

КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВАЛОПРОВОДА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА И ИХ УЧЕТ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТЕПЕНИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ЕГО ВА- ЛА

Е.А. Кононова
(представил д.т.н., проф. Б.Т. Кононов)

Рассматривается методика определения частот и амплитуд собственных крутильных колебаний валопровода дизель-генератора для оценки степени их влияния на результаты определения степени неравномерности вращения.

Постановка проблемы. Наиболее информативным диагностическим параметром, с помощью которого возможно оценить техническое состояние отдельных цилиндров и двигателей внутреннего сгорания в целом, является степень неравномерности угловой частоты вращения его вала. Эту величину можно определить путем измерения отрезков времени, в течение которых происходит поворот вала двигателя на заданный угол. Простота определения диагностического параметра на самом деле является кажущейся, поскольку угол поворота коленчатого вала зависит не только от мгновенной угловой частоты вращения, но и от крутильных колебаний системы «коленчатый вал-маховик-ротор генератора». Естественно, что при использовании в качестве диагностического параметра величины степени неравномерности угловой частоты вращения его вала необходимо учитывать крутильные колебания, которые бывают собственными (свободными), определяемыми движением упругой системы после вывода ее из состояния равновесия, и вынужденными, определяемыми движением упругой системы, вызываемым приложенным возмущающим моментом.

Анализ литературы. В [1 – 5] рассмотрены теория и расчет крутильных колебаний. В основном в них рассматривались вопросы, связанные с решением прочностных задач. Крутильные колебания, возникающие в силовых установках, содержащих дизель-генераторы постоянного и переменного тока, рассматривались в [3]. Однако в этой работе крутильные колебания изучались как источники возникновения обменных колебаний активной мощности. Влияние крутильных колебаний на величину угла поворота коленчатого вала, а тем самым и на величину степени неравномерности не изучалось.

Целью настоящей статьи является определение частот и амплитуд

собственных крутильных колебаний силовой энергетической установки и установление взаимосвязи между этими величинами и степенью неравномерности вращения коленчатого вала.

Основной материал. Прежде чем перейти к рассмотрению процесса крутильных колебаний введем основные понятия. Под степенью неравномерности δ частоты вращения дизель-генератора будем понимать отношение разности между максимальной ω_{\max} и минимальной ω_{\min} угловыми скоростями к средней скорости $\omega_{\text{ср}}$ вращения вала, имеющими место в течение одного периода неравномерного движения

$$\delta = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / \omega_{\text{ср}}. \quad (1)$$

Неравномерность частоты вращения вызывается неодинаковостью крутящихся моментов источников и приемника энергии. У дизель-генератора неравномерность частоты вращения проявляется особо в связи с цикличностью работы дизеля, проявляющейся в том, что движущие силы действуют на его цилиндры периодически через определенный угол поворота вала. Неравномерность частоты вращения дизеля может вызываться, кроме того, возможными неисправностями отдельных цилиндров двигателя. Если величину степени неравномерности определять путем измерения интервалов времени, заданных угловыми отрезками, соответствующими углу поворота вала между моментами вспышек в различных цилиндрах, то тем самым возможно установить не только техническое состояние отдельных цилиндров, но и всего дизеля. Крутильные колебания могут вызывать изменения угла поворота вала и исказить результаты оценки совершенства работы цилиндров двигателя.

Рассмотрим задачу определения частот и амплитуд собственных крутильных колебаний на примере силовой установки с шестицилиндровым дизелем, оснащенный маховиком. Схема валопровода силовой установки приведена на рис. 1 ($I_1 \dots I_6$ – массовые моменты инерции цилиндров двигателя; I_m, I_r – массовые моменты инерции маховика и генератора; C_1, \dots, C_7 – крутильные жесткости участков валопровода).

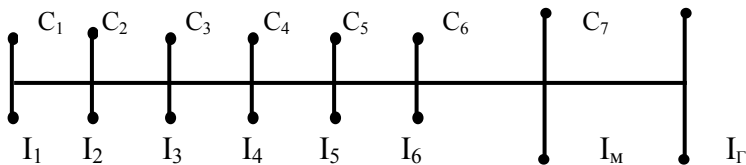


Рис. 1. Схема валопровода силовой установки

Уравнение равновесия моментов для первого участка валопровода без учета момента, вызываемого силами сопротивления движению, представим как

$$I_1\ddot{\varphi}_1 + C_1(\varphi_1 - \varphi_2) = 0, \quad (2)$$

где φ_1, φ_2 – углы отклонения первого и второго дисков от нейтрального положения; $I_1\ddot{\varphi}_1$ – инерционный момент первого диска; $C_1(\varphi_1 - \varphi_2)$ – момент упругих сил вала жесткостью C_1 .

