

УДК 528.482

DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-41-52

Деформационный мониторинг системы «турбоагрегат – фундамент – основание»

Г. А. Уставич¹, А. А. Шоломицкий¹, И. Ю. Васютинский², А. М. Астапов¹

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: ustavich@mail.ru

Аннотация. Для обеспечения нормальной работы системы «турбоагрегат – фундамент – основание» (ТФО) требуется сохранение в процессе ее эксплуатации центровок роторов линии валопровода (линия роторов), которые были установлены на стадии монтажа прочной части турбоагрегата. Нарушение установленных значений центровок роторов приводит к увеличению вибрации фундамента при работающем турбоагрегате. Эта вибрация передается на линию валопровода и в случае возникновения недопустимых значений приводит к аварийной остановке турбоагрегата. Изменение установленных значений центровок роторов происходит вследствие тепловых деформаций колонн фундамента, которые приводят к изгибу верхнего строения фундамента, а затем к изгибу нижней части цилиндров турбоагрегата. Так как роторы располагаются в нижней части цилиндров, то также изгибаются линии роторов. Определение тепловых деформаций колонн фундамента производится высокоточным геометрическим нивелированием короткими лучами при следующих режимах работы турбоагрегата: «останов – пуск – работа» и «работа – останов». По полученным результатам вертикальных тепловых деформаций колонн фундамента производится расчет изменений значений центровок роторов. От правильной интерпретации полученных результатов тепловых деформаций фундамента и последующего выполнения расчета их параметров зависит величина значений центровок роторов, установленных во время проведения ремонта турбоагрегата. Задачей геодезических измерений является получение суммарной величины тепловых деформаций всей системы ТФО. В настоящее время величина этой деформации определяется только по результатам нивелирования верхней плиты. Поэтому для повышения информативности полученных значений тепловых деформаций колонн фундамента в статье предлагается создавать 3D-модели для каждого цикла измерений в зависимости от режима работы системы ТФО. При создании 3D-модели для последующего расчета центровок учитываются величины тепловых деформаций по оси линии роторов.

Ключевые слова: осадочные марки, верхнее строение фундамента, система «турбоагрегат – фундамент – основание», центровки роторов, линия роторов, 3D-модель, тепловые деформации

Для цитирования:

Уставич Г. А., Шоломицкий А. А., Васютинский И. Ю., Астапов А. М. Деформационный мониторинг системы «турбоагрегат – фундамент – основание» // Вестник СГУГиТ. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 41–52. – DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-3-41-52

Введение

Основным технологическим оборудованием атомных и тепловых электростанций, наряду с реакторами и котлами, являются

быстроходные (скорость вращения ротора 3 000 оборотов в минуту) и тихоходные (скорость вращения ротора 1 500 оборотов в минуту) турбоагрегаты мощностью от 100 до 1 000 МВт. При монтаже и последующей

эксплуатации турбоагрегатов производится целый комплекс работ по обеспечению установленных согласно требованиям завода-изготовителя геометрических параметров.

В связи с тем, что возведение фундамента, монтаж турбоагрегата и его дальнейшая эксплуатация является сложным процессом, необходимо строго выполнять общую технологическую схему проведения геодезических работ различной точности на стадиях проектирования, строительства, монтажа и последующей эксплуатации системы «турбоагрегат – фундамент – основание» (ТФО).

На всех стадиях возведения системы ТФО применяются высокоточные инженерно-геодезические измерения, к которым относятся (СО 153-34.21.322–2003 «Методические указания по организации и проведению наблюдений за осадкой фундаментов и деформаций зданий и сооружений, строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. – М. : Орггрэс, 2003. – 63 с.) [1–3]:

- вынос продольной (линия валопровода) и поперечной (опоры подшипников) осей турбоагрегата на верхнее строение фундамента со средней квадратической ошибкой (СКО) измерений 0,5–1,0 мм;

- определение высотного положения закладных частей под цилиндры и генератор турбоагрегата со СКО измерений 0,2–0,3 мм;

- определение деформационного состояния системы ТФО на этапах возведения фундамента турбоагрегата, его монтажа и последующих режимов эксплуатации со СКО измерений порядка 0,08–0,10 мм.

Одновременно с производством геодезических работ, выполняемых при возведении фундамента и последующего монтажа турбоагрегата, с заданной цикличностью необходимо выполнять высокоточные геодезические измерения, связанные с определением деформационного состояния системы ТФО на следующих основных этапах [4]: при возведении фундамента; при первом пуске и останове турбоагрегата; при режиме «пуск – работа – останов – пуск» (СО 153-34.21.322–2003 «Методические указания по организации и проведению наблюдений за

осадкой фундаментов и деформаций зданий и сооружений, строящихся и эксплуатируемых тепловых электростанций. – М. : Орггрэс, 2003. – 63 с.).

