

Оборудование и технологии, применяемые при балансировке роторов газоперекачивающих агрегатов

И.И. Радчик (ДИАМЕХ 2000), А.В. Орехов (Центрэнергогаз), Е.В. Урьев (УГТУ-УПИ)

В процессе ремонта газовых турбин неизбежно встает проблема уравнивания роторов на балансировочных станках. С увеличением рабочих частот вращения роторов, усложнением их конструкции проблема уравнивания становится все более значимой.

Общая надежность, маневренность и долговечность турбомашин любого типа в значительной степени определяется их вибрационной надежностью. Неудовлетворительное вибрационное состояние агрегатов при вводе их в эксплуатацию после ремонта является одной из основных причин удлинения сроков ремонта, приводит и к преждевременному износу оборудования, и к потере тех качеств, которые были достигнуты в процессе ремонта. При этом обесцениваются все усилия, затраченные на ремонт оборудования. В частности, повышенная вибрация сопровождается, как правило, задеваниями и износом уплотнений, вследствие чего снижается экономичность турбоагрегата. Многочисленные пуски агрегата, производимые для балансировки роторов в собственных подшипниках, значительно снижают ресурс оборудования, поскольку многократно повторяющиеся знакоперемен-

ные температурные напряжения, проходы через критические частоты вращения роторов и резонансные частоты лопаточного аппарата могут явиться причиной последующих разрушений.

Наиболее распространенная и эффективная практика обеспечения вибрационной надежности турбомашин состоит в тщательной балансировке их роторов на станках. Вплоть до 60-х гг. прошлого века практически всеми отечественными и зарубежными изготовителями газовых турбин с этой целью использовались только низкочастотные балансировочные станки.

Известно, что применение балансировочных станков полностью гарантирует качество уравнивания любых жестких роторов. В то же время низкочастотная балансировка (НЧБ) в двух плоскостях коррекции не гарантирует обеспечения допустимой вибрации на рабочей частоте вращения турбоагрегатов с гибкими роторами. Однако для роторов турбомашин, работающих при частоте вращения между первой и второй критическими частотами, при достаточном удалении рабочей частоты от критических частот такая балансировка, как правило, обеспечивала выполнение предъявляемых в то время требований к уровню вибрации всех выпускаемых турбин, компрессоров, нагнетателей и генераторов. Статистика, известная авторам, подтверждает, что доля роторов, для которых НЧБ была недостаточна, составляла не более 10–15 % общего числа балансировок.

Однако, в связи с увеличением единичной мощности и быстроходности агрегатов и использованием новых конструктивных решений, рабочая частота вращения роторов все чаще оказывалась вблизи и выше не только второй, но и третьей критической частоты. Одновременно были существенно ужесточены нормы вибрации агрегатов, распространяемые не только на рабочий диапазон частот вращения, но и на вибрацию при проходе через критические частоты вращения. Проблема вибрационной надежности в этом случае решалась двумя путями: созданием высокотехнологических процессов изготовления и сборки роторов либо внедрением высокочастотной балансировки роторов на разгонно-балансировочных стандах (РБС).

