

УДК 621.824.002.73

ВИБРОДИАГНОСТИКА РАСЦЕНТРОВКИ ВАЛОВ, СОЕДИНЕННЫХ ЗУБЧАТЫМИ И ШЛИЦЕВЫМИ МУФТАМИ

©2009 А. Д. Росляков¹, В. А. Николаев¹, А. Е. Сундуков², Е. В. Сундуков¹

¹ОАО “Моторостроитель”

²Самарский государственный университет путей сообщения

Выполнен теоретический анализ спектра вибрации, генерируемой расцентровкой валов, соединённых шлицевыми и зубчатыми муфтами. Впервые показано при каких условиях возможна генерация третьей гармоники частоты вращения роторов. Результаты анализа подтверждены экспериментальным материалом.

Расцентровка валов, муфты, спектр вибрации, первая, вторая, третья гармоники

При эксплуатации агрегатов, состоящих из двигателя и нагрузки, часто возникают вибрации, вызванные расцентровкой их валов. Сложность диагностики этого явления по параметрам вибрации обусловлена тем, что основная частота колебаний, связанная с этим дефектом, равна частоте вращения роторов. Изменение уровня вибрации на этой частоте может быть вызвано и другими источниками (повышенным дисбалансом или зазором в подшипнике, боем валов

или муфты и т.д.). Возможные варианты расцентровки представлены на рис. 1. При радиальном смещении валов их оси параллельны и смещены на величину δ . При угловой расцентровке оси валов расположены под углом γ и пересекаются в геометрическом центре муфты. Валы с радиальным и угловым смещением, в общем случае, будут скрещиваться под некоторым углом ξ .

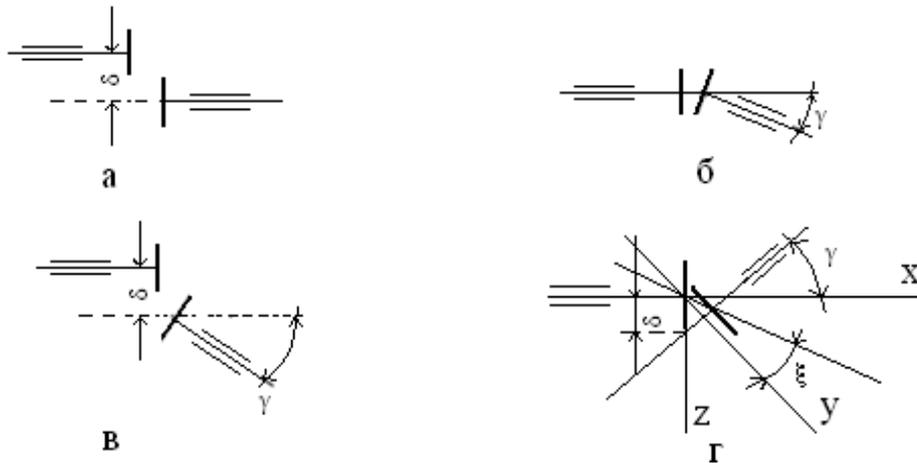


Рис. 1. Случаи несоосности валов с одной муфтой: а – радиальная; б – угловая; в – радиальная и угловая (расположены в одной плоскости); г – скрещивающиеся валы

При соединении валов жесткой контактной муфтой (зубчатой, шлицевой) в случае расцентровки даже при равномерном вращении ведущего вала ведомый будет вращаться неравномерно [1]. Рассмотрим, какие колебания генерируются таким соединением валов. Угол поворота ведомого вала β связан с углом поворота ведущего вала α соотношением [1]

$$tg\beta = \frac{r \cos \gamma \sin \alpha - \delta \sin \xi}{r \cos \alpha - \delta \cos \xi}, \quad (1)$$

где r – радиус точки приложения крутящего момента в муфте.

В случае только углового смещения $\delta = 0$, тогда соотношение (1) примет вид $tg\beta = tg\alpha \cos \gamma$.