Основная часть

Надежность работы системы ТФО в значительной мере зависит от ее деформационного состояния. Это обусловлено тем, что установленные при монтаже турбоагрегата значения центровок роторов (цепная линия валопровода) с течением времени изменяются по следующим основным причинам:

- деформации (прогиба) нижней плиты фундамента турбоагрегата;

- тепловых деформаций колонн фундамента;

- тепловых деформаций корпуса турбоагрегата.

В связи с этим с целью определения величин этих деформаций необходимо выполнять комплекс высокоточного инженерно-геодезического нивелирования короткими лучами по осадочным маркам, заложенным на разных горизонтах фундамента (нижняя и верхняя плиты, отметка +0,6–0,8 м, колонны) и на нижнем раземе цилиндров (высокого, среднего и нижнего давлений) турбоагрегата.

Высокоточное нивелирование первого цикла по маркам нижней плиты производится сразу после ее возведения, и данный цикл нивелирования принимается за исходный. После установки колонн фундамента и заливки верхней плиты измерения продолжают и при монтаже турбоагрегата. В период монтажа турбоагрегата на нижней части цилиндров (горизонтальном раземе) также устанавливаются осадочные марки. Так как эти марки находятся на уровне линии роторов, то полученные по ним величины деформаций будут в полной мере отражать действительную картину изгиба линии валопровода [5].

Цикличность выполнения измерений на данном этапе возведения системы ТФО дана в табл. 1.

Таблица 1

Последовательность циклов высокоточного нивелирования при возведении фундамента турбоагрегата и его монтаже

Этапы возведения фундамента турбоагрегата	Число циклов измерений и их последовательность
Установка нижней плиты	Один цикл по маркам нижней плиты (исходный цикл нивелирования)
Установка колонн фундамента, заливка верхней плиты	Один цикл измерений в месяц по маркам нижней и верхней плит в течение всего периода возведения. Передача отметки на верхнюю плиту
Установка нижних частей цилиндров и марок на горизонтальный разъем	Один цикл измерений в месяц по маркам нижней и верхней плит, а также горизонтальному разъему в течение всего периода монтажа
Укладка роторов и центровка прочной части турбоагрегата	После завершения укладки роторов и центровки роторов один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента и горизонтальному разъему
Установка верхней части цилиндров	Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента и горизонтальному разъему
Окончательная центровка роторов валопровода	Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента и горизонтальному разъему
Связь элеватором высот отм. +0,8 с верхней плитой	Один цикл измерений по маркам на отм. +0,8 и верхней плите фундамента
Пуск турбоагрегата	За сутки до пуска один цикл измерений по маркам верхней плиты и горизонтальному разъему

После завершения возведения системы ТФО производится высокоточное нивелирование с целью определения деформационного состояния системы ТФО при режимах работы турбоагрегата «пуск – работа – останов – пуск». Полученные результаты геодезических измерений позволяют:

- получить реальное положение в пространстве (деформационное состояние) верхней плиты и линии роторов;
- уточнить значения центровок полумуфт линии роторов и внести их в формуляр паспорта завода-изготовителя;
- при последующем ремонте турбоагрегата выполнить центрирование линии роторов с использованием новых значений центровок;

– с учетом введения уточненных значений центровок уменьшить вибрацию турбоагрегата, а также температуру масла и подшипников, на которые опираются роторы.

Цикличность выполнения высокоточного нивелирования дана в табл. 2.

Таблица 2

Число и последовательность циклов измерений при эксплуатации системы ТФО («пуск – работа – останов – пуск»)

Этапы эксплуатации системы ТФО	Число циклов измерений и их последовательность
Набор вакуума и веса воды в конденсаторах	Один цикл измерений по маркам верхней плиты и маркам горизонтального разъема
Турбоагрегат на валоповороте	Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента
Начало пуска турбоагрегата, плавный набор мощности	Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента
Турбоагрегат в работе	Один цикл измерений по маркам верхней плиты
Турбоагрегат в работе 7–8 суток	Ежедневные циклы измерений по маркам верхней плиты фундамента. По окончании один цикл измерений по маркам горизонтального разъема. Установление характера и величины теплового удлинения (деформаций) колонн фундамента. Вычисление значений центровок роторов по результатам нивелирования
Проектный режим работы турбоагрегата	Один цикл измерений по маркам верхней плиты и маркам горизонтального разъема в квартал
Подготовка турбоагрегата к остановке. Остановка	Один цикл измерений по маркам горизонтального разъема и маркам верхней плиты
Турбоагрегат остановлен 7–8 суток	Ежедневные циклы измерений по маркам верхней плиты фундамента. Цикл измерений по маркам горизонтального разъема. Установление характера и величины сжатия (деформаций) колонн фундамента после его остывания
Турбоагрегат в ремонте	Учет значений центровок роторов по результатам определения тепловых деформаций колонн здания турбины и колонн фундамента турбоагрегата. Один цикл измерений по маркам верхней плиты фундамента и маркам горизонтального разъема за период ремонта
Окончание ремонта. Пуск турбоагрегата	Последовательность и число измерений согласно п. 1–4

Важной задачей при монтаже и последующей эксплуатации системы ТФО является обеспечение своевременного анализа полученных значений деформаций. На данном этапе основной целью высокоточного нивелирования является определение начала стабилизации положения системы ТФО (а значит, и оси валопровода) и выдача рекомендаций по окончательной центровке роторов, а на стадии эксплуатации – слежение за изменением значений этих центровок. Стабилизация тепловых деформаций фундамента происходит на 7–8-е сутки после пуска турбоагрегата. Остывание фундамента зависит от температуры окружающего воздуха в турбинном зале, и в среднем оно происходит через 7–8 суток.

