

Согласно результатам анализа состояния измерений, контроля и испытаний на предприятии принимаются меры по совершенствованию метрологического обеспечения.

#### **Список литературы**

1. *Авлиякулов, Н. Н.* Метрологическое обеспечение производства в нефтегазовой отрасли : учебное пособие / Н. Н. Авлиякулов. – Ташкент : «Фан ва технологиялар», 2013. – 340 с.

2. *Чубинский, А. Н.* Основы управления качеством : учебное пособие / А. Н. Чубинский, И. М. Батырева, Д. С. Русаков. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2018. – 90 с. – ISBN 978-5-9239-1031-5.

3. *ГОСТ Р ИСО 9001–2015.* Системы менеджмента качества. Требования : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 сентября 2015 г. № 1391-ст : дата введения 2015-11-01 / разработан Всероссийским научно-исследовательским институтом сертификации. – Текст : электронный // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124394?section=text#>.

УДК 621.0

**Ю. Б. Алексе́нцев<sup>1</sup>, Г. Н. Мига́чева<sup>2</sup>**

**Yu. B. Aleksentseva, G. N. Migacheva**

<sup>1</sup> *АО «Урало-Сибирская Промышленная компания», Артемовск*

<sup>2</sup> *ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Екатеринбург*

*Ural-Siberian Industrial Company, Artemovsk*

*Russian State Vocational Pedagogical University, Ekaterinburg*

*galnic42@gmail.com*

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ БАЛАНСИРОВКА РОТОРОВ В СОБСТВЕННЫХ ОПОРАХ**

## **DYNAMIC BALANCE OF ROTORS IN OWN SUPPORTS**

**Аннотация.** *Одной из наиболее важных и актуальных проблем современности является повышение качества и надежности механизмов, машин и оборудования в любой отрасли промышленности. Это вызвано постоянным ростом энерговооруженности современных предприятий тяжелого машиностроения, оснащением их сложной техникой, внедрением автоматизированных систем обслуживания и управления. Известны традиционные пути увеличения надежности и ресурса, такие как оптимизация систем, совершенствование конструкции и технологии изготовления отдельных элементов, резервирование механизмов, машин и оборудования, увеличение коэффициента запаса (работа не на полную мощность, не на номинальном режиме и т. п.).*

***Abstract.** One of the most important and urgent problems of our time is to improve the quality and reliability of mechanisms, machines and equipment in any industry. This is due to the constant growth of the power supply of modern enterprises of heavy engineering, equipping them with complex equipment, and the introduction of automated maintenance and control systems. There are traditional ways to increase reliability and service life, such as optimizing systems, improving the design and manufacturing technology of individual elements, redundant mechanisms, machines and equipment, increasing the safety factor (work not at full capacity, not at nominal mode, etc.).*

***Ключевые слова:** ротор; подшипник; балансировка; неуравновешенность; дисбаланс; оборудование; вращение.*

***Keywords:** rotor; bearing; balancing; unbalance; unbalance; equipment; rotation.*

Все вращающиеся объекты испытывают на себе действие инерционных сил. Величина этих сил зависит от величины несовпадения оси вращения объекта и центров масс его сечений, перпендикулярных этой оси. Наличие таких несовпадений называется неуравновешенностью (дисбалансом) вращающегося объекта. Соответственно, требуется балансировка роторов в собственных подшипниках – это процедура, которая позволяет уравновесить вращающуюся часть, добившись нужных показателей в работе оборудования и избежав вероятности получения брака.

Задачей балансировки роторов вращающихся машин является компенсация инерционных сил, вызванных неуравновешенностью вращающихся частей машины. Эти силы действуют в радиальном направлении относительно оси вращения машины. Вдоль оси вращения их действие существенно слабее, и вызывается в основном особенностями конструкции машины или наличием в ней дефектов. Однако, в условиях эксплуатации непосредственное измерение величин этих сил затруднено, а в большинстве случаев и невозможно. Поэтому главным фактором балансировки машины в условиях эксплуатации, является уменьшение ее вибрации на частоте вращения путем установки корректирующих масс в соответствующих плоскостях на роторе [1].

