.Веденеева [1], ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», в частности зав. лабораторией Бауска Е.А., Швеца В.Б., Седина В.Л., Креймера Ю.Г. и др.

Труды ИПМаш им. А.Н.Подгорного посвящены анализу колебаний фундаментов [2], а также колебаний системы турбоагрегат-фундамент [3]. Метод исследования – модификация метода динамических жесткостей с использованием идеи расчета по частям. Основной элемент системы – прямолинейная балка. Для фундамента используется балка постоянного прямоугольного сечения, для валопровода – переменного сечения с сосредоточенными массами. Фундамент представляется набором балок, нижнее строение задавалось главными коэффициентами динамических жесткостей балки как полосы на упругом Винклеровском основании. Основной недостаток метода состоит в том, что балочная модель не учитывает диафрагмы жесткости в виде плит переменного сечения в районе конденсатора.

Труды лаборатории исследования фундаментов атомных и тепловых электростанций ГВУЗ ПГАСА ценны своими



натурными испытаниями [4,5]. Измерениям подвергались кинематические характеристики (перемещения, скорости, ускорения точек фундамента), однако не изученным осталось распределение и величины напряжений в элементах фундамента, что важно для прогнозирования надежности конструкции.

Цель исследования. Разработка конечно-элементной модели рамного фундамента турбоагрегата мощностью 300 МВт для исследования влияния статической, динамической и сейсмической нагрузок на распределение напряжений и перемещений.

Основная часть работы. Рассмотрен фундамент под турбоагрегат К-300-240+ТГВ-300 типового проекта Харьковского отделения института «Теплоэлектророект», представляющий собой пространственный монолитный рамный каркас, опирающийся на естественное основание через массивную железобетонную плиту. Для него разработана конечно-элементная модель в пакете программ SolidWorks Simulation. При построении сетки использовались объемные конечные элементы в виде тетраэдра с функцией элемента в виде полинома с 24 степенями свободы. Максимальная и минимальная длина ребра элемента сетки изменяются в диапазоне 250...10 мм, в зависимости от изменения размеров модели и интенсивности изменения напряжений при расчете. Окончательный размер конечного элемента определяется путем сравнения результатов расчета в контрольных точках с более мелкой сеткой (150...5 мм). Результаты расчета отличаются друг от друга в пределах допустимой погрешности, не превышающей 0,1%. Точность решения программным комплексом SolidWorks Simulation подтверждается также рядом задач верификации, имеющих известное аналитическое решение.

Упругие свойства грунта учитывались упругими связями с коэффициентом жесткости $C_z = 25 \text{ МН/м}^3$ для суглинка. Статические нагрузки, учитывающие вес статора и ротора, прикладывались к опорам подшипников. К статическим нагрузкам отнесены также нагрузки, связанные с прогревом турбины. Они прикладывались в горизонтальной плоскости к опорам подшипников в направлении вдоль и поперек оси фундамента. Динамические нагрузки, вызывающие колебания фундамента, в стационарном режиме имеют вид гармонических функций с частотой, равной оборотной частоте ротора (3000 об/мин), а также двойной оборотной частоте. Они вызываются различными причинами, как

технологического характера (неуравновешенность масс, неточность изготовления и сборки валопровода), так и электрическими процессами, происходящими в генераторе. Динамические нагрузки прикладываются к опорам подшипников и принимаются равными 15%–20% от веса ротора на данной опоре [6,7]. Статорные части агрегата традиционно моделировались сосредоточенными массами, присоединенными к фундаменту в местах опоры подшипников. Влияние колебаний вала на колебания фундамента при оборотной и двойной оборотной частоте незначительно [3] и не учитывалось. Взаимосвязь колебаний ротора и фундамента проявляется на частотах 200...350 Гц. Алгоритм расчета вынужденных колебаний реализуется в виде установления амплитудно-частотных характеристик системы фундамент-основание.

На рис. 1 приведена 3D модель фундамента турбоагрегата с нагрузками. Масса самого фундамента составляет 6640 т, масса конденсатора без воды – 335 т, масса турбины – 690 т, полная масса генератора – 370 т [8].

