

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОР И ПОДАТЛИВОСТИ МАСЛЯНОГО СЛОЯ НА ПАРАМЕТРЫ КОРРЕКЦИИ ЦЕНТРОВОК РОТОРОВ

А.И. Куменко, Н.Ю. Кузьминых, А.В. Тимин

### *Аннотация.*

*В работе выполнен анализ влияния податливости опор на чувствительность опоры к расцентровкам. Расчеты выполнены на примере системы «ротор генератора – ротор якоря возбуждателя» т/а 1000 МВт с весами роторов 1200 и 250 кН соответственно с рабочей частотой вращения 1500 об/мин. Показано, что чем выше статическая податливость опор, тем менее чувствительна система роторов к расцентровкам.*

*Очевидно, что особенно негативное влияние могут оказывать случаи, когда смежные опоры обладают разной статической податливостью. На практике при центровках это, как правило не учитывается. Для оценки влияния взаимных смещений опор на дополнительные к номинальным реакции и для исследования статической нелинейности масляного слоя расчеты были выполнены при изменении взаимных смещений  $\pm 0,75$  мм. Расчеты показали, что при податливостях опор порядка 0,2 мкм/кН (примерно 2 мкм/Т) и ниже влиянием податливости можно пренебречь при взаимном смещении опор № 12 - 13 до 0,5 мм.*

*Нелинейные эффекты в масляном слое в процессе мониторинга расцентровок в основном наблюдаются при взаимном смещении опор более 0.5 мм. Путем моделирования показано, что методика определения расцентровок опор работает эффективно при любых отклонениях в центровках. При необходимости при значительных смещениях опор для снижения погрешностей расчета корректирующих центровок, вызванных неопределенностью податливостей и нелинейностью, необходимо второе приближение. Все расчеты выполнены с использованием оригинального авторского программного обеспечения.*

**Keywords:** *shafting line, support, turbine unit, oil film, bearings, static and dynamics properties, misalignments of supports, alignments of the rotors, stiffness matrix, the shaft sensors, monitoring of technical condition, the compliance supports.*

*\*) This work has been carried out with the financial support of the RSF according to Agreement No. 15-19-00267 dated 19 May, 2015.*

### **Влияние статической податливости собственно опор на коэффициенты матрицы жесткости валопровода и корректирующие смещения опор.**

В процессе мониторинга расцентровок опор [1,2] необходимо решить целый комплекс задач, в том числе определить реакции опор валопровода и их отклонения от номинальных, а так же матрицу жесткости валопровода.

Матрица жесткости валопровода  $[G]$  связывает искомый вектор отклонений от идеального положения центров расточек подшипников  $\Delta\bar{h}$  (расцентровки опор) и вектор дополнительных поперечных статических сил  $\Delta\bar{Q} = \bar{Q}_\Phi - \bar{Q}_{НОМ}$  в этих опорах [1]:

$$\Delta\bar{Q} = [G]\Delta\bar{h}. \quad (1)$$

Размеры матрицы  $[G]$   $2n * 2n$  и векторов  $\Delta\bar{Q}$  и  $\Delta\bar{h}$   $2n$  элементов, где  $n$  – число опор.

Коэффициенты матрицы жесткости  $[G]$  определяются следующими параметрами системы. Геометрией и физическими свойствами валопровода, геометрией и физическими свойствами подшипников скольжения, частотой вращения, величинами статических податливостей опор. В конечном счете, зная текущие всплытия шеек роторов и

коэффициенты матрицы жесткости валопровода определяются текущие расцентровки опор и искомые расцентровки по полумуфтам роторов валопровода. Однако при расчете матрицы жесткости статические податливости опор роторов остаются неизвестными.