По результатам нивелирования марок верхней плиты определяются:

- величины тепловых деформаций верхнего строения фундамента;
- расчетные величины удлинения колонн, обусловленных качеством их изоляции от расположенных рядом паропроводов;
- разности расчетных и фактических величин тепловых деформаций стоек фундамента;
- величины прогиба верхней плиты;
- значения изменения центровок роторов, обусловленные тепловыми деформациями верхнего строения фундамента и нижней части цилиндров.

По маркам, заложенным на горизонтальном разъеме, определяются величины деформаций линии роторов (валопровода) на уровне горизонтального разъема.

Завершающим этапом производства инженерно-геодезических работ является расчет изменения центровок роторов по геодезическим данным.

Переход от возведения фундамента и монтажа турбоагрегата к постоянной эксплуатации системы ТФО приводит к изменению взаимного положения опор (подшипников) роторов в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Это изменение, в свою очередь, приводит к изменению значений центровок роторов: раскрытию полумуфт по торцу и их взаимному смещению по окружности. Суммарная величина изменения взаимного положения опор роторов в вертикальной плоскости на уровне горизонтального разъема, вследствие влияния различных факторов, выражается формулой

$$\Delta = \delta_{\text{ст}} + \delta_{(t)}^{\phi} + \delta_{(t)}^{\Pi} + \delta_{\text{сез}} + \delta_{\text{дин}}, \quad (1)$$

где $\delta_{\text{ст}}$ – статическая деформация, вызванная общей осадкой фундамента турбоагрегата;

$\delta_{\text{дин}}$ – динамическая (тепловая) деформация колонн фундамента, вызванная различными режимами работы турбоагрегата (валооборот, набор веса воды и вакуума, пуск, рабочий режим, останов и т. д.);

$\delta_{\phi(t)}$ – деформация фундамента, обусловленная изменением температуры в турбинном цехе;

$\delta_{\Pi(t)}$ – деформация нижней части цилиндров, вызванная изменением их температуры при различных режимах работы турбоагрегата;

$\delta_{\text{сез}}$ – сезонные деформации, обусловленные сезонным оттаиванием грунтов и изменением режима вод в непосредственной близости к турбинному залу [6, 7].

Наибольшее влияние на положение опор роторов в вертикальной плоскости оказывает величина $\delta_{\text{дин}}$, которая для высоких колонн фундамента может достигать 4,5–5,8 мм.

Расчет величины $\delta_{\text{дин}}$ производится еще конструкторами на стадии проектирования фундамента. Однако расчетная величина $\delta_{\text{дин}}$ в подавляющем большинстве случаев не согласуется с фактическими из-за следующих основных факторов:

- отклонение фактического расположения паропроводов по отношению к колоннам фундамента от расчетного;
- нарушение теплоизоляции паропроводов во время эксплуатации турбоагрегата.

Фактическая величина изменения длин колонн фундамента определяется с применением элеваторов высот, основанных на применении следующих способов высокоточных инженерно-геодезических измерений [5]:

- геометрического нивелирования и стальной компарированной рулетки (инварной проволокой или лентой);
- высокоточного геометрического нивелирования короткими лучами;
- постоянно подвешенных возле колонн инварных стержней;
- высокоточного тригонометрического нивелирования короткими лучами;
- измерения вертикального расстояния между марками на отм. +0,80 м и марками на верхней плите высокоточным тахеометром.

В настоящее время наиболее широкое применение получили элеваторы высот, основанные на применении высокоточного гео-

метрического нивелирования короткими лучами, при реализации которого связь осадочных марок на отм. +0,60–0,80 и марок на верхней плите производится прокладыванием нивелирного хода с установкой нивелира на расположенные на разной высоте строительные конструкции. Достоинством данного способа является определение величины температурной деформации при различных режимах работы турбоагрегата с СКО порядка 0,25–0,30 мм.

Применение тригонометрического нивелирования короткими лучами при создании элеватора высот обеспечивает измерения превышения на станции в зависимости от влияния внешних условий с СКО порядка 0,05–0,12 мм.

При использовании данного способа высокоточное нивелирование выполняется при двух горизонтах инструмента. Для передачи превышения с отм. +0,60–0,80 на верхнюю плиту потребуется 4–5 станций. Затем после передачи отметки на марку верхней плиты производится нивелирование всех марок верхней плиты с вычислением их высотных отметок. Величина допустимой невязки при передаче превышения на верхнюю плиту вычисляется по формуле

$$m_h = 0,20 \text{ мм} \sqrt{n}, \quad (2)$$

где n – число станций в нивелирном ходе.

