

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА УРАВНОВЕШИВАНИЯ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

А. И. Шкляр, А. А. Гришин, Г. В. Минеев, М. В. Великович - ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК»

Одним из направлений производственной деятельности ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» является ремонт роторов паровых турбин, в ходе которого должно быть обеспечено высокое качество уравнивания роторов.

Многоплоскостная высокочастотная балансировка (ВЧБ) роторов в условиях уникальных вакуумных разгонно–балансируемых стендов (РБС), как правило, обеспечивает надлежащее качество уравнивания. Однако большинство специализированных энергоремонтных предприятий России не имеет технических возможностей для ВЧБ на РБС и использует низкочастотные (тихоходные) балансирующие станки, позволяющие выполнять только низкочастотную балансировку (НЧБ) роторов паровых турбин. Обычно НЧБ производится по стандартной методике с использованием двух плоскостей коррекции дисбаланса, что не всегда обеспечивает эффективное уравнивание ротора в диапазоне частот вращения от нуля до рабочих оборотов.

Проблема повышения качества уравнивания роторов в ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» решается на основе комплексного подхода с учетом следующих основных факторов:

- 1) В ходе проводимых ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» ремонтов и модернизаций роторов СД и НД с насадными деталями, как правило, выполняется частичная или полная разборка роторов, замена облопачивания, замена насадных дисков, что кардинально изменяет уровни, характер неуравновешенностей роторов и определяет необходимость их последующей многоплоскостной балансировки.
- 2) Методика уравнивания должна быть ориентирована на использование низкочастотных балансирующих станков, имеющихся как на собственной производственной базе, так и на многих тепловых электрических станциях (ТЭС).
- 3) Большинство цельнокованых роторов ВД паровых турбин являются квазижесткими. Они могут быть эффективно уравновешены на низкочастотных балансирующих станках по стандартной методике НЧБ [1].
- 4) Большинство гибких роторов СД и НД с насадными деталями, а также роторы ВД с развитыми насадными полумуфтами в сборе не могут быть гарантированно уравновешены с высокой эффективностью по стандартной методике НЧБ [1].

Таким образом, актуальным является повышение эффективности НЧБ гибких роторов паровых турбин с насадными деталями и достижение качества их уравнивания, приближающегося к ВЧБ роторов в РБС. Для достижения указанной цели концепция повышения качества уравнивания предусматривает решение комплекса следующих задач:

- минимизация дисбаланса насадных деталей;
- минимизация дисбаланса цельнокованой части ротора (вала);
- обеспечение качества сборки ротора и стабильности положения насадных деталей;
- максимально точное определение мест расположения привнесенного при сборке дисбаланса и установка корректирующих грузов в плоскости, максимально приближенные к источникам дисбаланса;
- обеспечение точности измерений, выполняемых в процессе сборки, контроля и балансировки.

1. Снижение уровня дисбаланса насадных деталей

Насадные втулки и диски после их окончательной механической обработки с соблюдением требований чертежа, как правило, имеют незначительный дисбаланс. Увеличение дисбаланса

рабочих колес зачастую возникает при облопачивании за счет влияния статических моментов лопаток, нескомпенсированных порядком их расстановки. В ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» проблема минимизации дисбаланса облопаченных дисков решается путем использования комплектов оборудования собственной разработки (рис. 1), предназначенных для высокоточного определения статического момента рабочих лопаток на радиусе их установки в турбине, а также применением программного обеспечения, оптимизирующего расстановку лопаток на рабочем колесе. Способ определения центра тяжести рабочих лопаток и алгоритм оптимизации их расстановки, основанный на итерационном методе, защищены патентом и свидетельством РФ.

2. Снижение уровня дисбаланса цельнокованой части ротора

Очевидно, что дисбаланс цельнокованой части (вала) ротора чаще всего зависит от следующих факторов:

- наличие и величина остаточного прогиба (погиба) вала;
- уровни дисбаланса облопаченных цельнокованых дисков (если таковые имеются).

Исправление остаточного прогиба валов, в том числе цельнокованых роторов ВД, в условиях производственной базы ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» производится либо переточкой, либо термической правкой ротора с последующей механической обработкой. Вариант исправления погиба вала выбирается с учетом величины и характера погиба. В любом случае предварительно производится термический отпуск вала для стабилизации и снижения уровней внутренних напряжений. Термическая обработка (ТО) и релаксационная правка роторов с остаточным прогибом реализуется по известным, хорошо зарекомендовавшим себя методикам, изложенным в [3], [4].