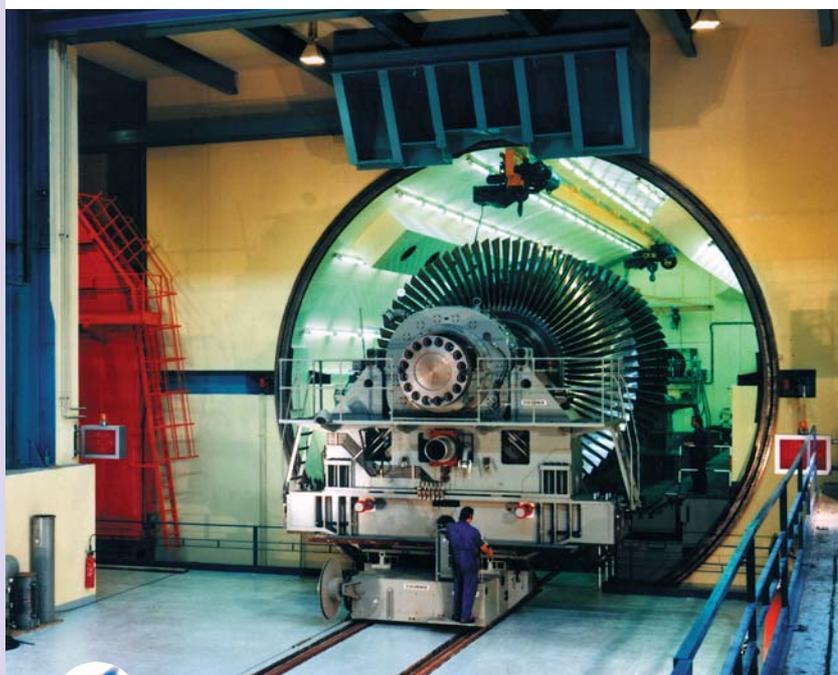


Рис. 1. Разгонно-балансировочный стенд

В первом случае, применяемом, прежде всего, для сборных роторов, одновременно с повышением точности обработки деталей и сборочных единиц, внедрялась их поэлементная балансировка на высокоточных низкочастотных балансировочных станках как с горизонтальной, так и с вертикальной осью вращения, использовались специальные приемы сборки, позволявшие минимизировать смещение центров масс от оси вращения и т. д.

Во втором случае, принятом в основном в стационарном энергомашиностроении, был осуществлен переход на высокочастотную балансировку, и для этих целей приобретались РБС. Необходимость в их использовании мотивировалась еще и тем, что в ме-



Рис. 2. Балансировочный станок VM-36000 («ДИАМЕХ 2000»)

ждународные стандарты, в частности в нормы МЭК, было включено обязательное требование разгонных испытаний роторов на частоту вращения, превышающую рабочую частоту на 20 %, и выдержку роторов на этих частотах в течение 2 мин. Однако такие испытания предусматривались единожды за все время «жизни» ротора и, естественно, должны были проводиться только на заводе-изготовителе.

Признанным лидером в производстве РБС различной грузоподъемности и по сей день является германская фирма «Шенк Ро Тек ГмбХ», выпускающая данную продукцию уже более 50 лет. Ее станки обладают рядом уникальных технических характеристик и, наряду с широкими технологическими возможностями, широко используются для исследовательских целей. Применение вакуумирования рабочих полостей станков, надежная бронезащита позволяют испытывать на них облопаченные роторы на высоких (более 10 000 мин⁻¹) частотах вращения, надежно обеспечивают безопасность персонала при возможном разрушении ротора в процессе испытаний (рис. 1, 2).

Безусловно, наилучшие результаты в решении проблемы обеспечения вибрационной надежности турбомашин с гибкими роторами могут быть получены при использовании современных методов балансировки гибких роторов во всем диапазоне частот вращения на РБС, но это требует разработки специальных, очень непростых методик балансировки и (обязательно одновременно с этим) создания условий для осуществления многоплоскостной балансировки роторов, что сопряжено с принятием определенных конструктивных решений. Вопросам теории высокочастотной балансировки гибких роторов и требованиям к качеству их балансировки всегда уделялось большое внимание. К началу 70-х гг. наибольшее распространение получила теория балансировки по собственным формам колебаний, предложенная А. Мельдалем и наиболее применимая в ос-

новном к балансировке симметричных роторов с большим числом плоскостей коррекции, расположенных вдоль оси ротора. Этим требованиям, прежде всего, отвечали роторы генераторов и других крупных электрических машин.

Конструктивные особенности роторов газовых турбин, компрессоров, нагнетателей, насосов и т. д., такие, как несимметричность, ограниченное число плоскостей коррекции и жесткая увязка их местоположения с конструкцией, не позволяли эффективно использовать метод собственных форм колебаний. В этом случае применялся другой метод балансировки гибких роторов – по динамическим коэффициентам влияния (ДКВ). В основе его лежит доказанная Дж. Ден-Гартогом теорема, согласно которой невесомый ротор с r -сосредоточенными массами, опертый на b подшипниках, при любом дисбалансе, как угодно распределенном вдоль его оси, может быть полностью динамически сбалансирован корректирующими массами, размещенными в $M = r + b$ различных плоскостях коррекции по длине ротора, где r соответствует числу собственных форм гибкого ротора. В практическом плане использование теоремы Ден-Гартога означает, что для качественной балансировки роторов современных турбомашин необходимо иметь как минимум пять-шесть плоскостей коррекции. На основе описанной методики был разработан и внедрен типовой технологический процесс, что позволило успешно ввести с 1976 г. многоплоскостную балансировку всех роторов паровых и газовых турбин, выпускаемых на Уральском турбомоторном заводе. В дальнейшем эта методика совершенствовалась и модернизировалась и послужила основой аналогичных методик, разработанных и внедренных и на других энергомашиностроительных предприятиях.

