

И.С. Лобанов, В.Н. Столяров, И.Н. Столяров

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ВИБРОДИАГНОСТИКИ ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК С ВРАЩАЮЩИМСЯ АНОДОМ

### Аннотация

Статья посвящена опыту применения метода вибродиагностики для анализа качества рентгеновских трубок с вращающимся анодом. Приведены результаты анализа экспериментальных данных по исследованию вибрационных характеристик узлов вращения рентгеновской трубки.

Одним из основных узлов современного рентгеновского диагностического аппарата является рентгеновская трубка с вращающимся вольфрамовым анодом. Способность узла вращения анода выдерживать тепловые и механические нагрузки при эксплуатации оборудования во многом определяет как срок службы рентгеновской трубки, так и предельные режимы ее нагружения. Плавность движения и отсутствие механических биений обеспечивают качество рентгеновского снимка в аппаратах сканирующего типа. Условия проведения рентгенодиагностических процедур требуют также минимального уровня звукового шума, производимого движущимися деталями аппарата. Требования к уровню шума рентгеновских диагностических аппаратов устанавливают «Санитарные нормы допустимого шума, создаваемого изделиями медицинской техники в помещениях лечебно-профилактических учреждений» [1]. Нормируемым параметром уровня шума являются эквивалентные (по энергии) уровни звука. Максимальное значение уровня звука, создаваемого рентгеновским диагностическим аппаратом, не должно превышать 55 дБ на расстоянии 1 м от источника с той стороны, где находятся пациент или персонал.

Из долговременной практики эксплуатации рентгеновских трубок (РТ) известно, что уровень шума со временем может возрасти. Время начала возрастания уровня шума может зависеть от интенсив-

ности работы и степени нагружения трубки. Источником шума в РТ является узел вращения анода. Условия работы подшипников в отсутствие смазки, при высоких температурах и в вакууме кардинально отличаются от стандартных условий. Для предотвращения схватывания трущихся поверхностей тел качения последние покрываются слоем из пластичных металлов, таких как серебро или свинец, а дорожки качения – дисульфидом молибдена. При износе или повреждении разделительного слоя, возникают характерные дефекты подшипников, которые вызывают снижение скорости вращения анода и возрастание уровня шума РТ. Снижение скорости вращения анода сопровождается ускоренной выработкой поверхности анода и значительно уменьшает ресурс изделия (рис. 1).

Как и любой механический узел, узел вращения РТ обладает критическими частотами, на которых могут наблюдаться механические резонансы. Работа на резонансных частотах является неприемлемой, так как ведет к значительному повышению общего уровня вибраций, радиальных и осевых биений, шума, что способствует быстрому износу деталей узла вращения и его преждевременному выходу из строя. Также резонанс оказывает негативное влияние на качество рентгеновского снимка. Для сканирующих аппаратов длительность экспозиции может достигать до 7 с. Это обстоятельство накладывает дополнительные требования на



Рис. 1. Фокусная дорожка анода, работавшего на пониженной скорости вращения

отсутствие резонансных частот узла вращения РТ как на рабочей частоте, так и в течение выбега анода во время экспозиции. ГОСТ 8490-77 регламентирует определение резонансных частот конструкции РТ.

Перечисленные выше особенности работы РТ приводят к необходимости поиска надежного метода оценки качества РТ в условиях производства и во время эксплуатации.

Определить момент зарождения дефекта и спрогнозировать поведение узла вращения РТ во время эксплуатации или в условиях производства традиционными методами представляется затруднительным. В настоящее время достаточно хорошо разработаны методики определения и прогнозирования работоспособности различных механизмов с вращающимися узлами.

В настоящей работе были рассмотрены возможности применения метода вибродиагностики применительно к РТ. Для определения вибрационных характеристик узлов вращения РТ был изготовлен специализированный испытательный стенд, исключая влияние посторонних источников вибраций на исследуемый объект. При измерениях были использованы пьезоакселерометры РА023 в стандартном исполнении. Контроль вибрационного состояния узлов вращения осуществлялся с использованием виброанализатора.

При исследовании вибрационных характеристик рентгеновских трубок проводились измерения спектров виброскорости (мм/с, СКЗ), виброускорения ( $m/c^2$ , ПИК), виброперемещения (мкм, «РАЗМАХ») в различных частотных диапазонах на различных скоростях вращения для трех плоскостей согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97 и ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009.

К причинам, вызывающим вибрации узла вращения РТ, можно отнести силы механического и электрического происхождения.