Перед началом работ в обязательном порядке производится неразрушающий контроль ротора, включающий визуальный осмотр, капиллярную либо магнитопорошковую дефектоскопию наружных поверхностей вала, контроль осевого канала с проведением ультразвуковой и токовихревой дефектоскопии. После окончания работ по правке выполняется повторный неразрушающий контроль вала.

Объемная ТО и релаксационная правка роторов на производственной базе ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» выполняется в стационарной секционной электрической печи собственной разработки и изготовления, оснащенной гидравлическим нажимным устройством. Секционная печь с электрическим приводом для вращения вала с частотой 2 – 306/мин укомплектована опорными стойками с высокоточными роликовыми опорами. Установка позволяет производить нагрев валов до температуры более 700°С. Система термоконтроля и управления позволяет регулировать температуру в каждой секции печи с точностью порядка ($\pm$) 7°С. В процессе правки нажимное усилие, приложенное к ротору, воспринимается специальными опорными призмами стоек. Замеры радиальных биений и статического прогиба вала в секционной печи производятся часовыми индикаторами через специальные удлинители. Дополнительный контроль биений шеек ротора позволяет учесть погрешности, привносимые роликовыми опорами, и рассчитать истинные величины биений вала. Объемный предварительный отпуск, термическая правка и окончательный отпуск вала в секционной печи, как правило, производятся за один прием, без промежуточного охлаждения. Объемный окончательный отпуск вала после его правки, выполняемый в секционной печи, практически полностью стабилизирует внутренние напряжения и гарантирует неизменность геометрических характеристик ротора в последующей эксплуатации. Для проведения местной ТО и релаксационной правки валов индукционным нагревом используется набор жестких секционных разборных индукторов с воздушным охлаждением собственного изготовления в комплекте с силовой высокочастотной установкой индукционного нагрева. Оборудование для индукционной ТО и правки также включает в себя специальные облегченные роликовые стойки, малогабаритный гидропривод с плавной регулировкой частоты вращения, силовые удерживающие хомуты и нажимное приспособление (гидравлический домкрат). Установка монтируется на жесткой опорной плите или на специальной раме, что позволяет использовать ее в условиях электростанции.

Типовой технологический процесс термической правки роторов предусматривает расчетную оценку термонапряженного состояния ротора. Перед проведением расчета определяется реальное распределение температур на поверхности участков ротора по результатам его пробного нагрева с заданным темпом роста температур. Расчет термонапряженного состояния ротора (нестационарная задача) производится с использованием современных программных пакетов, основанных на применении метода конечных элементов. По результатам расчета определяется оптимальный темп нагрева и остывания ротора, время выдержки для полной

стабилизации температурного состояния ротора, а также максимально допустимые усилия воздействия на ротор в ходе правки.

После окончания работ по исправлению остаточного прогиба вала его дисбаланс компенсируется в ходе балансировки, порядок проведения которой рассмотрен ниже.

3. Обеспечение качества сборки ротора и стабильности положения насадных деталей

В зависимости от типа ротора с насадными деталями, его сборка производится в горизонтальном или в вертикальном положении. Вертикальная сборка предпочтительна для роторов с массивными насадными деталями, имеющими большую площадь контакта посадочной поверхности. На производственной базе ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» имеются мобильные комплекты оснастки, обеспечивающие проведение сборки роторов любым из указанных способов. В ходе сборки ротора нагрев насадных деталей ведется специальными горелками либо индукционной установкой собственного изготовления. Температурный контроль в процессе нагрева выполняется при помощи электронного контактного термометра. Кроме того, инструментально контролируется увеличение посадочных диаметров нагреваемых деталей. Для защиты вала ротора от нагрева применяется водяное охлаждение центрального канала.

После частичной или полной сборки ротора и его полного остывания производится снятие подробного паспорта радиальных и торцевых биений вала и насадных деталей. Биения измеряются от базовых поверхностей шеек ротора. Критериями качества сборки ротора при этом являются отсутствие значимых изменений биений вала до и после сборки, а также соответствие величин биений вала и насадных деталей требованиям сборочного чертежа.

Известно, что после сборки роторов на заводах–изготовителях в условиях РБС производятся разгоны роторов до частот вращения, значительно превышающих рабочую частоту. В ходе разгона частично или полностью снимаются натяги по посадочным диаметрам насадных деталей, что позволяет стабилизировать положение этих деталей на посадочных поверхностях вала ротора и повышает эффективность последующей балансировки.

