

## Выводы

1. Среднеквадратическое значение процесса программного нагружения с достаточной точностью определяется выражением (4).
2. Для определения моментов процесса колебаний при программных нагружениях можно использовать распределение Райса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М., «Сов. радио», 1966.
2. Костин В. И. Сравнительная оценка интенсивности вибрации с переменной во времени амплитудой эквивалентным значением виброскорости гармонических колебаний. «Проблемы прочности», 1974, № 9.

УДК 534.002.23:621.45.452

*Е. В. Чехохуд, М. К. Сидоренко, П. П. Власов,  
С. М. Дорошко, Ю. В. Киселев, Н. А. Камынин*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСБАЛАНСА РОТОРА НА ВИБРАЦИЮ АВИАЦИОННОГО ГТД

В вибрационной диагностике большое значение имеют тестовые эксперименты с искусственно внесенными дефектами, так как они позволяют решить такие важные вопросы, как выбор наиболее информативных режимов работы двигателя, числа и места размещения вибропреобразователей и т. д. Такие эксперименты с целью исследования влияния технического состояния роторов на характер вибрации проводились на ДТРД небольшой тяги.

Исследовались вибрационные характеристики двигателя в исходном состоянии и при двух видах дисбаланса: механическом и аэродинамическом. Дополнительный механический дисбаланс по компрессору  $\delta_k$  создавался путем постановки грузика на диск первой ступени компрессора низкого давления (НД). Устанавливались три градации  $\delta_k$  — 60, 125 и 170 Г·см. Кроме того, с помощью грузика в плоскости диска третьей ступени турбины увеличивался механический дисбаланс  $\delta_t$  по турбине НД до величины 100 Г·см.

Для создания искусственного аэродинамического дисбаланса подрезалась одна седьмая часть лопатки первой ступени компрессора НД, и полученный механический дисбаланс уравновешивался.

В качестве вибропреобразователей использовались штатные индукционные вибропреобразователи МВ-26. Один из преобразователей устанавливался на штатном месте разделительного корпуса (в дальнейшем он обозначен как И1), второй — вертикально в верхней точке корпуса задней опоры турбины (И2).

Обработка результатов эксперимента проводилась двумя способами. Первый способ заключался в измерении интенсивностей первых гармоник роторной вибрации каскадов низкого и высокого давлений с помощью следящего спектрального анализатора гармоник, разработанного и выполненного в Белгосуниверситете. Полоса анализа выбиралась равной 2 Гц при времени осреднения 2 с. Синхронизация следящего анализатора осуществлялась с помощью импульсных индукционных преобразователей, один из которых (по ротору НД) устанавливался против штыря на диске первой ступени, а второй (по ротору ВД) — против двух штырей, установленных на диске, вращающемся от привода гидронасоса. Снимались зависимости интенсивностей исследуемых составляющих вибрации от частоты вращения соответствующего ротора. Режим двигателя изменялся ступенями через 60—120 об/мин (всего порядка 30—50 точек для каждой составляющей).

Второй способ заключался в определении зависимостей интенсивностей исследуемых составляющих вибрации от частоты вращения ротора при плавном наборе оборотов в исследуемом диапазоне с помощью следящего спектрального анализатора, выполненного в Куйбышевском авиационном институте.

На совмещенных графиках приведены зависимости, полученные обоими способами.

На рис. 1 приведены зависимости интенсивности первой гармоники роторной вибрации компрессора НД от режима двигателя по вибропреобразователю И1. Сплошные кривые соответствуют нормальному состоянию ( $\delta_k = 0$ ) исследуемого ДТРД и внесенному дополнительно механическому дисбалансу  $\delta_k$ ; равному 60, 125 и 170 Г·см. Пунктирная кривая соответствует аэродинамическому дисбалансу.

При  $\sigma_k = 60$  Г·см интенсивность первой гармоники роторной вибрации и характер ее зависимости от частоты вращения ротора изменились незначительно по сравнению с нормальным состоянием. По-видимому, дисбаланс вносился вблизи «легкого» места ротора. При дисбалансах 125 и 170 Г·см интенсивность вибрации значительно увеличилась, при этом характер ее зависимости по режимам двигателя остался примерно таким же: максимум интенсивности на низких частотах и затем тенденция к уменьшению ее. Наибольшее увеличение интенсивности произошло при 70—80 Гц, т. е. в районе повышенной вибрации ротора компрессора НД.