Балансировка ротора электродвигателя – важный элемент обслуживания оборудования, позволяющий продлить срок его эксплуатации. Центробежные силы, возбуждаемые этими массами, могут также компенсировать действие радиальных вращающихся составляющих некоторых видов сил иной природы (например, электромагнитных сил) на неподвижные части машины, нивелирует проблему балансировка роторов турбин. Поскольку не все из действующих в машине сил на частоте вращения имеют только радиальные вращающиеся составляющие, вибрация машины не может быть устранена полностью. Но балансировка ротора компрессора и других элементов позволит существенно улучшить ситуацию [1].

Встречается статическая и динамическая балансировка роторов. Первая производится на призмах, вторая же выполняется прямо при вращении на балансирующих деталях. Какой именно вариант выбрать, зависит от типа используемого оборудования и конкретной ситуации. Разумеется, статическую балансировку ротора выполнить гораздо проще, поскольку работы производятся на неподвижном элементе.

Необходимость балансировки машин в условиях их эксплуатации обусловлена, в основном, тем, что, во-первых, при сборке машины из предварительно сбалансированных частей возникает дисбаланс ротора за счет допусков при сборке, а также тем, что при балансировке на станке невозможно воспроизвести влияние гидро, и аэродинамических и тепловых дисбалансов.

Во-вторых, в процессе эксплуатации машины величина дисбаланса может расти, например из-за износа или деформации вращающихся частей. При этом работоспособность машины сохраняется, а вибрация может достигнуть опасных величин. Потому-то балансировка жестких роторов необходима не только для обеспечения возможности дальнейшей эксплуатации техники, но и для соблюдения мер безопасности на производстве.

Балансировка представляет собой процесс проверки распределения масс ротора (вращающейся детали) и, при необходимости, изменения этого распределения таким образом, чтобы удовлетворить требованиям к допустимому дисбалансу. Причинами дисбаланса могут быть неоднородность материала ротора, погрешности изготовления и сборки, износ узлов, оседание на роторе загрязняющих частиц, изменение состояния ротора во время работы машины и др. Важно понимать, что любому, даже серийно производимому ротору присуще собственное распределение масс, то есть собственный дисбаланс [2].

Новые роторы перед установкой в машину обычно подвергают балансировке на балансировочном станке изготовителя машины. Ротор после ремонта также может быть предварительно уравновешен на балансировочном станке, а в случае отсутствия необходимого оборудования - на месте установки. В последнем случае ротор устанавливают в собственные подшипники и соединяют с приводом машины.

При вращении неуравновешенного ротора на балансировочном станке или на месте установки возникает центробежная сила, которая, в свою очередь, вызывает динамическую реакцию опор ротора. По результатам измерений с помощью датчиков силы, установленных на корпусах подшипников, или с помощью датчиков вибрации, установленных для измерений колебаний опоры или вала ротора, рассчитывают массы ротора, которые необходимо добавить, удалить или переместить в процессе балансировки. В зависимости от задач балансировки ее осуществляют в одной, двух или более плоскостях коррекции [1].

Целью балансировки ротора является снижение дисбаланса ротора, остаточное значение которого при любой частоте вращения, вплоть до максимальной, не должно вызывать превышения допустимых уровней вибрации машин и динамического прогиба ротора. Во многих случаях потребитель оценивает качество ротора по результатам балансировки, т.е. до установки его в машину, т.к. после этого доступ к нему затруднен. Эту предварительную оценку качества балансировки проводят на балансировочном оборудовании по уровню вибрации и динамическим реакциям опор на частоте вращения.

На практике обычно все роторы относят к одному из двух типов: жесткий или гибкий. Методы балансировки роторов этих типов приведены в ГОСТ ИСО 1940-1 и ГОСТ 31320.