Для повышения качества сборки в условиях специализированной ремонтной организации, не имеющей РБС, типовой технологический процесс частичной или полной сборки ротора был дополнен операциями, обеспечивающими стабилизацию положения насадных дисков без выполнения разгона ротора. При медленном вращении ротора в опорах низкочастотного балансировочного станка производится нагрев насадных деталей до температуры, близкой к «освобождающей» от посадочного натяга, с контролем температуры при помощи электронного контактного термометра и пирометра. Затем нагрев прекращается, и частота вращения ротора увеличивается до 200 – 400 об/мин. Происходит снятие натяга посадок и последующая стабилизация положения насадных деталей на посадочных поверхностях вала в ходе остывания во вращении. После полного остывания производится повторный контроль биений вала и насадных деталей, а также оценка стабилизации их положения. Как правило, данная операция в первую очередь выполняется для тех насадных деталей, при монтаже которых не удалось обеспечить соответствия величин их биений требованиям чертежа. Метод снятия натяга насадных деталей за счет их температурного расширения в сочетании с воздействием центробежной силы получил условное название «имитация разгона ротора».

4. Низкочастотная многоплоскостная балансировка ротора

Для проведения низкочастотных балансировок в условиях производственной базы используется универсальный токарно– балансировочный станок маятникового типа собственного изготовления. Балансировочные стойки станка выполнены по традиционной схеме и оснащены самоустанавливающимися вкладышами. Станок имеет комбинированный привод, обеспечивающий вращение ротора с частотой 4об/мин и его разгон до 250 – 500об/мин. Главный асинхронный электродвигатель имеет систему плавного пуска. Передача крутящего момента от привода к ротору осуществляется карданом. Максимальный вес ротора, устанавливаемого на станок, составляет 40 тонн. Универсальный суппорт станка позволяет выполнять токарную, фрезерную обработку и шлифование поверхностей роторов. Измерения вибрации в процессе балансировки производятся универсальными виброанализаторами в комплекте с низкочастотными датчиками. Порог чувствительности измерений составляет порядка 20 – 30г корректирующей массы на радиусе установки, что гарантированно обеспечивает надлежащую точность балансировки роторов паровых турбин.

С целью гарантированного обеспечения сроков выполнения ремонтных работ на производственной базе предприятия дополнительно вводится в эксплуатацию высокоточный тихоходный балансировочный станок грузоподъемностью до 40 тонн производства фирмы «Диамех 2000», что повысит общую производительность участка балансировки более чем в 2 раза.

Очевидно, что идеальное уравнивание гибкого ротора может быть выполнено только при установке соответствующих корректирующих масс в сечениях, совпадающих с местами нахождения исходных дисбалансов. При этом динамический прогиб ротора и усилия на его опорах, вызванные остаточной неуравновешенностью, будут минимальными во всем диапазоне частот вращения [1]. Таким образом, эффективность любой методики уравнивания гибкого ротора определяется возможностью максимально точного определения мест нахождения и величин исходных дисбалансов, а также технологической возможностью установки балансировочных грузов в плоскостях коррекции, максимально приближенных к источникам дисбаланса.

Одним из эффективных способов уравнивания гибкого ротора является ВЧБ в условиях РБС, упомянутая выше. Расчетное определение параметров системы корректирующих масс, основанное на прямых методах решения систем линейных уравнений, методе наименьших квадратов либо на итерационных методах, производится по результатам замеров вибрации опор на ряде частот вращения, включая рабочую частоту. Замеры выполняются в ходе пусков с «пробными» балансировочными грузами, последовательно установленными во всех штатных плоскостях коррекции дисбаланса ротора. Данный способ позволяет учесть влияние динамического прогиба ротора, который, в общем случае, изменяет эксцентриситеты неуравновешенных масс и их некомпенсированные центробежные силы. Однако нахождение плоскостей коррекции, ближайших к источникам дисбаланса ротора, производится только посредством оценки эффективности влияния «пробных» грузов в заданном диапазоне частот вращения.

Балансировка роторов с использованием низкочастотных балансировочных станков выполняется на частотах вращения, обычно не превышающих 400 об/мин, где динамического прогиба роторов не возникает и его влияние не учитывается. При стандартной НЧБ нахождение плоскостей коррекции, ближайших к источникам дисбаланса, крайне затруднено.