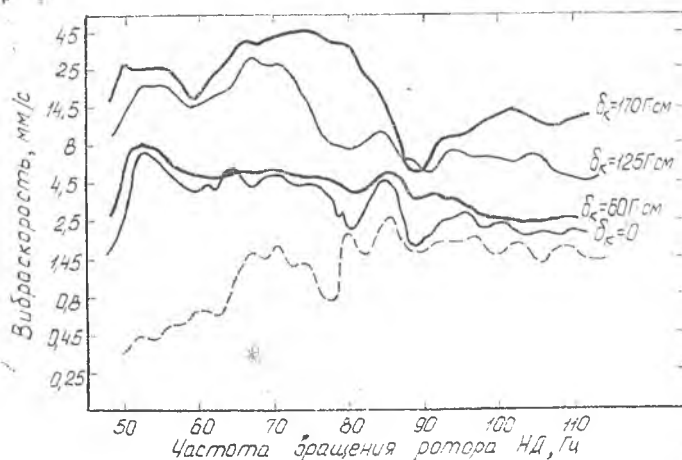


Рис. 1. Зависимости интенсивности первой гармоники вибрации компрессора режима по вибропреобразователю И1

При введении аэродинамического дисбаланса изменялся характер зависимости интенсивности от частоты вращения ротора. — наблюдалась тенденция к нарастанию интенсивности вибрации, что указывает на возможность разделения массового и аэродинамического дисбалансов для данного типа двигателей.

Характер изменения интенсивности вибрации заднего корпуса по преобразователю И2 также существенно деформировался при увеличении дисбаланса компрессора НД (рис. 2), несмотря на жесткую связь роторов турбины и компрессора с помощью длинного шлицевого вала и соединительного болта. Увеличение дисбаланса турбины НД  $\delta_T$  до 100 Г·см

привело к незначительному возрастанию интенсивности при сохранении характера зависимости ее от частоты вращения ротора. Меньшее влияние дисбаланса на турбине по сравнению с дисбалансом по компрессору объясняется, по-видимому, особенностями расположения плоскостей, в которые вносятся дисбаланс относительно опор: диск первой ступени компрессора расположен консольно, диск третьей ступени турбины — между опорами, жесткость задней опоры примерно в 8 раз больше, чем передней. К тому же преобразователь И2 расположен непосредственно под силовым ребром опоры.

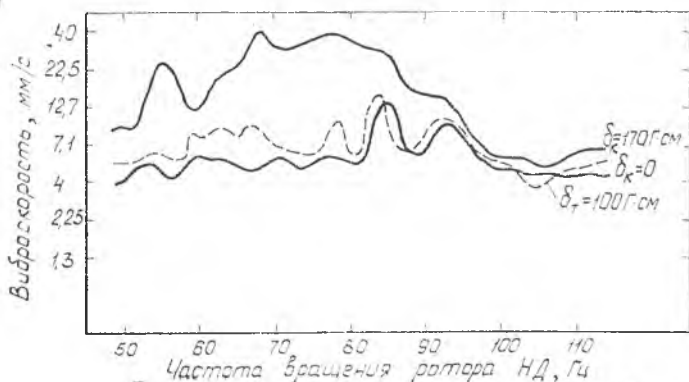


Рис. 2. Зависимости интенсивности первой гармоники вибрации компрессора ИД от режима по вибропреобразователю И2

Зависимость уровня первой гармоники вибрации ротора высокого давления свидетельствует о наличии двух областей повышенной вибрации в интервалах частоты вращения 135—150 Гц и 200—220 Гц (рис. 3). Эти области ярче проявляются по вибропреобразователю И2 (сплошные кривые).

При увеличении дисбаланса компрессора НД характер изменения интенсивности первой гармоники вибрации ротора ВД в целом остается прежним. Наибольшие отклонения (см. рис. 3) наблюдаются при малых значениях интенсивности в интервале частоты вращения ротора ВД 165—185 Гц, что свидетельствует о слабой связанности вибрации, возбуждаемой разными роторами.

