

М. К. СИДОРЕНКО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ МЕТОДОМ ПРОСТУКИВАНИЯ

В современных ГТД трубопроводы занимают по количеству второе место после лопаток. Разрушение любого трубопровода вызывает серьезные нарушения в работе двигателя, поэтому надежность трубопроводов приобретает особое значение. Дефекты трубопроводов составляют значительную долю от всех прочностных дефектов ГТД и в подавляющем большинстве связаны с вибрациями.

Основную опасность, как показывает практика, представляют резонансные колебания трубопроводов в диапазоне от 100 до 200—300 гц, возбуждаемые дисбалансом ротора или работой форсажной камеры.

Эффективным способом уменьшения вибраций, кроме демпфирования, является отстройка вверх собственных частот колебаний трубопроводов от наиболее опасных частот возбуждения.

С этой целью расчетом определяют предельные длины участков трубопроводов между зажимами, при которых частота основного тона колебаний на 20—25% выше опасных частот возбуждения. После обвязки двигателя производится экспериментальная проверка отстройки, так как расчетом не учитываются податливость зажимов, разъемов, конфигурация трубопровода и т. д.

Тензометрирование каждого пролета трубопроводов — весьма трудоемкая работа, которая затягивается на месяцы.

Очень эффективным средством проверки отстройки является «метод простукивания». Трубопровод возбуждается ударом и записываются его затухающие колебания, по которым сравнительно легко можно определить 2—3 низшие частоты и декременты колебаний.

Основным достоинством этого известного метода применительно к трубопроводам является высокая производительность, оперативность и несложность применяемой аппаратуры. Он поз-

воляет производить измерения непосредственно на собранном для испытаний двигателе, с учетом всех особенностей монтажа. Простукиваются сухие трубопроводы, влияние заполняющей жидкости на собственные частоты составляет несколько процентов и достаточно точно учитывается расчетом.

Практически для простукивания (с записью осциллограмм) 100—200 участков трубопроводов двигатель задерживается в сборочном цехе всего на 4—6 часов.

По результатам простукивания проводятся мероприятия по повышению частот недостаточно отстроенных участков. Отстройка может производиться и на макете.

Простукивание значительно сокращает объем тензометрирования: неотстроенные трубопроводы отстраиваются до тензометрирования, а отстроенные тензометрируются выборочно.

Простукивание позволяет также быстро устранять дефекты путем оперативной проверки нескольких мероприятий с последующим тензометрированием только наилучшего варианта. Результаты могут быть получены сразу же, без записи и расшифровки осциллограмм.

ВОЗБУЖДЕНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Для успешного применения метода простукивания необходимо учитывать некоторые особенности затухающих колебаний трубопроводов. Поскольку интерес представляют только низшие собственные частоты, то необходимо принять меры, чтобы не возбуждались обертоны. Также полезно уяснить причины изменения видимых частот колебаний, исчезновение одних и появление других частот на осциллограммах.

При возбуждении ударом движение каждой точки трубопровода представляет собою наложение колебаний ее во всех возбужденных собственных формах. Запись такого движения является проекцией его на направление измерения.

Интенсивность возбуждения той или иной формы колебаний зависит от характера, места и направления удара, а вид записи — от направления измерения и характеристик измерительных приборов.

Для примера рассмотрим прямую свободно опирающуюся трубку, сплюснутую в плоскости XOZ (фиг. 1). Она имеет две плоскости главных колебаний XOY и XOZ . В каждой из плоскостей может возбуждаться бесчисленное множество собственных форм колебаний, первые четыре из которых показаны на фиг. 1. Каждой форме соответствуют две частоты колебаний: более низкая в плоскости XOY и более высокая в плоскости XOZ .

При ударе роль оси y или z возбуждаются собственные формы колебаний только в соответствующей плоскости.

Перемещение места удара по длине трубки изменяет интенсивность возбуждения различных форм. При ударе под некоторым углом α к плоскости XOY (фиг. 1) одновременно возбуждаются колебания в обеих плоскостях.