Практика показала, что массовое внедрение в энергетическом машиностроении РБС было взвешенным и абсолютно оправданным про-

цессом. Освоение РБС сопровождалось истинным прорывом в развитии средств и методов балансировки гибких роторов. С внедрением РБС и разработкой методики многоплоскостной балансировки резко повысилось качество выпускаемых турбоагрегатов, появилась возможность ужесточить требования к нормированию их вибрации.

Теперь, совершив исторический экскурс и напомнив этапы развития балансировочной техники и балансировочных технологий в производстве турбомашин, рассмотрим эффективность использования того или иного балансировочного оборудования и соответствующих методик и в ремонтном процессе.

Необходимо сразу сказать несколько слов о целесообразности использования РБС, поскольку часто и не очень корректно высказываются сомнения в их преимуществах перед низкочастотными станками. Конечно, использование РБС экономически целесообразно только при достаточной загрузке его балансировочными работами. Однако при этом следует помнить, что балансировка роторов на РБС отличается еще, как минимум, тремя особенностями.

Во-первых, качественная многоплоскостная балансировка закладывает запас вибрационной надежности агрегата и позволяет поддерживать вибрационную надежность агрегата в течение достаточно длительных периодов, включающих и несколько ремонтных циклов. Объясняется это тем, что правильно выполненная многоплоскостная балансировка направлена на устранение дисбалансов в местах их возникновения, что обеспечивает устранение (минимизацию) прогибов ротора во всем диапазоне частот вращения, а не компенсацию динамических реакций опор на дискретных частотах вращения. Такое первоначальное состояние ротора делает его равновесие более устойчивым к изменению его жесткостных характеристик, которые могут изменяться в процессе эксплуатации под воздействием на сильно нагруженные конструктивные элементы, например крепежные детали, высоких температур. Длительная эксплуатация сопровождается износом и, как результат этого, – эксплуатационной разбалансировкой. Кроме того, ремонтные работы, связанные с заменой лопаточного аппарата, восстановлением уплотнений и др., также могут внести в ротор дисбалансы, но при исходной качественной многоплоскостной балансировке ротора влияние внесенных дисбалансов значительно мягче, чем при исходной двухплоскостной балансировке, даже если она выполнялась на рабочей частоте вращения.

Существует ряд приемов, которые позволяют учитывать, какие и где вносятся дисбалансы при ремонтах, и выполнять компенсацию внесенных дисбалансов в плоскостях, максимально приближенных к ним. Все вышесказанное справедливо для того большинства регламентных ремонтов, которые выполняются без полной разборки роторов, замены насадных и крепежных элементов, значительной проточки шеек и т. д. Именно благодаря этому во всех ремонтах роторов, прошедших предварительную балансировку на РБС, удается длительное время очень эффективно использовать низкочастотные балансировочные станки.

Во-вторых, при балансировке роторов на РБС существует возможность проведения повторных разгонных испытаний, особенно после замены ответственных узлов и деталей роторов или существенной модернизации роторов. Эти испытания позволяют выявить и устранить внешние в процессе ремонтов особо опасные дефекты или выявить и заменить установившиеся дефектные детали. Кроме того, разгон роторов обеспечивает их вибрационную стабилизацию, что особенно важно для сборных роторов.

В-третьих, вибрационные испытания роторов, выполняемые одновременно с их балансировкой на РБС, дают хорошую возможность диагностирования ряда дефектов, возникающих в процессе сборки роторов, и, следовательно, возможность проверить качество выполненных работ. Еще более важной является диагностика роторов, эксплуатировавшихся длительные периоды, когда возможны процессы релаксации напряжений и соответственно снятие натягов, недопустимое удлинение крепежных элементов, наконец, просто появление усталостных трещин в роторах и их деталях.

Из вышесказанного можно сделать следующий вывод: так называемые промышленные ремонты, выполняемые после длительной эксплуатации агрегатов с заменой узлов, исчерпавших свой ресурс, должны, по сути, завершаться повторной балансировкой роторов на РБС, но только в тех случаях, когда такая балансировка осуществлялась и при их изготовлении.

Авторам, однако, представляется, что в условиях ремонта на компрессорных станциях магистральных газопроводов и в большей части связанных с ними ремонтных предприятиях разумным и экономически обоснованным является использование для балансировки роторов только низкочастотных балансировочных станков, тем более, как это показано выше, низкочастотная балансировка роторов прекрасно сочетается с их предварительной высокочастотной балансировкой.