Для решения этой проблемы специалистами УГТУ – УПИ разработана методика балансировки гибких роторов паровых турбин на низкочастотных балансировочных станках системами распределенных грузов. Она отличается от стандартной методики НЧБ тем, что балансировка выполняется системами грузов, располагаемых в плоскостях коррекции вдоль оси ротора в соответствии с формами прогибов по первым двум теоретически рассчитанным формам собственных колебаний ротора на податливых опорах. При этом оптимальное сочетание плоскостей коррекции и соотношение корректирующих масс при известной податливости штатных опор турбины могут быть получены расчетным моделированием вынужденных колебаний ротора [5].

В условиях производственной базы ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» задача многоплоскостного уравнивания гибкого ротора с насадными деталями на низкочастотном балансировочном станке решается иным способом, а именно – путем выполнения его поэтапной сборки и балансировки. Данная методика определяет порядок выполнения работ для роторов, условно разделенных на три типа:

- первый тип – цельнокованные роторы с развитыми насадными полумуфтами;
- второй тип – роторы с цельнокованой частью, насадными дисками и полумуфтой;
- третий тип – роторы с насадными дисками и полумуфтами.

Выполняются следующие этапы работ:

Этап 1. НЧБ цельнокованой части (вала) ротора без насадных деталей

При балансировке роторов первого типа, как правило, используются две плоскости коррекции на крайних цельнокованных дисках.

При балансировке роторов второго типа также используются две плоскости коррекции на крайних цельнокованных дисках (при необходимости – пароразгрузочные отверстия). Перед балансировкой

пазы продольных шпонок на валу ротора (если таковые имеются) заполняются фальшшпонками, которые закрепляются простейшими ленточными хомутами.

Перед балансировкой валов третьего типа при необходимости также устанавливаются фальшшпонки. При балансировке используются доступные плоскости коррекции (если таковые имеются). Балансировка валов, не имеющих каких-либо плоскостей коррекции, не производится, однако фиксируются параметры вибрации опор станка при «нулевом» пуске.

Этап 2. Определение количества промежуточных этапов балансировки и порядка сборки ротора

Для роторов, имеющих на насадных дисках и втулках одну или две доступные плоскости коррекции, обычно производится полная сборка ротора за исключением насадки полумуфты. Для роторов, имеющих на насадных дисках и втулках более двух доступных плоскостей коррекции, промежуточные этапы сборки определяются таким образом, чтобы «пакет» насадных деталей, монтируемый на ротор за один промежуточный этап, имел не менее одной плоскости коррекции дисбаланса. Для двухпоточных роторов третьего типа, имеющих симметрично расположенные насадные детали, «пакет» насадных деталей формируется монтажом симметричных дисков одновременно на оба потока, при условии наличия в «пакете» минимум двух плоскостей коррекции (по одной плоскости на каждый поток).

Этап 3. Монтаж «пакета» насадных деталей

Для роторов второго и третьего типа выполняется монтаж «пакета» насадных деталей на соответствующий участок вала ротора. Производится контроль радиальных и торцевых биений насадных деталей и вала ротора.

Этап 4. Имитация разгона ротора

Имитация разгона с контролем биений, описанная выше, производится для роторов второго и третьего типа.

Этап 5. НЧБ ротора с «пакетом» насадных деталей

В ходе балансировки используются одна или две плоскости коррекции дисбаланса на вновь установленных насадных деталях. Для роторов третьего типа, не имевших плоскостей коррекции дисбаланса на цельнокованой части, учитываются данные «нулевого» пуска.

Этап 6. Монтаж насадной полумуфты (полумуфт)

Для роторов первого и второго типа производится монтаж насадной полумуфты. На роторы третьего типа обе насадные полумуфты, как правило, монтируются одновременно. Выполняется контроль радиальных и торцевых биений полумуфты (полумуфт).

Этап 7. НЧБ ротора в сборе с полумуфтой (полумуфтами)

В ходе балансировки используются одна или две плоскости коррекции дисбаланса на полумуфте (полумуфтах).

При выполнении промежуточных этапов сборки ротора этапы 3 – 5 повторяются для каждого вновь монтируемого «пакета».