Под действием собственного веса и статической нагрузки фундамент проседает на величину в среднем 15,5 мм из-за упругих свойств грунта. Причем из-за упругих свойств нижней плиты фундамента осадки в различных точках плиты различны. Наибольшие значения составляют 17,8 мм и наблюдаются в районе пятого подшипника и ближайшего к нему подшипника генератора. Осадки на отметке +9 м составляют в среднем 17,2 мм, при этом наибольшее значение составляет 18,2 мм и расположено также в районе пятого подшипника и ближайшего к нему подшипника генератора. Перемещения в горизонтальной плоскости на отметке +9 м наблюдаются вдоль и поперек оси турбогенератора. Вдоль оси турбины горизонтальное перемещение 0,72 мм по оси первого подшипника; 0,7 мм по оси второго подшипника; 0,44 мм по оси пятого подшипника, 0,58 мм по оси крайнего подшипника генератора. В поперечном направлении горизонтальные перемещения, вызванные нагревом турбины, симметричны, наибольшее значение в районе четвертого подшипника и составляет 0,2 мм. Напряжения в элементах фундамента составляют в среднем 1,5 МПа. В районах концентрации напряжений (места сочленения элементов фундамента, на кромках продольных балок) а также в месте расположения второго подшипника напряжения достигают 10 МПа. Это подтверждает правильность использования металлической окантовки на кромках продольных балок.

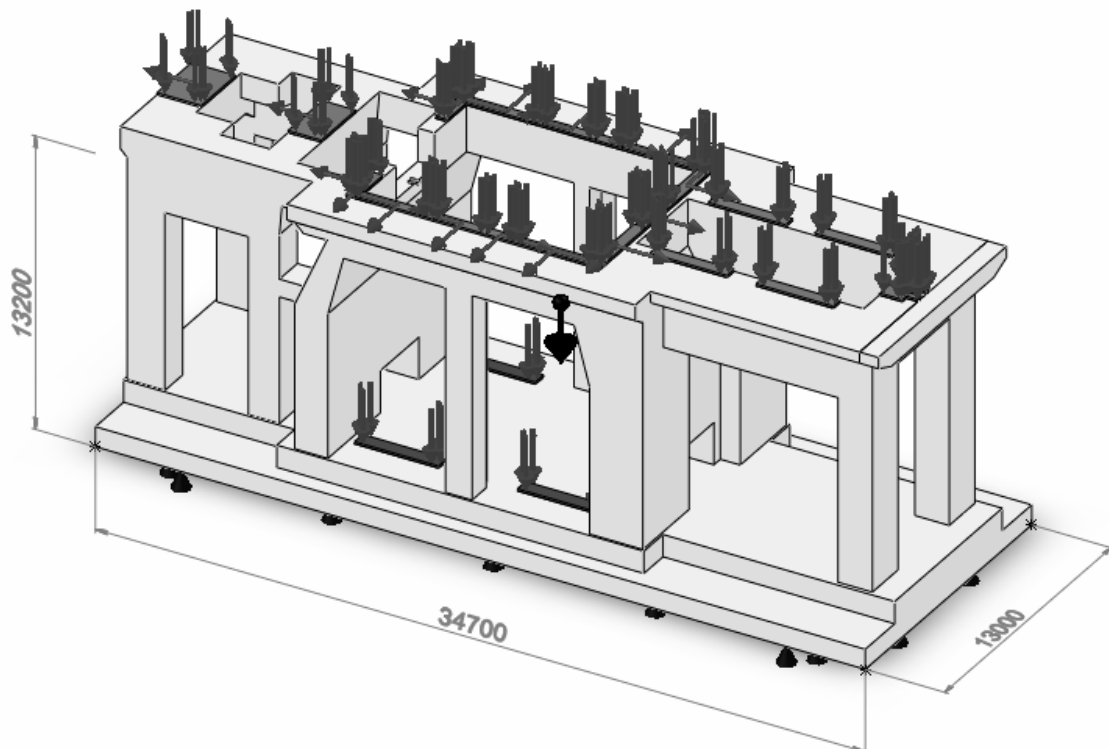
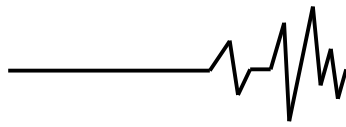


Рис. 1. Модель фундамента турбоагрегата с нагрузками

Авторская разработка

На рис. 2 приведена схема распределения максимальных амплитуд перемещений, а также их значения в контрольных точках при нагружении вибрационными силами частотой около 50 Гц. Контрольные точки соответствуют местам

расположения подшипников и максимальным значениям амплитуд. Значение амплитуд перемещений в местах расположения подшипников не превышают нормативных значений 0,15 мкм в соответствии с п.5.17 П,К.М «Вимірювання вібрації» [9].