В реальности ни один ротор нельзя считать абсолютно твердым телом, и любой из них имеет малые (по сравнению с указанными формами движения жесткого ротора) изгибные деформации. Однако ротор можно рассматривать как жесткий при условии, что его деформации, связанные с распределением дисбалансов вдоль ротора, не превышают заданных допустимых значений на любой частоте вращения ротора вплоть до максимальной рабочей частоты [3].

Например, допустимый уровень вибрации ротора машины (виброперемещений) равен 100 мкм (размах виброперемещения, мкм), а его изгибные колебания на собственных частотах не превышают, к примеру, 10 мкм. Большинство таких роторов могут быть уравновешены методами по ГОСТ ИСО 1940-1. Их целью является устранение главного вектора дисбалансов установкой масс в одной плоскости коррекции или динамической неуравновешенности распределением масс по двум плоскостям коррекции.

Ротор, который в процессе работы должен вести себя как жесткий, может быть уравновешен на любой скорости балансировочного станка, при условии, что она достаточно низка для сохранения ротором свойств твердого тела.

При повышении частоты вращения или при уменьшении допустимого дисбаланса ротор, рассматриваемый как жесткий, может начать проявлять характерные признаки гибкого ротора. Деформации ротора становятся значительными, а методы, применяемые при балансировке жесткого ротора – недостаточными для достижения требуемой уравновешенности ротора. Для ротора, проявляющего признаки гибкого ротора, используют методы балансировки по ГОСТ 31320.

Современное балансировочное оборудование и методы балансировки позволяют уменьшить дисбаланс до весьма низкого значения. Однако завышать сверх необходимого требования к качеству балансировки экономически нецелесообразно. Поэтому следует определить допустимый дисбаланс, при

котором достигается приемлемый уровень вибрации и динамических сил в обычных режимах работы машины. Так, например, жесткий допустимый дисбаланс выбранный при балансировке якоря электродвигателя на балансировочном станке без учета зазоров в подшипнике, может сделать балансировку экономически невыгодной [3].

Существует прямая связь между дисбалансом ротора и вибрацией на оборотной частоте при работе машины. Эта связь определяется динамическими характеристиками машины (ротора, корпуса, подшипниковых опор). Однако вибрация машины может быть обусловлена не только дисбалансом ротора. Существуют и другие источники вибрации, например, магнитные поля, потоки жидкости.

Рекомендации по определению допустимого остаточного дисбаланса приведены в ГОСТ ИСО 1940-1 для жестких роторов и ГОСТ 31320 (где использованы те же значения допустимого дисбаланса, что и в ГОСТ ИСО 1940-1) для роторов других типов.

Не существует простого способа оценить вибрацию при работе ротора в составе машины по результатам измерений вибрации на балансировочном станке. Соотношение между этими вибрациями зависит от того, насколько отличаются динамические характеристики опор ротора на балансировочном станке и на машине. Кроме того, на балансировочном станке ротор балансируют отдельно, в то время как в составе машины он подвержен влиянию других роторов валопровода. У разных балансировочных станков разная жесткость основания, поэтому предельные значения вибрации для разных станков устанавливаются неодинаковыми [4].

При наличии достаточной информации о вибрации могут быть установлены предельные значения ее параметров, как в ГОСТ 31320. Допустимая вибрация машин с роторами определена в ГОСТ ИСО 7919-1, ГОСТ 27165, ГОСТ ИСО 7919-3 и ГОСТ ИСО 7919-4 для вибрации валов и в ГОСТ ИСО 10816-1, ГОСТ 25364, ГОСТ ИСО 10816-3 и ГОСТ ИСО 10816-4 для вибрации на не вращающихся частях.

Если такая информация отсутствует, то в качестве ориентировочных могут быть взяты значения параметров вибрации на балансировочных станках, если известно, что уравновешенные на них роторы удовлетворительно работают в составе машины.

Ротор, рассматриваемый как жесткий может быть уравновешен с использованием одной или двух плоскостей коррекции, как установлено ГОСТ ИСО 1940-1. Как правило ротор, рассматриваемый как гибкий, уравновешивают по ГОСТ 31320.