Электромагнитные источники вибрации связаны с высшими пространственными гармоническими составляющими, которые обусловлены несимметрией и несинусоидальностью напряжения питания, эксцентриситетом воздушного зазора, несинусоидальным распределением магнитодвижущей силы обмотки и целым рядом других причин. Вызываемая электромагнитными силами вибрация во многом зависит от характеристик статора как колебательной системы [2], [3].

При оценке влияния электромагнитных сил мы исходили из экспериментально установленного факта, что оборотная частота электромагнитных сил и вибраций равна удвоенной частоте питающей сети (100 Гц) [4], [5]. Для измерения влияния данных сил на шумовые и вибрационные характеристики РТ изменяли статический эксцентриситет системы «статор-ротор», т. е. несоосность внутреннего диаметра статора и внешнего диаметра ротора.

Зависимости общего уровня виброскорости на рабочей частоте (50 Гц) и частоте электромагнитной вибрации (100 Гц) от величины статического эксцентриситета приведены на рис. 2. Из рисунка следует, что существенный вклад в уровень вибраций электромагнитные силы начинают оказывать при величине статического эксцентриситета от 4 мм и более.

Конструкция излучателя обеспечивает достаточную точность позиционирования РТ в статоре, что исключает наличие столь больших эксцентриситетов. Измеренный уровень шума оставался постоянным при всех значениях эксцентриситета. Данный факт можно объяснить тем, что исследуемая

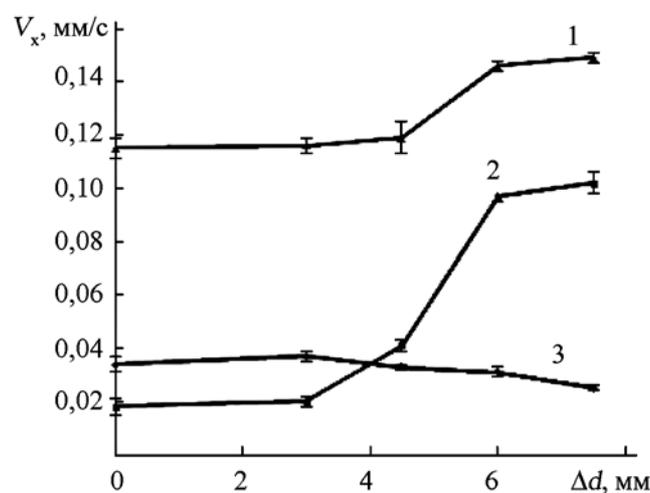


Рис. 2. Зависимости уровней виброскоростей ( $V_x$ , мм/с) частотного виброспектра исследуемой РТ от эксцентриситета ( $\Delta d$ , мм) осей статора и ротора:

1 – общий уровень виброскорости; 2 – значение виброскорости, вызываемой электромагнитной силой на частоте 100 Гц; 3 – значение виброскорости на рабочей частоте ротора 50 Гц