После выполнения очередного цикла наблюдений производится расчет изменения значений центровок (раскрытие δ полумуфт) роторов (по торцу полумуфт), полученных по результатам нивелирования, для данного режима работы турбоагрегата (рис. 1) [8, 9].

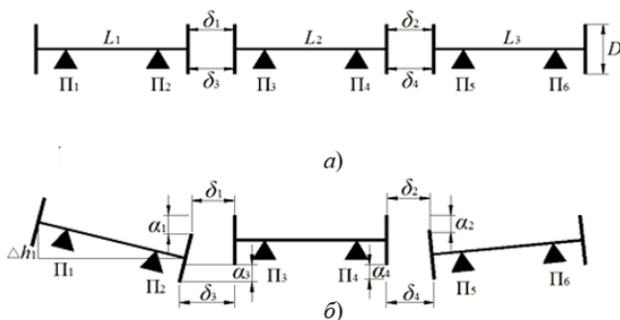


Рис. 1. Схема расположения роторов и подшипников валопровода: а) при отсутствии смещения и раскрытия полумуфт; б) при наличии смещения и раскрытия полумуфт

Установление нормативных значений центровок роторов производится при ремонте турбоагрегата. Величина этих перемещений вычисляется по формулам:

$$\begin{aligned} x_8 &= (\delta_1 - \delta_3) \frac{L-l}{D} + \frac{a_1 - a_3}{2}; \\ x_2 &= (\delta_2 - \delta_4) \frac{L-l}{D} + \frac{a_2 - a_3}{2}; \\ y_8 &= (\delta_1 - \delta_3) \frac{L-l}{D} + \frac{a_1 - a_3}{2}; \\ y_2 &= (\delta_2 - \delta_4) \frac{L-l}{D} + \frac{a_2 - a_3}{2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где L – расстояние от полумуфт до дальнего подшипника;

l – расстояние между осями подшипников;

δ – расстояние между торцами полумуфт;

a_1, a_2, a_3, a_4 – значение центровок (смещение полумуфт) по окружности, полученные при совместных поворотах ротора на 0, 90, 180 и 270°.

Завод-изготовитель задает допускаемое отклонение на раскрытие $\delta_1 - \delta_3$ и $\delta_2 - \delta_4$ полумуфт роторов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, которое должно удовлетворять условию

$$\delta_1 - \delta_2 \leq \pm 0,03 \text{ мм}. \quad (4)$$

Величина раскрытия $\delta_1 - \delta_2$ полумуфт роторов в вертикальной определяется из результатов высокоточного нивелирования по маркам верхней плиты (рис. 2) [10]. В этом случае смещение (превышение) одного конца ротора валопровода относительно другого будет равно

$$h = \frac{\delta \cdot L}{D}, \quad (5)$$

где L – длина ротора;

D – диаметр полумуфты.

На рис. 2 приведена схема расположения марок на верхней плите турбоагрегата мощностью 500 МВт

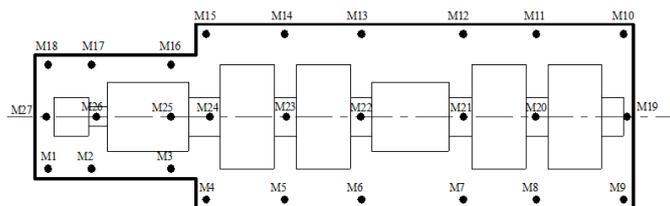


Рис. 2. Схема расположения марок на верхней плите

В табл. 3 приведены результаты тепловых деформаций верхней плиты турбоагрегата мощностью 500 МВт при различных режимах его работы.