Следовательно,

$$\beta = \arctg(\operatorname{tg}\alpha \cos \gamma). \quad (2)$$

Определим угловую скорость вращения ведомого вала ω_2 . Для этого продифференцируем соотношение (2) по времени. После несложных преобразований получим

$$\frac{d\beta}{dt} = \omega_2 = \frac{\cos \gamma}{\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos^2 \gamma} \omega_1, \quad (3)$$

где ω_1 – угловая скорость ведущего вала.

Учитывая, что ведомый вал вращается неравномерно, определим его угловое ускорение. Продифференцировав соотношение (3) по времени и сделав преобразования, получим угловое ускорение ведомого вала:

$$\frac{d\beta}{dt} = \dot{\omega}_2 = \frac{\cos \gamma \sin 2\alpha (\cos \gamma - 1)}{\sin^4 \alpha + \frac{\cos^2 \gamma}{2} \sin^2 2\alpha + \cos^4 \alpha \cos^4 \gamma} \omega_1^2. \quad (4)$$

Присутствие составляющих с двойным углом α свидетельствует о наличии колебаний со второй гармоникой частоты вращения ведущего вала.

Для радиальных смещений ($\gamma = 0$) соотношение (1) примет вид

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{r \sin \alpha - \delta \sin \xi}{r \cos \alpha - \delta \cos \xi}.$$

Тогда

$$\beta = \arctg\left(\frac{r \sin \alpha - \delta \sin \xi}{r \cos \alpha - \delta \cos \xi}\right).$$

Угловая скорость вращения ведомого вала

$$\omega_2 = \frac{r^2 - r\delta(\cos \xi \cos \alpha + \sin \xi \sin \alpha)}{r^2 + \delta^2 - 2r\delta(\cos \xi \cos \alpha + \sin \xi \sin \alpha)} \omega_1.$$

Выражение для $\dot{\omega}_2$ получается громоздким, но в нём присутствует составляющая $\sin 2\alpha$, что свидетельствует о наличии второй гармоники частоты вращения ведущего вала.

Для общего случая

$$\beta = \arctg\left(\frac{r \sin \alpha \cos \gamma - \delta \sin \xi}{r \cos \alpha - \delta \cos \xi}\right). \quad (5)$$

Отсюда

$$\omega_2 = \frac{r^2 \cos \gamma - r\delta \cos \gamma (\cos \xi \cos \alpha + \sin \xi \sin \alpha)}{(r \cos \alpha - \delta \cos \xi)^2 + (r \cos \gamma \sin \alpha - \delta \sin \xi)^2} \omega_1. \quad (6)$$

Выражение для углового ускорения получается весьма громоздким. Однако в нём имеются составляющие с углом 2α . Кроме того, присутствуют комбинации вида

$$r^3 \delta \cos^3 \gamma \sin^3 \alpha - 2r^3 \delta \cos \xi \cos \gamma \sin \alpha. \quad (7)$$

Выражение (7) можно записать как

$$\frac{r^3 \delta \cos^3 \gamma}{4} \left(\frac{8 \cos \xi}{\cos^2 \gamma} \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha \right). \quad (8)$$

При $\frac{8 \cos \xi}{\cos^2 \gamma} = 3$ (8) примет вид

$$\frac{r^3 \cos^3 \gamma}{4} (3 \sin \alpha - 4 \sin^3 \alpha).$$

Соотношение в скобках есть $\sin 3\alpha$. Следовательно, при определенной комбинации углов ξ и γ возможно появление 3 гармоники. Например, при $15^\circ \geq \gamma > 0$, ξ находится в пределах $68...69^\circ$. Поэтому проявление третьей гармоники встречается достаточно редко.