Следует отметить, что определение количества промежуточных этапов сборки и этапов балансировки каждого ротора производится индивидуально, с учетом особенностей его конструкции, технического состояния и характера выполненных ремонтных операций. Очевидно, что методика поэтапной балансировки роторов не является универсальной, так как может быть реализована лишь при ремонте, включающем полную либо частичную разборку роторов с насадными деталями. Поэтапное выполнение операций по сборке и балансировке приводит к значимому увеличению затрат времени, которые обусловлены переустановкой ротора на балансировочном станке и стенде сборки, а также имитациями разгонов с продолжительным остыванием насадных деталей ротора после нагревов. Однако данный подход к уравниванию роторов на низкочастотном балансировочном станке технологически обеспечивает стабильность динамических характеристик ротора после его сборки и однозначно определяет места расположения дисбалансов в пределах цельнокованой части и на вновь монтируемых «пакетах»

насадных деталей. При этом выбор используемых плоскостей коррекции производится не расчетным путем, а напрямую зависит от количества промежуточных этапов сборки ротора и технологической возможности установки корректирующих масс в сечениях, заданных порядком сборки. В отличие от поэтапной балансировки, дисбаланс сборочной единицы (диска, полумуфты, «пакета») в данном случае корректируется не на технологической оправке, а на штатной посадочной поверхности, уже имеющей определенный эксцентриситет. Эффективность поэтапной балансировки, в общем случае, зависит от оптимальности определения этапов сборки, достаточности количества доступных плоскостей коррекции и точности измерений в процессе балансировки.

Опыт выполнения поэтапных балансировок показывает, что при уравнивании роторов с насадными деталями в среднем задействуется от четырех до восьми плоскостей коррекции дисбаланса. В связи с явно недостаточным количеством штатных балансировочных плоскостей, для установки корректирующих грузов нередко используются пароразгрузочные отверстия дисков и отверстия под соединительные болты полумуфт, где устанавливаются специальные втулки и шайбы. Заметим, что средние массы балансировочных грузов, монтируемых на насадные полумуфты роторов в ходе поэтапной балансировки, составляют порядка 150–500 г на радиусе установки.

5. Обеспечение точности измерений

Как было упомянуто выше, при проведении сборки роторов на производственной базе ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК» постоянно используются стандартные поверенные средства измерений. Широко применяются портативные электронные приборы для контактного и бесконтактного измерения температур. Особое внимание уделяется выбору виброизмерительных приборов, обеспечивающих качество диагностирования и балансировки роторов, контроль облопачивания дисков. В настоящее время весь спектр задач, связанный с измерениями параметров вибрации, обеспечивается универсальными виброанализаторами производства фирмы «Диамех 2000».

Таким образом, проблема качества уравнивания гибких роторов паровых турбин, поступающих для ремонта на производственную базу ОАО «Теплоэнергосервис–ЭК», решается выполнением комплекса мероприятий:

- 1) Снижение уровней дисбаланса роторов с остаточным прогибом обеспечивается их переточкой либо термической правкой релаксационным методом.
- 2) Минимизация дисбаланса цельнокованой части ротора обеспечивается низкочастотной балансировкой вала без насадных деталей.
- 3) Минимизация дисбаланса насадных облопаченных дисков обеспечивается высокоточной моментной развеской рабочих лопаток и оптимизацией порядка их расстановки на колесе с учетом радиуса установки.
- 4) Стабильность динамических характеристик сборного ротора обеспечивается имитациями разгона.
- 5) Поэтапная сборка и балансировка однозначно определяет места нахождения дисбаланса и плоскости его коррекции, что обеспечивает оптимизацию системы корректирующих масс и повышает эффективность многоплоскостной низкочастотной балансировки.
- 6) Многоплоскостная компенсация дисбаланса вблизи его источников приводит к значительному уменьшению динамического прогиба ротора вблизи его критических частот вращения.

Комплексный подход к обеспечению качества сборки и уравнивания роторов с применением методики поэтапной многоплоскостной балансировки на низкочастотных балансировочных станках, по мнению авторов, гарантирует эффективность уравнивания, приближающуюся к эффективности высокочастотной балансировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 2000
2. Недошивина Т. А., Урьев Е. В. К вопросу о корректности моментной развески и расстановки рабочих лопаток в процессе ремонта роторов. Совершенствование турбин и турбинного оборудования // Региональный сборник научных статей. Екатеринбург: УГТУ, 2000
3. Молочек В. А. Ремонт паровых турбин. М.: Энергия, 1968
4. Лемзаков Н. К. Правка валов роторов паровых турбин методом релаксации напряжений. Ремонт оборудования ТЦ электростанций // Сборник статей ОРГРЭС. М.-Л.: Энергия, 1966
5. Урьев Е. В. и др. Разработка и внедрение метода балансировки гибких роторов на низкочастотных балансировочных станках системами распределенных грузов. Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций // Сборник докладов. М.: ВТИ, 2001