Если возбуждать ударами под постоянным углом α только 1-ю форму колебаний и обходить датчиком трубку по окружности в сечении x , то полученные осциллограммы представляют собою двухкомпонентные затухающие кривые, вид которых зависит от направления измерения (фиг. 2):

$$\xi_x = Y_x e^{-\delta_y t} \cos \alpha \cos p_y t + Z_x e^{-\delta_z t} \sin \alpha \cos (\bar{P}_z t + \varphi),$$

где Y_x и Z_x — амплитуды первого колебания точки с координатой x , после отскока молотка;

δ_y и δ_z — коэффициенты затухания;

p_y и p_z — частоты первой формы колебаний в плоскостях XOY и XOZ ;

φ — начальный фазовый угол;

ξ_x — перемещение сечения x в направлении ξ .

При близком отношении частот p_y и p_z возникают затухающие биения (фиг. 2):

$$\xi_x = A \cos(pt + \psi),$$

где $A = \sqrt{(Y_x e^{-\delta_y t} \cos \alpha)^2 + (Z_x e^{-\delta_z t} \sin \alpha)^2}$,

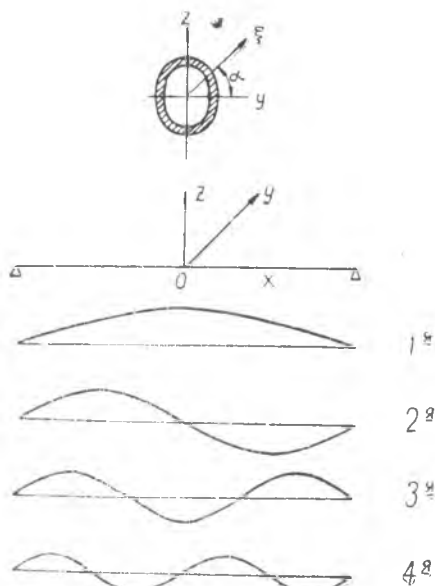
$p = p_x$ или p_z (см. ниже);

ψ — фазовый угол.

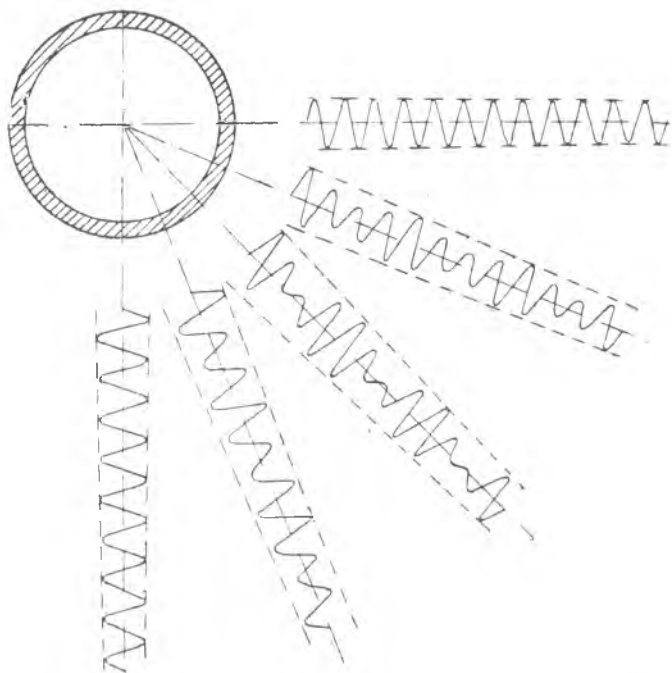
В обоих случаях только в направлениях y или z осциллограмма будет иметь вид затухающей синусоиды с частотой \bar{P}_y или \bar{P}_z соответственно.

Иногда наблюдается изменение видимой частоты затухающих биений. Как известно, при незатухающих биениях частота колебаний непрерывно периодически изменяется [1], [2]. Видимая частота, средняя за период биений, равна частоте главной компоненты, имеющей большую амплитуду.