Рассмотрим соединение валов торсионным валом (рис. 2). Здесь α, β, β' – углы поворота соответственно ведущего, торсионного и ведомого валов; а, б – ведущая и ведомая полумуфты муфты; M_1, Γ – ведущая и ведомая полумуфты муфты; M_2, ψ – угол скручивания торсионного вала. Для этого случая в работе [2] получено выражение, связывающее углы поворота ведомого и ведущего валов

$$\operatorname{tg}\beta' = \frac{\cos \gamma_2 \operatorname{tg}\alpha (1 + \operatorname{tg}^2 \psi)}{\cos \gamma_1 - \operatorname{tg}\alpha \operatorname{tg}\psi + \cos^2 \gamma_2 \operatorname{tg}\Psi (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\psi \cos \gamma_1)}. \quad (9)$$

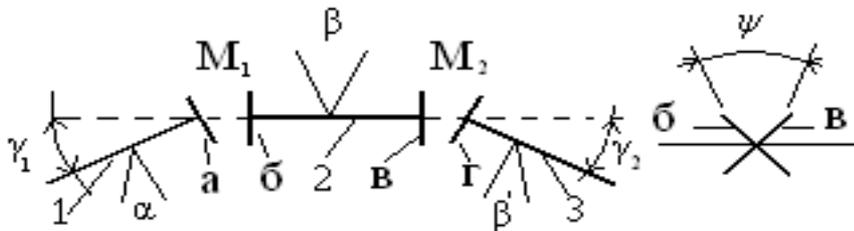


Рис. 2. Схема несоосности валов с двумя муфтами M_1, M_2 : 1 – ведущий вал; 2 – торсионный вал; 3 – ведомый вал

При анализе кинематики такого соединения рассматривается случай как для одноэлементной контактной муфты. Однако в [1] показано, что в этом случае полученные результаты можно распространить на все типы жестких многоэлементных контактных муфт.

Для случая $\gamma_2 = 0$ реализуются варианты, рассмотренные выше. Пусть $\psi = 0$ (т.е. считаем торсионный вал абсолютно жёстким), при $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$, (9) примет вид $tg\beta' = tg\alpha$. Следовательно, ведущий и ведомый валы вращаются синхронно.

При $\psi = 0$, $\gamma_2 \neq \gamma_1$, $tg\beta' = tg\alpha \frac{\cos\gamma_2}{\cos\gamma_1}$. Тогда

$$\beta' = arctg\left(tg\alpha \frac{\cos\gamma_2}{\cos\gamma_1}\right).$$

Угловая скорость ведомого вала определяется соотношением

$$\frac{d\beta'}{dt} = \omega_3 = \frac{\cos\gamma_1 \cos\gamma_2}{\cos^2\gamma_1 \cos^2\alpha + \cos^2\gamma_2 \sin^2\alpha} \omega_1.$$

Угловое ускорение

$$\dot{\omega}_3 = \frac{\cos\gamma_1 \cos\gamma_2 \sin 2\alpha (\cos^2\gamma_1 - \cos^2\gamma_2)}{(\cos^2\gamma_1 \cos^2\alpha + \cos^2\gamma_2 \sin^2\alpha)^2} \omega_1^2,$$

т.е. и здесь присутствует составляющая с двойной частотой.

Для случая $\psi \neq 0$, $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ выражение (9) примет вид

$$tg\beta' = \frac{\cos\gamma tg\alpha (1 + tg^2\psi)}{\cos\gamma - tg\alpha tg\psi + \cos^2\gamma tg\psi (tg\alpha + tg\psi \cos\gamma)}.$$

Отсюда

$$\beta' = arctg\left(\frac{\cos\gamma tg\alpha (1 + tg^2\psi)}{\cos\gamma - tg\alpha tg\psi + \cos^2\gamma tg\psi (tg\alpha + tg\psi \cos\gamma)}\right).$$

Выражения для ω_3 и $\dot{\omega}_3$ получаются громоздкими. Однако в них присутствуют составляющие, свидетельствующие о возможности появления колебаний с двойной частотой вращения ведущего вала.

Для общего случая ($\psi \neq 0, \gamma_1 \neq \gamma_2$) выражения для ω_3 и $\dot{\omega}_3$ ещё более громоздки. Но и здесь присутствуют составляющие с углом 2α .