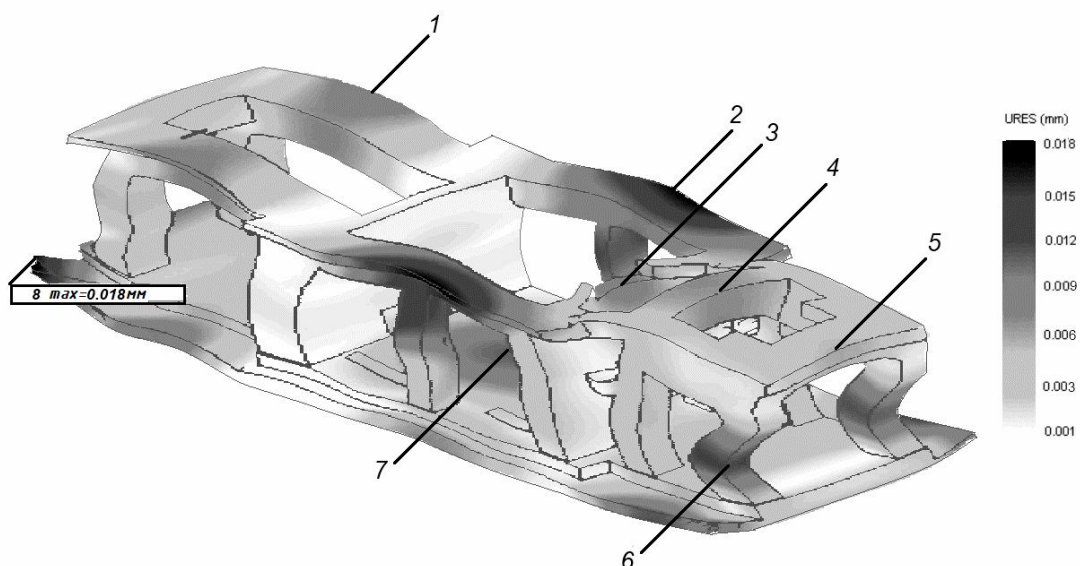
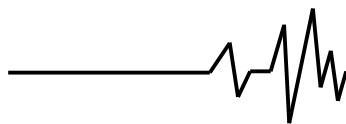


Рис. 2. Контрольные точки для замера амплитудно-частотной характеристики фундамента. Максимальные перемещения при возмущении 47-52 Гц

Авторская разработка



На рисунке 3 приведены отрезки амплитудно-частотной характеристики перемещений характерных точек фундамента в диапазоне частот близких к 50 Гц для контрольных точек, показанных на рис. 2. При

нагрузении вибрационными силами частотой 100 Гц амплитуда колебаний не превышает 5 мкм, амплитудно-частотная характеристика представляет собой функцию без явно выраженных пиков.