Таблица 3

Величины деформаций марок для фундамента турбоагрегата № 4

№ марок	Координаты расположения марок, мм		Величины относительных осадок марок за 10 лет эксплуатации ТА № 4, мм			
	X	Y	ТА № 4 останов	ТА № 4 оставов – пуск (24 часа)	ТА № 4 работа (48 часов)	ТА № 4 работа (5 суток)
1	2	3	4	5	6	7
M1	1 500	500	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
M2	1 500	6 050	1,28 (-2,10)	1,06 (-2,10)	1,38 (-2,10)	1,53 (-2,10)
M3	1 500	12 100	-2,28 (-2,68)	1,14 (-2,68)	1,64 (-2,68)	1,83 (-2,68)
M4	500	15 800	-1,65 (-3,05)	1,35 (-3,05)	1,92 (-3,05)	2,15 (-3,05)
M5	500	23 100	-2,98 (-3,65)	2,08 (-3,65)	2,35 (-3,65)	2,62 (-3,65)
M6	500	30 300	-3,09 (-3,68)	2,88 (-3,68)	3,19 (-3,68)	3,44 (-3,68)
M7	500	39 800	-3,20 (-3,70)	3,00 (-3,70)	3,26 (-3,70)	3,42 (-3,70)
M8	500	46 950	-3,50 (-3,78)	3,10 (-3,78)	3,23 (-3,78)	3,36 (-3,78)
M9	500	54 500	-3,12 (-3,30)	3,02 (-3,30)	3,22 (-3,30)	3,41 (-3,30)
M10	6 300	54 500	-2,83 (-3,18)	2,33 (-3,18)	2,38 (-3,18)	2,67 (-3,18)
M11	6 300	46 900	-2,45 (-3,06)	2,45 (-3,06)	2,66 (-3,06)	2,75 (-3,06)
M12	6 300	39 800	-2,80 (-3,45)	2,90 (-3,45)	3,30 (-3,45)	3,50 (-3,45)
M13	6 300	30 400	-2,60 (-3,00)	3,10 (-3,00)	3,58 (-3,00)	3,73 (-3,00)
M14	6 300	23 050	-2,84 (-3,16)	2,80 (-3,16)	3,24 (-3,16)	3,36 (-3,16)
M15	6 300	15 800	-3,64 (-4,12)	2,16 (-4,12)	2,37 (-4,12)	2,46 (-4,12)
M16	5 300	12 150	-3,48 (-4,56)	1,68 (-4,56)	2,08 (-4,56)	2,23 (-4,56)
M17	5 300	6 050	-4,14 (-5,25)	1,14 (-5,25)	1,35 (-5,25)	2,45 (-5,25)
M18	5 300	500	-4,34 (-5,78)	1,34 (-5,78)	1,23 (-5,78)	1,51 (-5,78)

Примечание. Верхние цифры – верх фундамента; нижние – низ фундамента.

В табл. 4 приведены результаты тепловых деформаций верхней плиты турбоагрегата по его оси (оси валопровода).

Таблица 4

Величины деформаций марок для оси фундамента турбоагрегата № 4

№ марок	Координаты марок, мм		Величины относительных осадок марок за 10 лет, мм			
	X	Y	ТА № 4 останов	ТА № 4 останов – пуск (24 часа)	ТА № 4 работа (48 часов)	ТА № 4 работа (5 суток)
1	2	3	4	5	6	7
M27	3 400	54 500	-2,17 (-2,89)	0,67 (-2,89)	0,62 (-89)	0,76 (-89)
M26	3 400	46 950	2,71 (-3,68)	1,10 (-3,68)	1,36 (-3,68)	1,99 (-3,68)
M25	3 400	39 800	-2,88 (-3,62)	1,41 (-3,62)	2,15 (-3,62)	2,29 (-3,62)
M24	3 400	30 300	-2,64 (-3,58)	2,08 (-3,58)	2,14 (-3,58)	2,19 (-3,58)
M23	3 400	23 100	-2,91 (-3,40)	2,24 (-3,40)	2,80 (-3,40)	2,99 (-3,40)
M22	3 400	15 800	-2,84 (-3,34)	2,99 (-3,34)	3,38 (-3,34)	3,58 (-3,34)
M21	3 400	12 100	-3,00 (-3,58)	2,95 (-3,58)	3,28 (-3,58)	3,46 (-3,58)
M20	3 400	6 050	-2,98 (-3,42)	2,78 (-3,42)	2,95 (-3,42)	3,06 (-3,42)
M19	3 400	500	-2,98 (-3,24)	2,68 (-3,24)	2,80 (-3,24)	3,04 (-3,24)

Примечание. Верхние цифры – верх фундамента; нижние – низ фундамента.

Для наглядного отображения характера тепловых деформаций целесообразно применять трехмерное представление деформированных при нагреве поверхностей фундамента (рис. 3), что позволяет лучше понять характер деформаций. Поверхности деформаций были построены по данным геодезических измерений (см. табл. 3 и 4) в программе SURFER, интерполяция в узлах сетки выполнена методом кригинга, который учитывает закономерности деформаций поверхности.

На рис. 3 (поверхность 1) показано высотное положение точек (см. табл. 3 и 4, нижнее значение в строке, колонка 4) относительно точки 1 для низа фундамента во время останова. Поверхность 2 – это высотное положение точек 1–27 относительно точки 1 верха

фундамента (верхнее значение в табл. 3 и 4, колонка 4) во время останова. На этом рисунке показаны крайние точки M19 и M27, расположенные на оси фундамента. Поверхности 3, 4 и 5 показывают температурные деформации верхней плиты фундамента при нагреве верхней части фундамента после 24, 48 и 120 часов работы, соответственно верхние значения деформаций в табл. 3 и 4, колонки 5, 6 и 7.

По мере работы агрегата температура верхней части фундамента изменяется неравномерно, что приводит к неравномерным температурным деформациям верхней части фундамента. На рис. 3 поверхности 3–4–5 показывают изменение высоты верхней части фундамента по оси агрегата по линии 24–25–26–27 (см. рис. 2) в большей мере, чем по ли-

нии 19-20-21-22 (примерно на 1,0 мм), и деформации возрастают в поперечном направлении от точек 21-22-23. Такие деформации необходимо учитывать при монтаже частей турбоагрегата в его холодном состоянии, чтобы при температурной деформации после начала работы турбины и ее нагреве ось вращения заняла горизонтальное положение.