Рассмотрим экспериментальные данные. При испытании двигателя НК-14СТ на стенде завода-изготовителя имели место случаи расцентровки с последующим заклиниванием в шлицевой муфте. Двигатель соединялся с гидротормозом торсионным валом по схеме, представленной на рис. 2. Расцентровка и заклинивание происходили на переходном режиме. В этом случае наблюдалось синхронное изменение уровня вибрации по осевым вибродатчикам, установленным на картере свободной турбины (СТ) и гидротормозе (рис. 3).

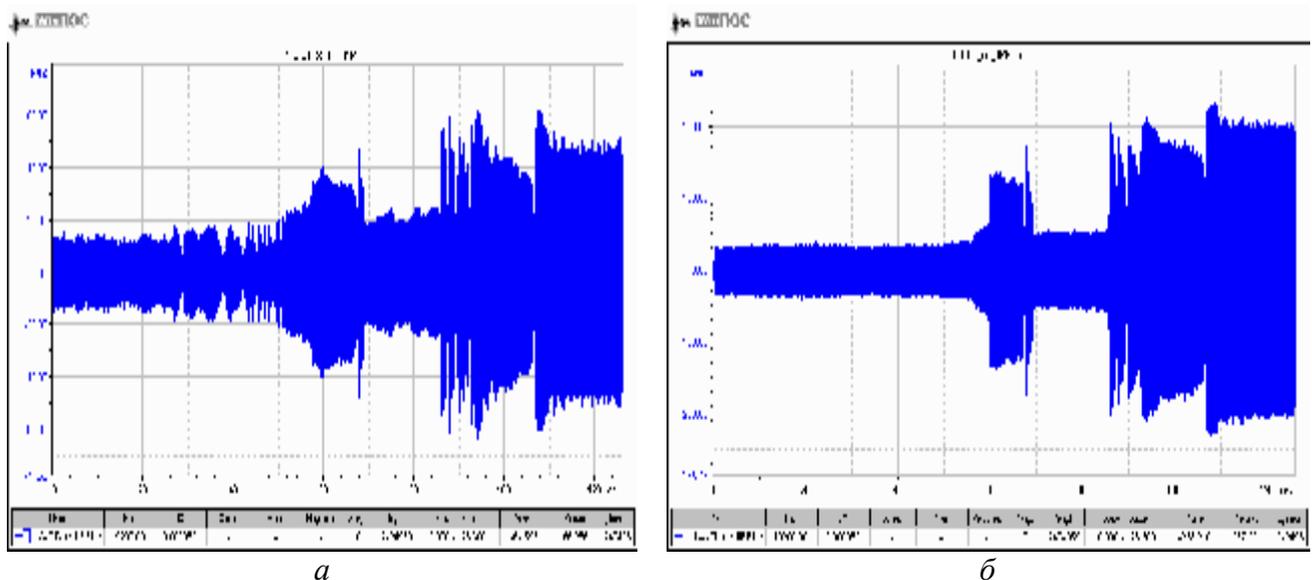


Рис. 3. Временные реализации осевой вибрации двигателя (а) и гидротормоза (б) на режиме перекадки ВНА