Как известно, для головных турбоагрегатов большой мощности обязательно выполняются динамические испытания опор, а полученные динамические податливости опор и элементов фундамента нормируются для крупных турбоагрегатов в пределах 0,2-1,0 мкм/кН. В то же время статическая податливость опор турбоагрегата, которая влияет на центровки роторов при смещении смежных опор, остается неизвестной и не подлежит нормированию ни в отраслевых, ни в государственных нормативных актах. Очевидно, что особенно негативное влияние могут оказать случаи, когда смежные опоры обладают разной статической податливостью. На практике при центровках это, как правило не учитывается. Статическую податливость опор важно контролировать и учитывать в системах мониторинга и контроля расцентровок опор при оценке величин расцентровок в процессе эксплуатации, поскольку повышенная статическая податливость влияет на динамические свойства роторов в валопроводе двояко. С одной стороны меняет отстройку роторов от резонансов и влияет на обратную вибрацию, с другой перераспределяет в лучшую сторону нагрузки в опорах, но при этом провоцирует задевания роторов о статорные элементы при значительных расцентровках. Для каждого агрегата имеет место своя статическая податливость опор и свое соотношение жесткости роторов, опор и масляной пленки.

Для анализа влияния податливостей на реакции опор крупного турбоагрегата выполнена серия расчетов с использованием разработанного авторами модернизированного оригинального программного обеспечения [1]. Данный комплекс позволяет решить целый набор связанных задач, в том числе:

- Статические и динамические свойства масляного слоя подшипников, заданные в области возможных перемещений [3,4];
- Решить прямую задачу – определить реакции опор, линию валопровода и другие статические характеристики опорной системы от весовых нагрузок при их произвольных расцентровках опор при известных внешних нагрузках на роторы;
- Решить обратную задачу – определить расцентровки опор или корректирующие центровки роторов по полумуфтам [1,2] и др.

Анализ выполнен на примере системы роторов «ротор генератора-ротор возбудителя» т/а 1000 МВт с весами роторов 1200 и 250 кН соответственно с рабочей частотой вращения 1500 об/мин.

В качестве базовых значений для рассматриваемого объекта величины статических податливостей приняты 0,2 и 0,5 мкм/кН для опор генератора и возбудителя соответственно аналогично динамическим податливостям. В общем случае матрица жесткости для рассматриваемого случая имеет размерность 8\*8. При расчете для краткости только в вертикальном направлении размер матрицы уменьшается в два раза. В табл. 1 а,б,с приведены матрицы жесткости валопровода даны только для вертикального направления при трех значениях статических податливостей опор.

Физический смысл матриц жесткости валопровода определяется выражением (1) и заключается в том, что для каждой опоры турбоагрегата, для идеального валопровода, не имеющего расцентровок опор, последовательно задаются единичные перемещения сначала в горизонтальном, затем в вертикальном направлениях и для каждой опоры методом решения прямой задачи определяются дополнительные реакции, вызванные этими возмущениями. Величина возмущения принимается порядка 0,1-0,4 мм, в пределах которых практически соблюдается линейность зависимостей дополнительных реакций от смещений. Затем коэффициенты матрицы приводятся для удобства к величинам единичных перемещений в 1 мм.

Очевидно, что коэффициенты матрицы жесткости валопровода падают с увеличением податливости опор, однако заметное падение возникает при податливости выше 0,5 мкм/кН.

Из этого следует, что влиянием податливости собственно опор при расчете корректирующих центровок для данной части системы можно пренебречь.

Для получения перемещений опор из уравнения (1) в вертикальной плоскости с учетом граничных условий остается два уравнения. Обратные матрицы для трех случаев податливости приведены в табл. 2. Из них видно, что коэффициенты обратной матрицы слабо зависят от податливостей собственно опор в пределах 0-0,5 мкм/кН. Данные расчеты показывают, что статическая податливость масляного слоя значительно больше податливости опор.

**Табл. 1.**

Матрицы статической жесткости валопровода для системы роторов «ротор генератора-ротор возбuditеля» т/а 1000 МВт. Размерность элементов матриц - кН/мм.