На втором участке действует такой же момент $C_1(\varphi_1 - \varphi_2)$, но с обратным знаком, и, с другой стороны, момент упругих сил $C_2(\varphi_2 - \varphi_3)$. Тем самым для второго участка справедливо уравнение

$$I_1\ddot{\varphi}_1 - C_1(\varphi_1 - \varphi_2) + C_2(\varphi_2 - \varphi_3) = 0. \quad (3)$$

Для остальных участков валопровода получим:

$$\begin{aligned} I_3\ddot{\varphi}_3 - C_2(\varphi_2 - \varphi_3) + C_3(\varphi_3 - \varphi_4) &= 0; & I_4\ddot{\varphi}_4 - C_3(\varphi_3 - \varphi_4) + C_4(\varphi_4 - \varphi_5) &= 0; \\ I_5\ddot{\varphi}_5 - C_4(\varphi_4 - \varphi_5) + C_5(\varphi_5 - \varphi_6) &= 0; & I_6\ddot{\varphi}_6 - C_5(\varphi_5 - \varphi_6) + C_6(\varphi_6 - \varphi_7) &= 0; & (4) \\ I_M\ddot{\varphi}_M - C_6(\varphi_6 - \varphi_M) + C_7(\varphi_M - \varphi_\Gamma) &= 0; & I_\Gamma\ddot{\varphi}_\Gamma - C_7(\varphi_M - \varphi_\Gamma) &= 0. \end{aligned}$$

Решение уравнений (2 – 4) будем искать в виде

$$\varphi_i = \varphi_{i0} \sin(pt + \gamma), \quad (5)$$

где φ_{i0} – амплитудное значение углов отклонения; γ – начальный угол отклонения; p – частота собственных колебаний.

Введя обозначения относительных амплитуд α_i , равных

$$\alpha_1 = \frac{\varphi_{10}}{\varphi_{10}} = 1; \quad \alpha_2 = \frac{\varphi_{20}}{\varphi_{10}}; \quad \dots, \quad \alpha_6 = \frac{\varphi_{60}}{\varphi_{10}}; \quad \alpha_M = \frac{\varphi_{M0}}{\varphi_{10}}; \quad \alpha_\Gamma = \frac{\varphi_{\Gamma 0}}{\varphi_{10}}$$

и подставляя в (2 – 4) значения φ_i и $\ddot{\varphi}_i$ из (5), получим

$$\begin{aligned} -I_1 p^2 + C_1(1 - \alpha_2) &= 0; \\ -I_2 p^2 \alpha_2 - C_1(1 - \alpha_2) + C_2(\alpha_2 - \alpha_3) &= 0; \\ -I_3 p^3 \alpha_3 - C_2(\alpha_2 - \alpha_3) + C_3(\alpha_3 - \alpha_4) &= 0; \\ -I_4 p^2 \alpha_4 - C_3(\alpha_3 - \alpha_4) + C_4(\alpha_4 - \alpha_5) &= 0; \\ -I_5 p^2 \alpha_5 - C_4(\alpha_4 - \alpha_5) + C_5(\alpha_5 - \alpha_6) &= 0; & (6) \\ -I_6 p^2 \alpha_6 - C_5(\alpha_5 - \alpha_6) + C_6(\alpha_6 - \alpha_M) &= 0; \\ -I_M p^2 \alpha_M - C_6(\alpha_6 - \alpha_M) + C_7(\alpha_M - \alpha_\Gamma) &= 0; \\ -I_\Gamma p^2 \alpha_\Gamma - C_7(\alpha_M - \alpha_\Gamma) &= 0. \end{aligned}$$

Амплитуда собственных колебаний α_i зависит от частоты p . Действительно из (6) легко видеть, что:

$$\begin{aligned}
\alpha_2 &= 1 - \frac{I_1}{C_1} p^2; & \alpha_3 &= 1 - \frac{I_2 C_2 (1 + C_1) + I_2 C_1}{C_1 C_2} p^2 + \frac{I_1 I_2}{C_1 C_2} p^4; \\
\alpha_4 &= 1 - \frac{[I_1 C_2 (C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_3) + I_2 C_1 (C_2 + C_3) + I_3 C_1 C_2]}{C_1 C_2 C_3} p^2 + \\
&+ \frac{I_2 I_1 (C_2 + C_3) + I_1 I_3 C_2 (1 + C_1) + I_2 I_3 C_3}{C_1 C_2 C_3} p^4 - \frac{I_1 I_2 I_3}{C_1 C_2 C_3} p^6; \\
\alpha_5 &= \alpha_4 - I_4 p^2 \frac{\alpha_4}{C_4} - \frac{C_3}{C_4} (\alpha_3 - \alpha_4); & \alpha_6 &= \alpha_5 - I_5 p^2 \frac{\alpha_5}{C_5} - \frac{C_4}{C_5} (\alpha_4 - \alpha_5); \\
\alpha_m &= \alpha_6 - I_6 p^2 \frac{\alpha_6}{C_6} - \frac{C_5}{C_6} (\alpha_5 - \alpha_6); & \alpha_\Gamma &= \alpha_m - I_m p^2 \frac{\alpha_m}{C_7} - \frac{C_6}{C_7} (\alpha_6 - \alpha_m).
\end{aligned} \tag{7}$$