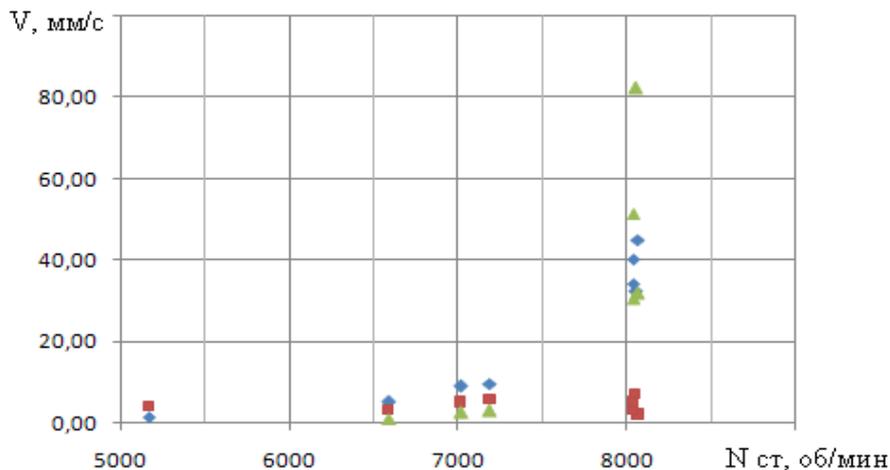


Рис. 4. Зависимость интенсивности осевой вибрации картера СТ от оборотов СТ:

◆ – 1; ■ – 2; ▲ – 3 гармоники

Зависимость интенсивности первых трех гармоник от оборотов вращения ротора СТ (рис. 4) показывает значительное увеличение интенсивности первой и третьей гармоник на оборотах расцентровки и заклинивания (>7200 об./мин).

Библиографический список

1. Кармадонов, А.Ф. Соединительные устройства валов/ А.Ф. Кармадонов - М.: Машгиз, 1959.-86 с.

2. Малаховский, Я.Е. Карданные передачи/ Я.Е. Малаховский, А.А. Лапин, Н.К. Веденеев. - М.: Машгиз, 1962. -153 с.

References

1. Karmadonov A.F. The connecting device shaft-M.: 1959.- p.86

2. Malahovskij J.E., Lapin A.A., Vedeneyev N.K. Gimbal drive. -M.: 1962.-p.153

VIBRATION DIAGNOSIS NOT CENTERED SHAFTS CONNECTED BY GEAR GEARING

©2009 A. D. Roslyakov¹, V. A. Nikolaev¹, A. E. Sundukov², E. V. Sundukov

¹JSC «Motorostroitel»

²Samara State University of Railway Transport

The theoretical analysis of a spectrum of the vibration generated by not centered shafts, connected by gear gearing. For the first time it is shown under what conditions generation of the third harmonic of frequency of rotation of rotors is possible. Results of the analysis are confirmed by an experimental material.

Not centered shaft, the vibration spectrum, the first, second, third harmonics

Информация об авторах

Росляков Алексей Дмитриевич, доктор технических наук, профессор, главный специалист ОАО «Моторостроитель». Тел. (846) 261-12-01. Область научных интересов: тепловые двигатели, диагностика.

Николаев Виталий Анатольевич, ведущий инженер-программист ОАО «Моторостроитель». Тел. (846) 925-61-33. Область научных интересов: цифровая обработка виброакустических процессов.

Сундуков Александр Евгеньевич, аспирант Самарского государственного университета путей сообщения. Тел. (846) 997-37-42; (846) 997-37-45. E-mail: Sundukov@dnmk.ru. Область научных интересов: вибрационная диагностика.

Сундуков Евгений Васильевич, кандидат технических наук, начальник отдела динамических процессов ОАО «Моторостроитель». Тел. (846) 952-50-62. Область научных интересов: вибрационная диагностика.

Roslyakov Alexey Dmitrievich, Doctor of Engineering Science, professor, chief specialist of JSC «Motorostroitel». Phone: (846) 261-12-01. Area of research: engines, diagnostics.

Nikolaev Vitaly Anatolievich, a leading engineer-programmer of JSC «Motorostroitel». Phone: (846) 925-61-33. Area of research: digital processing of vibro-acoustic.

Sundukov Alexander Evgenievich, post-graduate student of Samara State University of Railway Transport. Phone: (846) 997-37-42, 997-37-45. E-mail: Sundukov@dnmk.ru. Area of research: engines, diagnostics.

Sundukov Eugene Vasilievich, Candidate of Engineering Science, Head of the dynamic processes of JSC «Motorostroitel». Phone: (846) 952-50-62. Area of research: engines, diagnostics.