а) Податливость  $p=0.0$  мкм/кН.

	dy1	dy2	dy3	dy4
ry1	6.138	-47.275	39.712	1.260
ry2	-45.141	439.011	-410.298	18.121
ry3	37.785	-411.912	400.963	-28.490
ry4	1.217	20.177	-30.377	9.108

б) Податливость  $p=0.2$  мкм/кН.

	dy1	dy2	dy3	dy4
ry1	6.737	-48.003	40.760	0.630
ry2	-51.772	450.381	-424.641	24.742
ry3	44.423	-424.356	416.196	-34.999
ry4	0.613	21.978	-32.315	9.627

с) Податливость  $p=1.0$  мкм/кН.

	dy1	dy2	dy3	dy4
ry1	4.584	-31.294	24.867	1.793
ry2	-30.984	289.873	-271.455	13.016
ry3	24.608	-271.697	270.310	-23.638
ry4	1.791	13.119	-23.722	8.829

**Табл. 2.**

Матрицы, обратные к усеченным матрицам жесткости (только для вертикального направления) размерность элементов матриц - мм/кН.

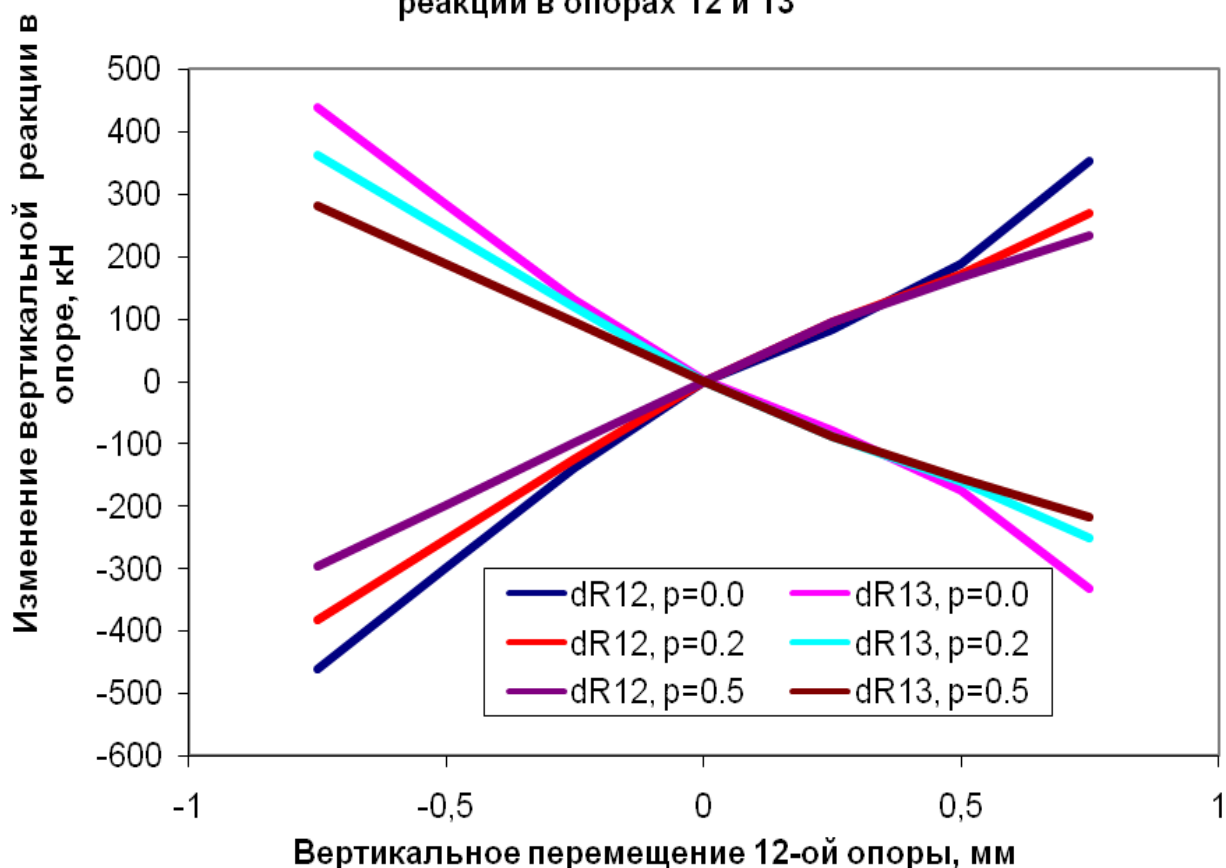
Варианты податливости опор					
p=0.0 мм/кН.		p=0.2 мм/кН.		p=0.5 мм/кН.	
5.71E-02	5.84E-02	5.74E-02	5.86E-02	5.87E-02	5.90E-02
5.87E-02	6.25E-02	5.86E-02	6.21E-02	5.90E-02	6.30E-02