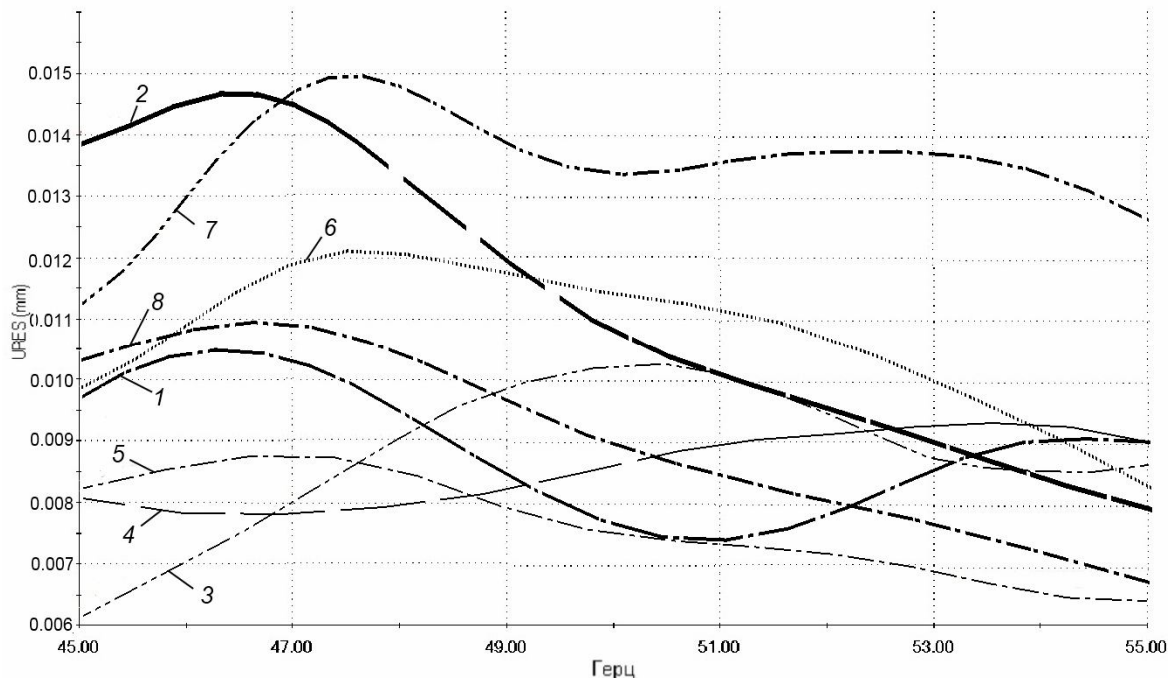


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики перемещений характерных точек фундамента

Авторская разработка

Изменение жесткости пружин, имитирующих упругое основание грунта влияет на собственные частоты и формы колебаний фундамента. Первые формы колебаний модели с упругим основанием и частотой 1,5...3 Гц соответствуют в основном перемещениям фундамента как жесткого тела. Увеличение жесткости основания поднимает значение нижней частоты колебания фундамента.

В модели учет массы стационарного оборудования проводился путем введения на отметке +9 м и -2,3 м дополнительных элементов фиксированного объема и соответствующей плотности. Исключение массы оборудования из рассмотрения также изменяет собственные частоты и формы колебания конструкции.

Выводы

1. Точность конечно-элементной модели фундамента турбоагрегата, составленной на основе пакета программ SolidWorks Simulation, подтверждена как задачами верификации на тестовых примерах, так и результатами расчета НДС фундамента турбоагрегата мощностью 300 МВт. Значения амплитуд перемещений и скоростей при динамическом

воздействии не превышают нормативных значений. Статические перемещения соответствуют перемещениям, регистрируемых на действующих турбоагрегатах.

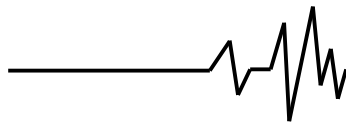
2. Динамические напряжения значительно меньше статических, возникают в местах концентрации напряжений и не превышают 1,5 МПа. Значения статических напряжений не превышают 10 МПа.

Список использованных источников

1. Абросимов Н.А. Натурные исследования динамических характеристик фундаментов под быстроходные турбоагрегаты большой мощности / Козлов А.Б., Курмакаев М.К., Пермякова В.В., Абросимов Н.А. // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. – 2002. – Т.241. – С. 90-94.

2. Шульженко Н.Г. Вертикальные колебания фундаментов, возбужденных ротором турбоагрегата / Н.Г.Шульженко, В.П.Билетченко // Строительная механика и расчет сооружений. – 1984. – №6. – С.55-57.

3. Шульженко Н.Г. Численный анализ колебаний системы турбоагрегат-фундамент / Н.Г.Шульженко, Ю.С.Воробьев. – К.: Наукова думка, 1991. – 232 с.



4. Бауск Е.А. Натурные исследования статических деформаций фундаментов турбоагрегатов мощностью 1000 МВт строящихся АЭС / Е.А.Бауск, В.К.Капустин, В.Б.Швец // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – №4. – С6-8.

5. Ермолинский А.В. Комплексные динамические исследования фундаментов тихоходных турбоагрегатов АЭС / А.В.Ермолинский, Б.А.Ротгауз, Н.С.Швец // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – №4. – С.11-14.

6. Гольдин А.С. Устранение вибраций турбоагрегатов на тепловых электростанциях / А.С.Гольдин. – М.: Энергия, 1980. – 95с.

7. Черный Г.И. Учет динамических нагрузок при проектировании фундаментов / Г.И.Черный // Труды II Украинской научно-технической конференции по механике грунтов и фундаментостроению. – Полтава, 1995. – С. 54-57.