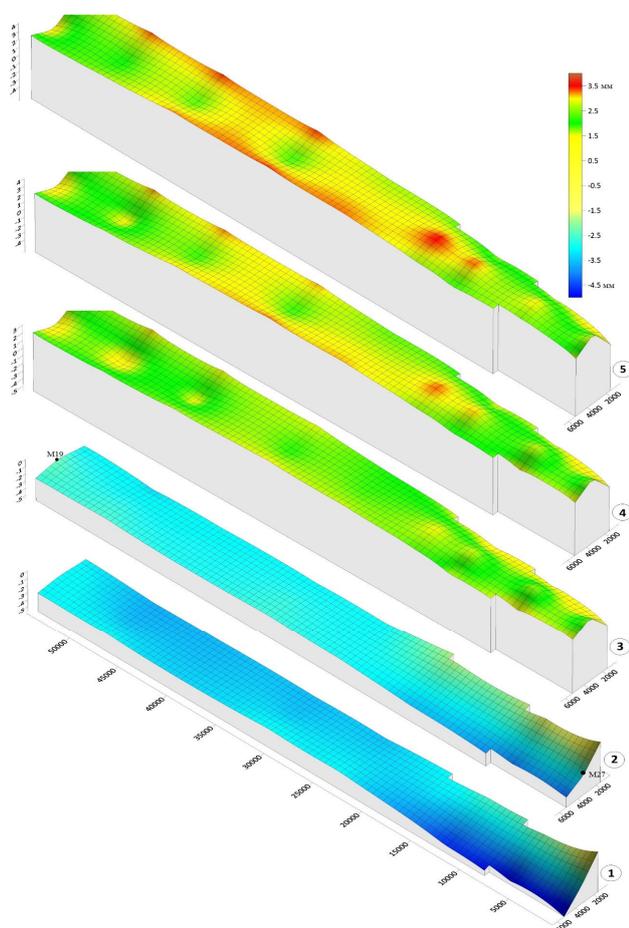


Рис. 3. Поверхности тепловых деформаций фундамента турбоагрегата

При расчете изменения (прогноза) значений центровок роторов валопровода необходимо знать прогнозное значение деформационного состояния системы «турбоагрегат – фундамент – основание» при различных режимах его работы, на которое влияют следующие основные факторы.

1. Качественное проведение строительно-монтажных работ и последующего монтажа турбоагрегата. На деформационное состояние системы «турбоагрегат – фундамент – основание» оказывает влияние каче-

ство возведения фундамента и монтаж турбоагрегата, особенно его проточной части.

Во время проведения этих работ высокоточное нивелирование выполняется с целью определения осадок фундамента в целом и прогиба верхней плиты с целью установления времени, когда их деформации минимальны и не приводят к заметному изменению значений центровок роторов. Результаты высокоточного нивелирования необходимы только для оценки деформационного состояния системы «основание – фундамент».

Остаточное влияние деформации системы «основание – фундамент» в значительной мере зависит и от времени монтажа турбоагрегата, который может производиться в теплый и холодный периоды года. При монтаже турбоагрегата, особенно его проточной части, в теплый период года тепловые деформации фундамента незначительны, и они практически не оказывают влияния на центровку роторов валопровода. Если же монтаж турбоагрегата производится в холодный период года, то разность температур наружного и внутреннего воздуха, а также его непрерывные колебания приводят к изменению положения уже установленных роторов, а значит, и центровок всей линии валопровода.

2. Точность и периодичность выполнения высокоточного геометрического нивелирования. Как показывает практика эксплуатации турбоагрегатов, наибольшие изменения положения линии роторов происходят в первые 5–6 дней после их пуска. Поэтому в период пуска турбоагрегата, а также в первые месяцы его работы необходимо выполнять измерение превышений с СКО, не превышающей 0,08 мм и с периодичностью не реже одного раза в месяц.

3. Продолжительность наблюдений за деформационным состоянием системы «турбоагрегат – фундамент – основание». Этот фактор относится к прогнозированию значений прогиба линии валопровода на последующий период между ремонтами турбоагрегата. За данный период имеется возможность сравнения прогнозного

и фактического значений прогиба линии валопровода, а значит, и с прогнозными и фактическими значениями центровок роторов. Это сравнение покажет правильность выбора прогнозной модели, а также проводимой в данный интервал времени периодичности наблюдений.

4. Правильность выполнения расчета центровок и выдача рекомендаций по установлению их значений в период эксплуатации. Смысл данного фактора заключается в том, что даже при качественно выполненном высокоточном нивелировании могут быть допущены ошибки в расчетах прогнозных значений центровок. В этом случае во время проведения ремонта турбоагрегата на роторах будут установлены ошибочные значения центровок и линия валопровода займет положение, которое не будет соответствовать прогнозному (эксплуатационному) значению. Тогда во время пуска турбоагрегата резко возрастает вибрация, что приведет к его экстренной остановке с последующей перецентровкой роторов валопровода.