Отсюда следует вывод, что влияние статической податливости собственно опор на величины искомых расцентровок опор при ее изменении в пределах 0,0 - 0,5 мкм/кН незначительно.

**Влияние нелинейности масляного слоя на коэффициенты матрицы жесткости валопровода и величины искомых расцентровок опор.**

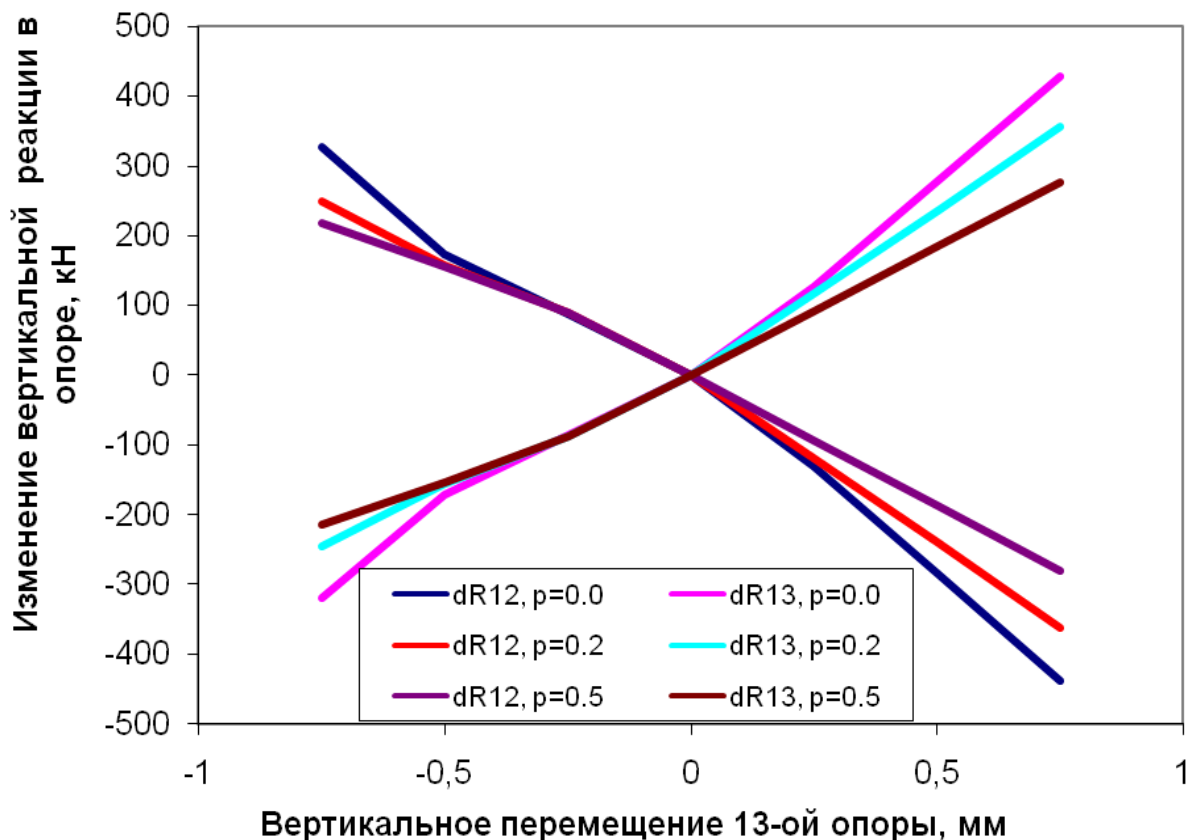
Для оценки влияния нелинейности при взаимных смещениях опор выполнены расчеты с их взаимным смещением в пределах  $\pm 0,75$  мм при нескольких значениях податливостей опор соответственно 0,0; 0,2 и 0,5 в мм/кН. Результаты расчетов представлены на рис. 1 и рис. 2. Из расчетов видно, что в пределах взаимного смещения опор  $\pm 0,25$  мм обеспечивается практически линейность между взаимным смещением и дополнительными нагрузками. При этом отличие в дополнительных нагрузках из-за варьирования податливостей опор в пределах указанных смещений невелико, что подтверждает ранее сделанные выводы, что влиянием статической податливости опор на коррекцию положения опор и, соответственно, на центровки роторов по полумуфтам, так же невелико.