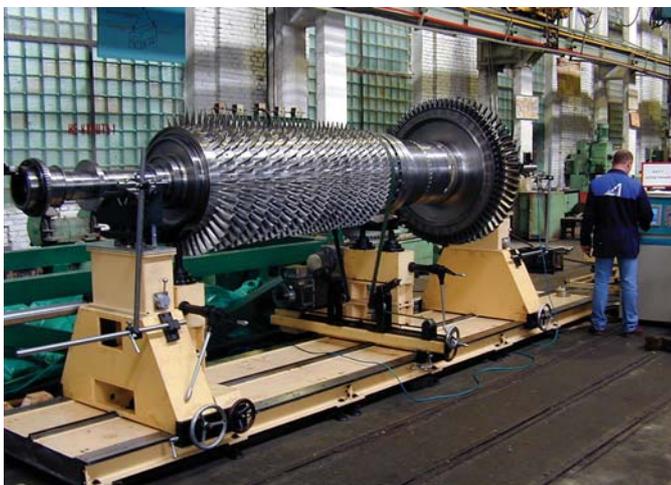


Рис. 3. Балансировочный станок VM-8000 («ДИАМЕХ 2000»)

Широкая номенклатура ремонтируемых роторов по их весу и особенностям конструкции предопределяет технико-экономическую целесообразность применения такого типа балансировочных станков, которые бы сочетали широкую универсальность с хорошими точностными характеристиками и простотой использования. К таким станкам, безусловно, относятся горизонтальные мягкоопорные балансировочные станки серии VM различной грузоподъемности, производимые московской фирмой «ДИАМЕХ 2000». Эта надежная и высокотехнологичная продукция широко применяется в различных отраслях промышленности. Применение горизонтальных станков серии VM в сочетании с вертикальными станками серии В позволяет обеспечить высокоточную низкочастотную балансировку как узлов роторов, так и самих роторов в сборе. Широкий диапазон веса изделий, балансировка которых может быть произведена на одном и том же станке, отсутствие необходимости в устройстве специальных фундаментов, простота и наглядность пользования измерительной системой делают эти станки незаменимыми как в условиях промышленного ремонта, так и в условиях ремонта на КС (рис. 3).

Совокупность указанных подходов позволила разработать обоснованную концепцию низкочастотной балансировки указанных роторов системами распределенных грузов. Данная методика основана на результатах исследований упрощенных моделей и предлагает разнообразные, максимально приближенные к идеалу решения этой задачи.

Внедрение указанной методики при балансировке некоторых типов роторов дало превосходные ожидания результаты. Так, если в ООО «Тюментрансгаз» при двухплоскостной балансировке роторов турбокомпрессора турбоагрегата ГТН-16 только около 50 % агрегатов после пуска из ремонта имели допустимый уровень вибрации, то после внедрения методики

низкочастотной многоплоскостной балансировки доля таких агрегатов составила 100 %.

Практика применения различных типов балансировки позволяет сделать следующие выводы.

- Если конструкция роторов предусматривает в процессе изготовления низкочастотную балансировку отдельных деталей и узлов, а также другие технологические приемы, направленные на минимизацию дисбалансов, то и в процессе ремонта целесообразно использовать те же технологии.

- Если конструкция роторов предусматривает в процессе изготовления высокочастотную многоплоскостную балансировку на разгонно-балансировочных стендах, то такая балансировка закладывает запас вибрационной надежности агрегата и позволяет поддерживать вибрационную надежность агрегата в течение нескольких ремонтных циклов, используя в процессе ремонта низкочастотные балансировочные станки, однако при промышленных ремонтах желательно повторно балансировать роторы на РБС.

- В целом, высокочастотная балансировка роторов является более прогрессивным методом, но ее применение в процессе ремонта возможно только при условии приспособленности роторов к многоплоскостной балансировке. Одновременно РБС позволяют решать проблемы диагностического характера и выполнять разгонные испытания роторов, что очень важно при промышленном ремонте.

- Разгонно-балансировочные стенды не должны использоваться как инструмент для исправления дефектов, возникших в результате нарушения технологии ремонта. Кроме того, балансировка на РБС роторов, не приспособленных для многоплоскостной балансировки, не только малоэффективна, но и может привести к отрицательным результатам.

- Балансировка на станках более рациональна в условиях небольших и средних ремонтных предприятий. Современные подходы позволяют осуществлять низкочастотную балансировку гибких роторов системами распределенных грузов, приближая ее в ряде случаев по результативности к многоплоскостной балансировке на РБС.

ДИАМЕХ 2000

Вибродиагностика и Балансировка

115432, г. Москва, 2-й Кожуховский проезд, д. 29, корп. 2, стр. 16.
Тел.: (495) 223-0420
Факс: (495) 223-0490
E-mail: diamech@diamech.ru
www.diamech.ru