На рис. 1 и на рис. 2 представлены методы балансировки роторов разной конфигурации.

Задачей балансировки является снижение вибрации до уровня, позволяющего осуществлять долговременную эксплуатацию машины. Для большинства машин предельные значения вибрации устанавливаются либо на основе практики их эксплуатации, либо используя рекомендации стандартов ГОСТ ИСО 10816 и ГОСТ ИСО 7919 в отношении вибрации, соответственно, на не вращающихся частях и на валах. Если первоочередного внимания требует дисбаланс ротора, то его посредством балансировки необходимо уменьшить до допустимых пределов.

СХЕМАТИЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РОТОРА	ОПИСАНИЕ РОТОРА		ОТНОШЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ К ЧАСТОТЕ ПЕРВОГО РЕЗОНАНСА	СТАНДАРТ И МЕТОД БАЛАНСИРОВКИ
	Любой конфигурации		<0,3	ГОСТ ИСО 1940-1, одна или две плоскости коррекции
	Один жесткий диск на упругом валу, дисбаланс которого незначителен	Диск перпендикулярен к оси вала	Любое	ГОСТ ИСО 1940-1, одна плоскость коррекции
		Диск с осевым биением		ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции
	Два жестких диска на упругом валу, дисбаланс которого незначителен	Оба диска перпендикулярны к оси вала	<0,7	ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции
		Диск (один или оба) с осевым биением		ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции
	Более одного жесткого диска на упругом валу, дисбаланс которого незначителен		≥0,7	ГОСТ 31320, метод G
			<0,7	ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции
	Одна жесткая секция на упругом валу, дисбаланс которого незначителен		≥0,7	ГОСТ 31320, метод G
			Любое	ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции

Рис. 1. Методы балансировки роторов разной конфигурации

СХЕМАТИЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РОТОРА	ОПИСАНИЕ РОТОРА		ОТНОШЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ К ЧАСТОТЕ ПЕРВОГО РЕЗОНАНСА	СТАНДАРТ И МЕТОД БАЛАНСИРОВКИ
	Две или более жестких секции на упругом валу, дисбаланс которого незначителен		<0,7	ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции
			≥0,7	ГОСТ 31320, метод G
	Цилиндрический барабан	Известное (равномерное) распределение дисбалансов	<0,6	ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции
			≥0,6	ГОСТ 31320, метод F
		Распределение дисбалансов неизвестно	<0,6	ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции
			≥0,6	ГОСТ 31320, метод G
	Ротор с барабанами, жесткими секциями, дисками		<0,6	ГОСТ ИСО 1940-1, две плоскости коррекции
	Цельный ротор		≥0,6	ГОСТ 31320, метод G
	Любая другая конфигурация		Неизвестно	ГОСТ 31320

Рис. 2. Методы балансировки роторов разной конфигурации

Балансировка на месте должна быть выполнена только квалифицированным персоналом, понимающих последствия установки на ротор пробных и корректирующих масс и имеющих опыт обслуживании машины, в состав которой входит уравниваемый ротор. Несоблюдение этого требования может привести к повышенному риску повреждения машины и получения травм обслуживающим персоналом. В процессе балансировки на месте машина подвергается многократным пускам и остановам, что может быть связано с нагрузками, нехарактерными для работы машины в нормальных условиях. Необходимо убедиться, что многократные пуски и остановки не приведут к ухудшению надежности и сокращению срока эксплуатации машины [4].

### Список литературы

1. Северо-Западный учебный центр-вибродиагностика, мониторинг, наладка : официальный сайт. – URL: <https://vibro-expert.ru>. – Текст : электронный.
2. Баркова, Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования : учебное пособие / Н. А. Баркова. – Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2016. – 160 с. – ISBN 978-5-91498-037-2.
3. Балицкий, Ф. Я. Неразрушающий контроль : в 7 томах. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова. – Москва : Машиностроение, 2015. – 829 с.
4. Балтех : официальный сайт. – URL: <https://baltech.ru>. – Текст : электронный.