При затухающих биениях, если коэффициенты затухания различны, второстепенная компонента с течением времени может



Фиг. 1.



Фиг. 2.

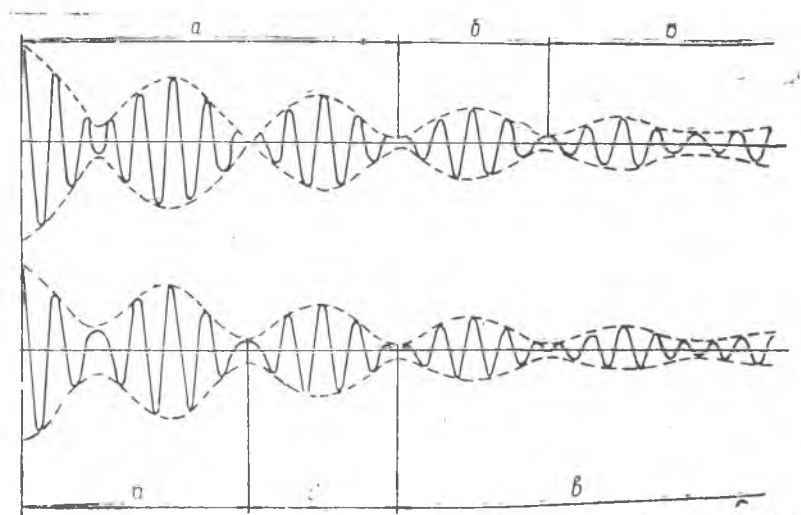
стать главной и произойдет изменение видимой частоты. Она изменяется при равенстве текущих амплитуд компонент

$$y_x e^{-\delta_1 t} \cos \alpha = z_x e^{-\delta_2 t} \sin \alpha.$$

Такие явления происходят в случаях, когда компонента с большим затуханием имеет большую начальную амплитуду.

Осциллограммы имеют вид, показанный на фиг. 3. Здесь декремент затухания одной компоненты равен 0,1; другой — 0,05. Сочетание затуханий и начальных амплитуд таково, что в первом случае (верхняя кривая) более высокая видимая частота изменяется на более низкую, а во втором — наоборот. На участках *a* видимая частота, как и в случае незатухающих биений, равна частоте одной компоненты, на участке *b* — другой, а на участке *б* — среднему значению между частотами компонент. При большом отношении частот в таких случаях происходит маскировка меньшей компоненты большей: на осциллограмме сначала видна только одна компонента, потом обе и только затем другая.

Для облегчения анализа осциллограмм надо поочередно возбуждать и записывать колебания в главных плоскостях. Достаточно чистое возбуждение 1-й формы обеспечивается ударом в середине пролета металлическим молоточком с резиновой накладкой, если запись производится также в этой плоскости.



Фиг. 3.

При небольшом отклонении ($15-20^\circ$) от плоскостей главных колебаний получаются двухкомпонентные кривые, на которых преобладает одна из компонент.

Обработка таких кривых не представляет особых трудностей, если отношение их частот не близкое к 1 (фиг. 2).

В случае биений с большим периодом колебания могут исчезнуть раньше периода биений, но ввиду малой разницы частот достаточно определить частоту только одной компоненты.

Декременты колебаний двухкомпонентных кривых надежно определяются методом огибающих только в случае биений, поэтому лучше записывать отдельно каждую из компонент.

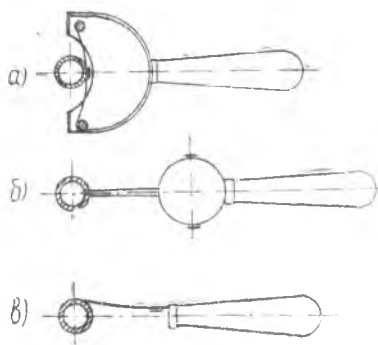
АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве датчиков вибрации применяются виброщупы с волоочными преобразователями (фиг. 4). Несмотря на малый вес и малую жесткость упругих элементов этих виброщупов, присоединение их к трубкам малого диаметра ($4-8$ мм) может существенно изменить собственные частоты и декременты колебаний трубок. Влияние щупа на частоту трубки зависит от соотношения масс и жесткостей трубки и щупа, от конфигурации и заделки трубки, от места присоединения щупа к трубке.