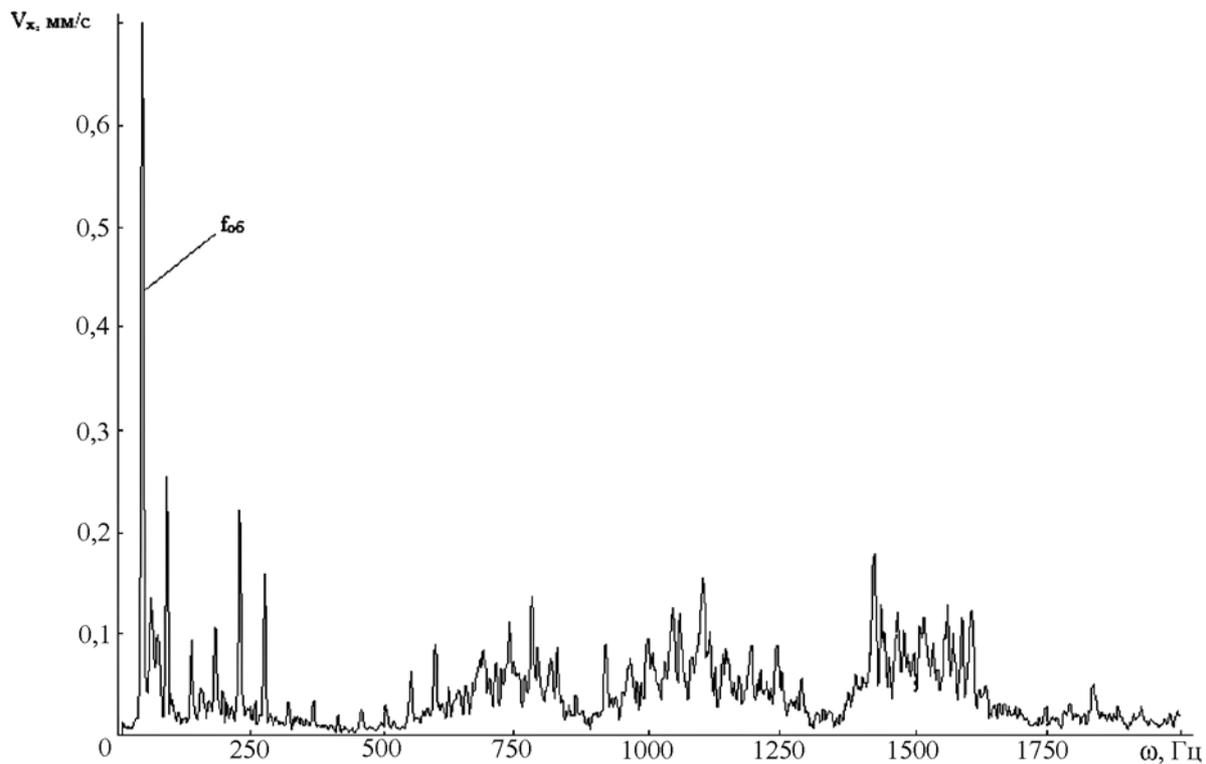


Рис. 3. Спектр виброскорости в диапазоне частот 10...2000 Гц:  
 $f_{об}$  – амплитуда виброскорости оборотной частоты 50 Гц

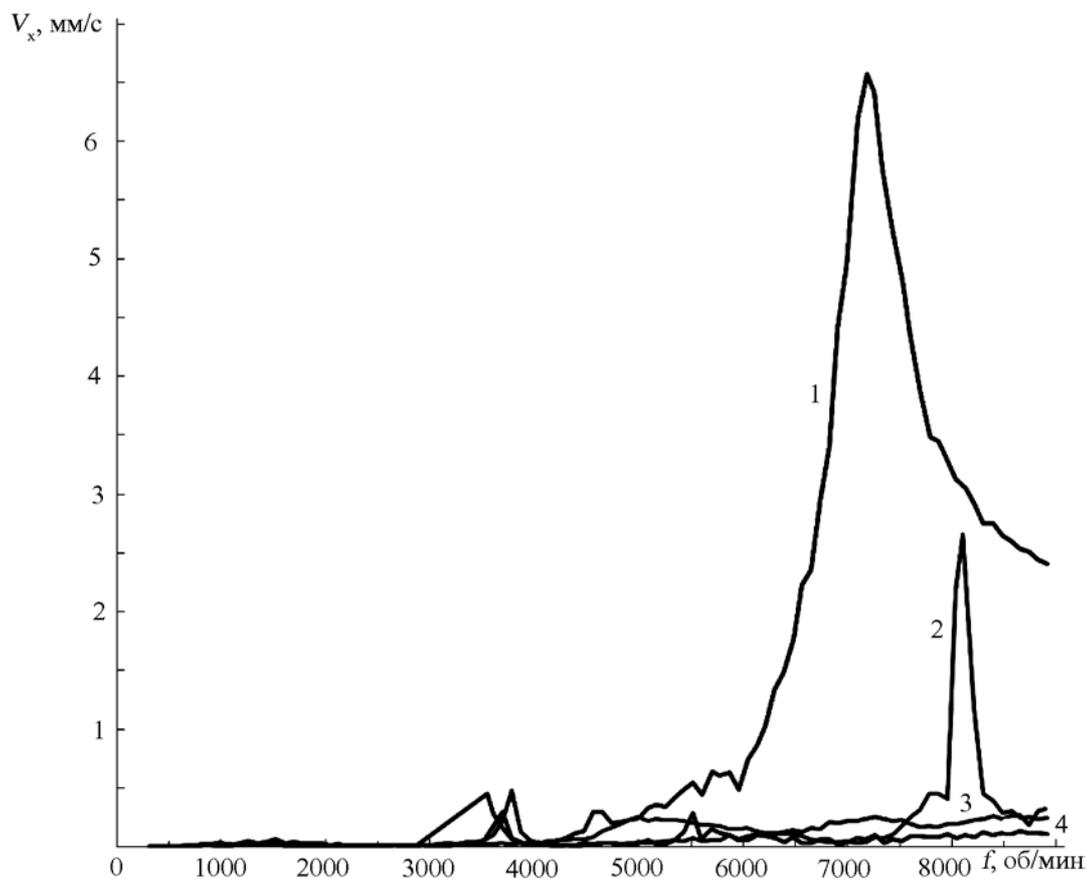


Рис. 4. Уровни общих значений виброскорости на выбеге анода с 9000 до 300 об/мин, измеренные для четырех узлов вращения различной осевой жесткости

РТ имела минимальный остаточный дисбаланс и малое время эксплуатации, исчисляемое несколькими часами.