**Влияние вертикального перемещения 12-ой опоры на реакции в опорах 12 и 13**



**Рис.1.**

**Влияние вертикального перемещения 13-ой опоры на реакции в опорах 12 и 13**



**Рис. 2.**

Нелинейность опор начинает сказываться при взаимных смещениях опор более 0,5 мм. В этом случае точность решения обратной задачи [1,2] не ухудшается, так как мы ищем положение опор, приближенное к идеальному, при котором коэффициенты матрицы жесткости практически линейные, а точность регистрации отклонения вала в расточке подшипника улучшается, так как смещения больше. В крайнем случае, при недостаточности первого приближения из-за ошибок, связанных с отклонением фактических коэффициентов жесткости от линейных, можно выполнить вторую итерацию и даже третью, что бы убедиться, что решение корректно.

**Выводы.**

1. Выполнен анализ влияния податливости собственно опоры выполнен на примере системы роторов «ротор генератора-ротор возбудителя» т/а 1000 МВт с весами роторов 1200 и 250 кН соответственно с рабочей частотой вращения 1500 об/мин.
2. Для рассмотренного объекта показано, что при изменении взаимного положения опор в пределах 0,5 мм обеспечивается практически линейная связь между перемещениями и дополнительными к номинальным реакциями.
3. При расчетах и мониторинге соответствующих расцентровок опор для податливостей опор порядка 0,2 мкм/кН и ниже при взаимном смещении опор № 12 - 13 до 0,5 мм их влиянием можно пренебречь.
4. Нелинейность статической податливости масляного слоя при расчетах расцентровок опор при изменении взаимных смещений  $\pm 0,25$  мм может не учитываться.
5. Путем моделирования показано, что методика определения расцентровок опор работает эффективно при любых отклонениях в центровках. При необходимости при значительных

смещениях опор для снижения погрешностей расчета корректирующих центровок, вызванных неопределенностью податливостей и нелинейностью, необходимо второе приближение.

#### **Литература.**

1. А. И. Куменко\*, В. Н. Костюков, Н. Ю. Кузьминых, и др. Разработка элементов системы мониторинга технического состояния турбоагрегатов ТЭС и АЭС // Теплоэнергетика, 2017, № 8, с. 1–10
2. А. И. Куменко\*, В. Н. Костюков, Н. Ю. Кузьминых, и др. Использование датчиков положения вала для моделирования расцентровок опор валопроводов турбоагрегатов // Теплоэнергетика, 2017, № 9, с. 1–8
3. Куменко А.И., Кузьминых Н.Ю., Костюков В.Н. Моделирование статических характеристик подшипников скольжения для крупных энергетических турбоагрегатов // Надежность и безопасность энергетики. 2016. № 1 (32). С. 24–29.
4. Куменко А.И., Кузьминых Н.Ю., Костюков В.Н. Расчет и интерполяция характеристик в области возможных перемещений шеек роторов в опорных подшипниках скольжения крупных энергетических турбоагрегатов // Теплоэнергетика. – 2016. № 10. Стр. 23-30.

**Куменко Александр Иванович**, д.т.н.,  
начальник центра мониторинга и технического диагностирования в энергетике  
Scientific Production Company DYNAMICS.  
e-mail: 1949kai@mail.ru