8. Осоловский В.П. Эксплуатация фундаментов энергетического оборудования ТЭС / В.П.Осоловский, Д.П.Венгеровский, Я.Л.Кранцфельд. – М.: Энергия, 1980. – 167с.

9. Норми випробування електрообладнання СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007/ К.: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 262с.

Список источников в транслитерации

1. Abrosimov N.A. Naturnye issledovaniya dinavicheskikh kharakteristik fundamentov pod bystrokhodnyye tyrboagregaty bolshoy moschnosti / F.B.Kozlov, M.K.Kyrmakeev, V.V.Permyakova, N.AA.brosimov // Izvestiya VNIIG im. V.E.Vedeneeva. – Vol.241. – pp.90-94.

2. Shylzhenko N.G. Vertikalnye kolebaniya fundamentov, vozbuzhdenykh rotorom turboagregata / N.G.Shylzhenko, V.P.Biletchenko // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. – 1984. – no.6. – pp.55-57.

3. Shylzhenko N.G. Chisljeni analiz kolebaniy turboagregat-fundament. – K.: Naukova dumka, 1984. – 232p.

4. Bausk E.A. Naturnye issledovaniya statcheskikh deformatsii fundamentov turboagregatov moschnostyu 1000 MVt stroyaschikhsya AES / E.A.Bausk, V.K.Kapustin, V.B.Shvets // Osnovanie, fundamenty i mekhanika gruntov. – 1985. – no.4 – pp.6-8.

5. Ermolinskii A.V. Kompleksnye dinamicheskie issledovaniya fundamentov tikhokhodnykh tyrboagregatov AES / A.V.Ermolinskii, B.A.Rotgauz, N.S.Shvets // Osnovanie, fundamenty i mekhanika gruntov. – 1985. – no.4. – pp.11-14.

6. Goldin A.S. Ustranenie vibratsii

turboagragatov na teplovykh elektrostantsiyakh / A.S.Goldin. – M.:Energiya, 1980. – 95p.

7. Chernyi G.I. Uchet dinamicheskikh nagruzok pri proektirovanii fundamentov / G.I.Chernyi // Trudy II Ukrainskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po mekhanike gruntov i fundamentostroeniyu. – Poltava, 1995. – pp.54-57.

8. Osolovskii V.P. Ekspluayatsiya fundamentov energeticheskogo oborudovaniya TES / V.P.Osolovskii, D.P.Vengerovskii, Ya.L.Krantsfeld. – M.: Energiya, 1980. – 167p.

9. Normy vyprovuvanya elektrostantsiy COY-H EE 20.302:2007 / K.: Ministerstvo palyva ta energetyky Ukrainy, 2007. – 262p.

МОДЕЛЬ ФУНДАМЕНТА ТУРБОАГРЕГАТУ ПОТУЖНІСТЮ 300 МВТ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТАТИЧНОГО ТА ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕНЬ

Анотація. Створена кінцево-елементна модель фундаменту турбоагрегату на основі програмного комплексу SolidWorks Simulation. За допомогою цієї моделі проведені дослідження впливу статичного та динамічного навантажень на розподіл напружень та переміщень на прикладі типового рамного фундаменту потужністю 300 МВт. Точність моделі підтверджена задачами верифікації, що мають відоме аналітичне рішення. Результати чисельних розрахунків напружено-деформованого стану фундаменту відповідають діючим нормам. Модель може використовуватися в процесі проектувальних робіт з реконструкції турбоагрегатів.

Ключові слова: фундамент, турбоагрегат, коливання, метод скінчених елементів.

MODEL OF TURBINE UNIT'S FOUNDATION OF 300 MW POWER TO INVESTIGATE THE INFLUENCE OF STATIC AND DYNAMIC LOADS

Annotation. The finite-element model of machine turbine unit's foundation is developed with the CAE SolidWorks Simulation. This model was used for the finite element analysis of the influence of static and dynamic loads on the distribution of stresses and displacements of the typical frame machine turbine unit's foundation with power 300 MW. The accuracy of the model is confirmed by verification tasks with known analytical solution. The numerical results of the stress-strain state of the foundation correspond to current standards. The model can be used while designing reconstruction projects of turbine units.

Key words: foundation, turbine unit, oscillations, finite-element method.