Влияние на декремент, кроме этого, зависит еще от соотношения декрементов щупа и трубки и всегда больше, чем влияние на частоту.

Максимальные погрешности получаются в случае присоединения

щупа в середине пролета прямой заземленной тонкой трубки. Рациональной конструкцией виброщупа можно уменьшить погрешности измерений до требуемой величины. Для уменьшения погрешностей необходимо уменьшить вес и жесткость щупа, декремент колебаний щупа должен быть близок к декрементам колебаний исследуемых трубок, а собственная частота близка к заданной частоте отстройки, чем обеспечиваются минимальные погрешности в наиболее важном диапазоне частот.

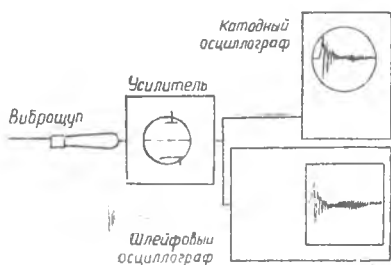


Фиг. 4.

поперечных размеров он неудобен для исследования трубопроводов близко расположенных к корпусу двигателя. Кроме того, он оказывает значительное влияние на низкочастотные трубки ($100 \div 150$ гц) малого диаметра: повышает частоту на 20—30%. Снижение собственной частоты этого щупа требует дальнейшего увеличения поперечных размеров.

Наиболее удобным в работе является щуп типа б с кольцевым упругим элементом. Его собственная частота 100 гц, приведенный вес 7 г. Но он также оказывает заметное влияние на высокочастотные трубки ($250 \div 350$ гц) малого диаметра: понижает их частоту на 10—15%.

Наименьшее влияние оказывает щуп типа в с упругим элементом в виде консоли равного сопротивления. Его собственная частота 110 гц, приведенный вес 0,25 г.



Фиг. 5.

У этих щупов в качестве преобразователя перемещений в электрический ток применяются тензометры с базой 5 или 10 мм. В настоящее время проводятся работы по уменьшению веса наиболее удобного в работе щупа типа б.

Для записи колебаний трубок применяются обычная тензометрическая аппаратура (фиг. 5). Простукивается каждый участок трубопровода в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Прямые или не-

сильно изогнутые трубки простукиваются в середине, для более сложных участков составлена таблица с указанием мест и направлений ударов.

При простукивании часто возникают интенсивные низкочастотные колебания различного происхождения (фиг. 6). Для подавления их применяются простейшие RC-фильтры.



Фиг. 6.

С помощью узкополосного анализатора, последовательно включенного в измерительную цепь, можно записать не только низкочастотные, но и все возбуждаемые колебания, но декременты колебаний в этом случае определить нельзя.

Анализатором можно проводить измерения и без записи. Трубка возбуждается ударами приблизительно одинаковой силы. Плавно перестраивая резонансную частоту анализатора, определяют частоты, дающие максимальное отклонение стрелочного прибора анализатора. Значения этих частот соответствуют собственным частотам трубки. Точность измерений тем больше, чем меньше декремент забухания колебаний трубки.

Метод простукивания оказывает существенную помощь в доводке трубопроводов по вибропрочности. Он может применяться при различных лабораторных исследованиях. Например, при определении контактной, изгибной и угловой податливостей различных зажимов, влияния обычных и демпфирующих зажимов на вибрацию трубок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Мэнли, Анализ и обработка записей колебаний, Машгиз, 1948.
2. А. Н. Попов, Математический анализ биений, Госэнергоиздат, 1956.
3. Я. И. Коритынский, Новый универсальный виброметр, «Вестник машиностроения», № 10, 1952.