Для нахождения амплитуд частот и собственных крутильных колебаний целесообразно использовать следующую методику, в соответствии с которой проведем суммирование всех восьми уравнений системы (7). Результат суммирования имеет вид

$$-p^2 (I_1 + \alpha_2 I_2 + \alpha_3 I_3 + \alpha_4 I_4 + \alpha_5 I_5 + \alpha_6 I_6 + \alpha_m I_m + \alpha_\Gamma I_\Gamma) = 0. \tag{8}$$

Поскольку $p^2 \neq 0$, постольку многочлен, заключенный в скобках, должен быть равен нулю. Меняя значение частот p , по формуле (7) находим относительные амплитуды α_i , превращающие многочлен (8) в нуль. Для валопроводов, у которых процесс крутильных колебаний описывается системой дифференциальных уравнений более высокого порядка, определение частот собственных крутильных колебаний можно выполнить, используя для этого метод ценных дробей – метод В.П. Терских. В соответствии с этим методом ценная дробь, с помощью которой определяется динамическая жесткость $C_{\text{дин}}$, формируется по формуле для последовательного соединения, в соответствии с которой для диска с моментом инерции I , присоединенного к валу с жесткостью C , динамическая жесткость равна

$$C_{\text{дин}} = 1 / \left(-1 / I p^2 + 1 / C \right). \tag{9}$$

Для n -массовой системы динамическая жесткость $C_{\text{дин}}$ определяется следующим образом

$$\frac{\frac{1}{1 - I_{n-1}p^2} - I_n p^2}{\frac{1}{1 - I_{n-1}p^2} + \frac{1}{C_{n-1}}} = C_{\text{динн}}$$

(10)

$$\frac{\frac{1}{1 - I_2 p^2} - I_3 p^2}{\frac{1}{1/\left(-\frac{1}{I_1 p^2} + \frac{1}{C_1}\right)} - I_2 p^2 + \frac{1}{C_2}}$$

С помощью (10) величины частот собственных колебаний находят из условия $C_{\text{динн}} = 0$. Частоты собственных крутильных колебаний следует искать только в рабочем диапазоне угловой частоты вращения дизель-генератора. Необходимо также учесть, что при некоторых значениях частот $P_1^*, P_2^*, \dots, P_{n-1}^*$ $C_{\text{динн}} \rightarrow \infty$. При колебаниях системы с такой частотой в некоторой точке будет находиться узел колебаний, для которого амплитуда колебаний φ равна нулю. В случае, когда рабочий диапазон частот $0 < \omega \leq P_2^*$, то необходимо найти только значение P_1 и рассматривать одноузловую форму собственных крутильных колебаний. Если же рабочий диапазон частот $0 < \omega \leq P_4^*$, то необходимо найти частоты P_1, P_2 и P_3 и рассматривать как одноузловую, так и в двух- и трехузловые формы колебаний.

Вывод. Найденные соотношения и изложенная последовательность расчетов позволяет учесть влияние собственных колебаний системы при определении степени неравномерности угловой частоты вращения вала дизель-генератора. С помощью полученных соотношений возможно уточнить место расположения датчиков, с помощью которых производится измерение углов поворота валопроводов. Полученные соотношения могут быть рекомендованы также и для проведения прочностных расчетов, определения возможности параллельной работы дизель-генераторов и оценки качества вырабатываемой ими электроэнергии. Однако полученные результаты нуждаются в корректировке, связанной с необходимостью учета влияния вынужденных колебаний системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлин А.С., Вырубов Д.Н., Круглов М.Г. и др. *Конструкция и расчет поршневых и комбинированных двигателей.* – М.: Машиностроение, 1972. – 464 с.
2. Гуляя Н.В. *Накопители энергии.* – М.: Наука, 1980. – 760 с.
3. Толишин В.И., Моргунов В.Н. *Инерционный электромеханический накопитель*

энергии для дизель-генераторных установок // Двигателестроение. – 1987. – № 8. – С. 31 – 42.

4. *Ваниейд В.А. Конструкция и расчет прочности судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1969. – 640 с.*
5. *Вихерт М.М. Конструкции и расчет автотракторных двигателей, – М.: Машигид, 1964. – 604 с.*

Поступила 17.02.2004

КОНОНОВА Елена Анатольевна, младший научный сотрудник НЦ РКИ. В 1992 году окончила Курский политехнический институт. Область научных интересов – электромеханика.