5. Принятие в полной или частичной мере службой эксплуатации станции рекомендаций по установлению новых значений центровок, выданных геодезической организацией на основе полученных данных из высокоточного геометрического нивелирования. При ремонте турбоагрегата центрирование роторов валопровода может выполняться тремя вариантами:

– с использованием только рекомендаций, выданных заводом-изготовителем;

– с частичным использованием рекомендаций, полученных на основе результатов геодезических измерений и выданных в виде прогнозных значений на ближайшие 2–3 года работы турбоагрегата;

– с использованием в полном объеме рекомендаций, полученных на основе результатов геодезических измерений.

Здесь необходимо указать на следующее важное обстоятельство, которое заключается в том, что служба эксплуатации при центрировании роторов не всегда принимает во внимание рекомендуемые прогнозные значения центровок, которые получены по геодезическим данным. В подавляющем большинстве

случаев это относится к тем электростанциям, на которых должным образом не поставлены геодезические работы по определению деформационного состояния системы «турбоагрегат – фундамент – основание». На тех электростанциях, где на должном уровне поставлены высокоточные геодезические измерения, учет прогнозных значений центровок производится при ремонте каждого турбоагрегата.

Выводы

Результаты высокоточного геометрического нивелирования с рекомендуемой цикличностью за деформационным состоянием системы ТФО в части тепловой составляющей нижней плиты фундамента, его колонн, а также верхней плиты позволяют уточнить заводские значения центровок роторов. При этом построенная по результатам геодезических измерений 3D-модель системы ТФО позволяет получить результирующее значение тепловой деформации, которая будет отражать деформационное состояние верхней плиты турбоагрегата, а затем и всей линии валопровода. Правильный расчет и последующий учет этих деформаций позволяет турбоагрегату работать в нормальном эксплуатационном режиме без значительного, а порой и недопустимого увеличения вибрации роторов. Если не учитывать эти деформации и не изменять значения центровок роторов, установленные заводом-изготовителем, то происходит недопустимая величина раскрытия полумуфта. Вследствие этого повышается вибрация всей этой системы в целом и увеличивается температура подшипников, на которые опираются роторы валопровода. Учет значений изменения центровок роторов при проведении их перецентровки позволяет работать турбоагрегату в нормальном режиме, а также увеличить срок работы турбоагрегата без проведения их ремонтов, т. е. увеличить межремонтный период, что приведет к значительному увеличению выработки электроэнергии. Внеплановый ремонт турбоагрегата мощностью 500 МВт, вызванный изменением значений центровок роторов, занимает 7–8 суток,

а за сутки турбоагрегат вырабатывает 12 000 000 кВт/часов.

Другим достоинством построения в каждом цикле измерений 3D-модели деформации системы ТФО является возможность обнаружения мест некачественной теплоизоляции

паропроводов турбоагрегата, что приводит к неравномерному нагреванию колонн фундамента, а следовательно, к недопустимому раскрытию полумуфт валопровода. Это позволяет исправить места некачественной теплоизоляции колонн фундамента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дон Э. А., Осоловский В. П. Расцентровка подшипников турбоагрегатов. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 192 с.
2. Уставич Г. А., Жуков Б. Н., Малиновский А. Л. Исследование деформаций верхнего строения фундаментов турбоагрегатов // Геодезия и картография. – 1978. – № 9. – С. 34–37.
3. Перепечкин А. А. Определение деформаций верхней плиты турбоагрегатах мощностью 800 МВт Славянской ГРЭС. Электрические станции. – 1974. – № 9. – С. 50–52.
4. Уставич Г. А., Рябова Н. М., Сальников В. Г. Технологическая схема геодезических работ при монтаже турбоагрегатов // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № S4. – С. 45–51. – EDN SXWWCH.
5. Уставич Г. А., Скрипников В. А., Рябова Н. М., Скрипникова М. А. Особенности применения элеваторов высот для определения тепловых деформаций системы «турбоагрегат-фундамент-основание» // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Вып. 4. – С. 110–127. – EDN YRJGAX.
6. Беспалов Ю. И., Мирошниченко С. Г. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами // Геодезия и картография. – 2009. – № 3. – С. 12–13. – EDN YRJGAX.
7. Беспалов Ю. И., Дьяконов Ю. П., Терещенко Т. Ю. Наблюдение за осадками зданий и сооружений способом тригонометрического нивелирования // Геодезия и картография. – 2010. – № 8. – С. 8–10. – EDN SNGVFB.
8. Никонов А. В. Исследование влияния вертикальной рефракции на результаты тригонометрического нивелирования короткими лучами способом из середины // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 1. – С. 28–34. – EDN VUAWSX.
9. Никонов А. В. Исследование точности тригонометрического нивелирования способом из середины с применением электронных тахеометров // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 26–35. – EDN QIYSJJ.
10. Уставич Г. А., Рахымбердина М. Е., Никонов А. В., Бабасов С. А. Разработка и совершенствование технологии инженерно-геодезического нивелирования тригонометрическим способом // Геодезия и картография. – 2013. – № 6. – С. 17–22. – EDN SERMNF.