Таким образом, можно сделать вывод о незначительности вклада статического эксцентриситета в общий уровень вибраций РТ при установке ее в статор с точностью, обеспечиваемой конструкцией излучателя.

К механическим источникам вибраций можно отнести дисбаланс вращающихся масс узла вращения, несоосность посадочных мест подшипника, отклонения формы, тепловую деформацию узла вращения, прогиб вала и др. [3], [4].

На рис. 3 представлен измеренный на испытательном стенде спектр амплитуды виброскорости стандартного узла вращения РТ снимочного типа. Наличие в спектре вибросигнала гармоник оборотной частоты свидетельствует о биении вала. Максимальная амплитуда виброскорости присутствует на оборотной частоте и составляет 0,7 мм/с, что соотносится с величиной дисбаланса для данного узла вращения. Этот вывод хорошо согласуется с экспериментальными фактами и их интерпретациями, приведенными в работах [4], [5] для механизмов вращения подобного типа.

Проведение дополнительной, более тщательной, балансировки позволило уменьшить величину виброскорости на оборотной частоте вдвое, а также снизить общий уровень вибраций в 2,5 раза.

Таблица 1

#### Сравнительные характеристики исследуемых сборок

№ узла вращения	Усилие осевого поджатия, кг	Максимальный уровень шума, дБ·А	Максимальное значение виброскорости, мм/с
1	12	78	6,60
2	14	72	2,60
3	8	66	0,48
4	6	61	0,30

Увеличение частоты вращения и рабочей температуры анода приводит к возникновению значительных внутренних напряжений, приближающихся к пределу механической прочности материалов. Это обстоятельство в еще большей степени ужесточает требования к точности изготовления и балансировке узлов вращения. В целях изучения факторов, влияющих на вибрационные и шумовые характеристики скоростных РТ, был проведен виброанализ четырех узлов вращения, имеющих различную степень жесткости сборки в осевом направлении. Степень жесткости сборки характеризовалась усилием осевого натяга. Вибрационные характеристики, измеренные для исследуемых сбо-

рок, представлены на рис. 4 и в табл. 1. Следует отметить, что уровень шума, измеренный при выбеге анода, точно отражает прохождение узлов вращения максимумов значений виброскорости. Разница в уровне шума между образцами с максимальным и минимальным значениями виброскорости составила 17 дБ.

Изменение усилия осевого натяга сборки позволило сместить максимальный пик колебаний узлов вращения за границу рабочих частот и добиться тихой и плавной работы узла вращения. Полученные результаты были учтены при отработке методики сборки узлов вращения скоростных РТ.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что метод вибродиагностики может быть рекомендован для решения задач по диагностированию рентгеновских трубок с вращающимся анодом; он также предоставляет возможность надежного и нетрудоемкого контроля качества узлов вращения РТ в процессе производства.

#### Список литературы:

1. Санитарные нормы допустимого шума, создаваемого изделиями медицинской техники в помещениях лечебно-профилактических учреждений. № 3057-84.
2. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986. 208 с.
3. Rodriguez I., Alves R. Detection of the Combination of Static and Dynamic Air Gap Eccentricity in 3-Phase Induction Motors Using Stator Current Monitoring. Book of Abstracts. Conference Record CD // IEEE Transactions and Monograph on «Recent Advances on Electrical Machines» of the 17th International Conference on Electrical Machines – ICEM2006. September 2-5. 2006. Chania. Crete Island. Greece.
4. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. – Пермь, 1996. 235 с.
5. Ширман А., Соловьев А. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М.: 1996. 276 с.

Иван Сергеевич Лобанов,  
инженер-радиофизик,  
ГНЦ ИФВЭ,  
Василий Николаевич Столяров,  
инженер,  
Иван Николаевич Столяров,  
инженер,  
ЗАО «Рентгенпром»,  
г. Москва,  
e-mail: Lobanovi@ihep.ru