Для сравнения диагностической чувствительности интенсивностей отдельных составляющих и общего уровня вибрации в эксперименте по штатной аппаратуре ИВ-300 опреде-

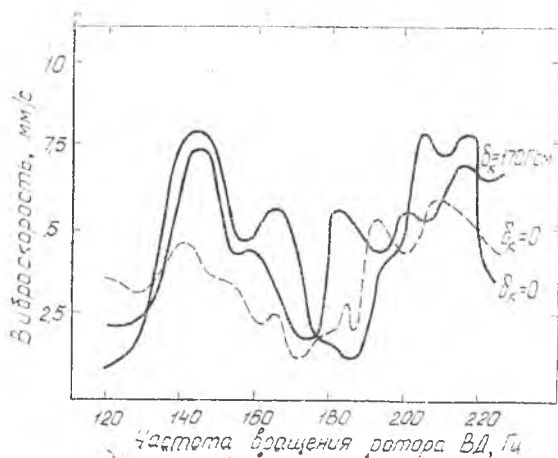


Рис. 3. Зависимости интенсивности первой гармоники вибрации ротора ВД от режима

лялась зависимость общего уровня виброскорости от частот вращения роторов при различных дисбалансах по вибропреобразователям И1, И2 (рис. 4 а, б). При малых величинах вносимого дисбаланса характер изменения общего уровня по режимам не связан определенно с зависимостями интенс-

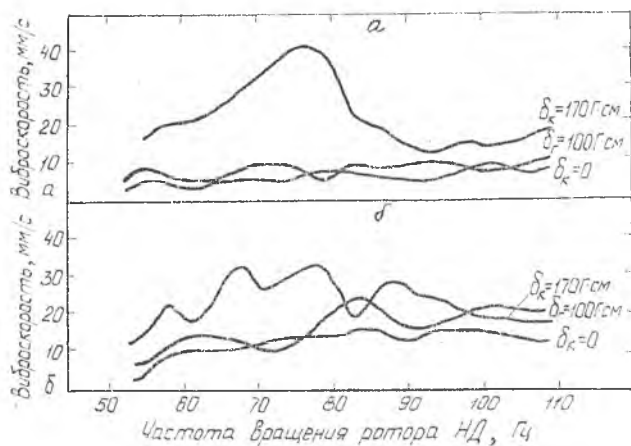


Рис. 4. Зависимость общего уровня вибрации от режима: а — по вибропреобразователю И1; б — по вибропреобразователю И2

ностей какой-либо составляющей. При больших дисбалансах (на рис. 4 при  $\delta_k = 170$  Г·см) изменение общего уровня соответствует изменению интенсивности наиболее сильной составляющей (в данном случае первой гармонике вибрации ротора НД).

Таким образом, вполне возможно разделение дисбалансов роторов НД и ВД по вибрации при отдельном измерении интенсивностей первых гармоник роторной вибрации. В то же время при измерении общего уровня вибрации по штатной аппаратуре отражается практически лишь вибрационное состояние ротора НД. Это свидетельствует о необходимости применения в диагностике метода отдельных оценок интенсивностей составляющих общей вибрации как обладающего расширенными диагностическими возможностями.

Как оказалось, чувствительность вибрации к дисбалансу зависит от режима двигателя. При увеличении механического дисбаланса наибольшие изменения уровня вибрации наблюдались в интервале 50—85 Гц по частоте вращения ротора НД по обоим вибропреобразователям. На более высоких режимах увеличение уровня не столь существенно, в ряде случаев наблюдалось даже уменьшение. Поэтому при диагностировании по уровню составляющих спектра вибрации необходимо выбирать информативный режим.

Учитывая флуктуирующее изменение интенсивностей по режимам, более надежную оценку можно получить при суммировании интенсивностей по нескольким режимам. Это обуславливает необходимость разработки интегральных оценок представления зависимостей интенсивности диагностических составляющих от частоты вращения ротора и интегральных оценок отличий в зависимостях.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что в оценках должны отражаться средний по режимам уровень интенсивности, размах флуктуаций интенсивности, средний наклон кривых. В качестве оценок этих зависимостей можно предложить среднее значение, среднее квадратическое отклонение и угол наклона прямой, аппроксимирующий данную зависимость по методу наименьших квадратов. Определить отличия можно с помощью среднее квадратического расстояния и коэффициента корреляции.

Для подтверждения эффективности рассмотренных диагностических оценок необходимы дополнительные эксперименты.