Об авторах

Георгий Афанасьевич Уставич – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Андрей Аркадьевич Шоломицкий – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Игорь Юрьевич Васютинский – доктор технических наук, профессор кафедры инженерной геодезии.

Андрей Михайлович Астапов – старший преподаватель кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Получено 06.06.2024

© Г. А. Уставич, А. А. Шоломицкий, И. Ю. Васютинский, А. М. Астапов, 2025

Improvement of the method of deformation monitoring of the “turbo unit-foundation-base” system

G. A. Ustavich^{1✉}, A. A. Sholomitsky¹, I. Y. Vasyutinsky², A. M. Astapov¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: ystavich@mail.ru

Abstract. To ensure normal operation of the “turbine unit-foundation-base” (TFO) system, it is necessary to maintain during its operation the alignments of the rotors of the shaft line (rotor line), which were installed at the stage of installation of the flow part of the turbine unit. Violation of the established rotor alignment values leads to an increase in vibration of the foundation when the turbine unit is operating. This vibration is transmitted to the shaft line and, if its values are unacceptable, leads to an emergency stop of the turbine unit. A change in the set values of the rotor alignments occurs due to thermal deformations of the foundation columns, which lead to bending of the upper structure of the foundation, and then to bending of the lower part of the turbine unit cylinders. Since the rotors are located at the bottom of the cylinders, the lines of the rotors also bend. Determination of thermal deformations of foundation columns is carried out by high-precision geometric leveling with short beams under the following operating modes of the turbine unit: “stop-start-work” and “work-stop”. Based on the obtained results of vertical thermal deformations of the foundation columns, changes in the rotor alignment values are calculated. The value of the rotor alignment values established during the repair of the turbine unit depends on the correct interpretation of the obtained results of thermal deformations of the foundation and the subsequent calculation of their parameters. To increase the information content of the obtained values of thermal deformations of foundation columns, the article proposes to create 3D models for each measurement cycle depending on the operating mode of the TFO system. When creating a 3D model for subsequent calculation of alignments, the magnitude of thermal deformations along the axis of the rotor line is taken into account.

Keywords: sedimentary marks, upper structure of the foundation, “turbine unit-foundation-foundation” system, rotor alignments, rotor line, 3D model, thermal deformations

REFERENCES

1. Don, E. A., & Osolovsky, V. P. (1994). *Rastsentrovka podshipnikov turboagregatov [Misalignment of turbine unit bearings.]*. Moscow: Energoatomizdat,. 192 p. [in Russian].
2. Ustavich, G. A., Zhukov B. N., & Malinovsky A. L. (1978). Study of deformations of the upper structure of turbine unit foundations. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*. 9, 34 – 37 [in Russian].
3. Perepechkin, A. A. (1974). Determination of deformations of the upper plate of turbine units with a capacity of 800 MW at Slavyanskaya State District Power Plant. *Elektricheskie stantsii [Electrical stations]*. 9, 50–52 [in Russian].
4. Ustavich, G. A., Ryabova, N. M., & Salnikov, V. G. (2014). Technological diagram of geodetic work during the installation of turbine units. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography]*. S4, 45–51. EDN SXWWCH [in Russian].
5. Ustavich, G. A., Skripnikov, V. A., Ryabova, N. M., & Skripnikova, M. A. (2018). Features of the use of elevators to determine thermal deformations of the “turbine unit-foundation-foundation” system. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SGUGiT]*. 4, 110–127. EDN YRJGAX [in Russian].

6. Bespalov, Yu. I. (2009). Study of the accuracy of measuring elevations with electronic tachometers. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*. 3, 12–13. EDN YRJGAX [in Russian].

7. Bespalov, Yu. I., Dyakonov, L. P., Tereshchenko, T. Yu. (2010). Observation of settlements of buildings and structures using trigonometric leveling. *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*. 8, 8–10. EDN SNGVFB [in Russian].

8. Nikonov, A. V. (2014). Study of the influence of vertical refraction on the results of trigonometric leveling with short rays using the method from the middle. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography]*. 1, 28–34. EDN VUAWSX [in Russian].

9. Nikonov, A. V. (2013) Study of the accuracy of trigonometric leveling using the method from the middle using electronic total stations. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SGUGiT]* 2 (22), 26–35. EDN QIYSJJ [in Russian].

10. Ustavich, G. A. (2013) Development and improvement of the technology of engineering-geodetic leveling using the trigonometric method *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography]*. 6, 17–22. EDN SERMNF [in Russian].

Author details

Georgiy A. Ustavich – D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Andrej A. Sholomitsky – D. Sc., Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Igor Y. Vasyutinsky – D. Sc., Professor, Department of Geodesy.

Andrej M. Astapov – Assistant, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Received 06.06.2024

© *G. A. Ustavich, A. A. Sholomitsky, I. Y. Vasyutinsky, A. M. Astapov, 2025*