

Боков В. М. Розмірне формування поверхонь електричною дугою. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ “Імекс ЛТД”, 2002 – 300 с. **6.** Боков В. М., Гросул І. А. Електрична дуга в умовах гідродинамічного впливу як інструмент для точних технологій. – Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов международной научно-технической конференции в г. Севастополе 13-18 сентября 2004 г. В 4-х томах. – Донецк: ДонГТУ. Т.1. – 281 с. **7.** Гросул І. А., Боков В. М. Техніка й технологія чистового розмірного оброблення електричною дугою. – “Машинознавство”, 2002, № 7. **8.** Mesheriakov G. N. Electro-Physical Processes in Electric Pulse Metal Cutting from the point of View of Efficiency and Polarity of Electrode Wear. – Annals of the C.I.R.P. Vol. XVIII pp. 491-499. Printed in Great Britain 1970. **9.** Малюшевский П. П., Городенко Г. Г. Исследование влияния внешнего давления и магнитных полей на электрический разряд в жидкости // Электронная обработка материалов. – 1987. № 4. – С. 33-38. **10.** Остроумов Г. А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. Физические основы электрогидродинамики. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. **11.** Семёнов В. Н., Фотеев Н.К. Воздействие электромагнитного поля на процесс электроконтактной резки // Электронная обработка материалов. – 1983. № 3. – С. 5-10.

Сдано в редакцию 30.05.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Бутенко В.И.

РАСЧЕТ УСИЛИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НЕСООСНОСТИ ВАЛОПРОВОДОВ С ГЛАВНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

Иванов Д.Ю. (НУК, г.Николаев, Украина)

The interdependence of loads arising when joining of non-eccentric shafts with values of their non-eccentricity has been investigated. The calculation method of mentioned loads with consideration of static indeterminability of shafts has been proposed. The formulas for calculation of shafts non-eccentricity values and additional loads on shafts bearings have been given.

Качество центровки главных механизмов с валопроводами, как правило, оценивается по несоосности соединяемых валов. В большинстве случаев предельно допускаемые величины этой несоосности устанавливаются однозначными и сравнительно жесткими, что предполагает максимально возможное исключение взаимного влияния валопровода и вала главного механизма на параметры их укладки; поэтому оценка дополнительных усилий, которые возникают вследствие допущенной при монтаже несоосности, как правило, не выполняется.

Однако, как показали исследования, в одних случаях, при высокой жесткости соединяемых валов, центровка главных механизмов с валопроводом с соблюдением установленных жестких допусков на несоосность не исключает возможности больших дополнительных усилий, которые следовало бы учитывать уже на стадии расчета параметров укладки валопровода; в других случаях, при большой податливости соединяемых валов, эти допуски оказываются неоправданно жесткими, что может вызывать увеличение затрат на центровку и монтаж главных механизмов при постройке судов и, тем более, при их ремонте.

Указанное приводит к выводу о необходимости и целесообразности выполнения расчета усилий, возникающих при заданных или технологически желательных величинах несоосности валопроводов с главными механизмами.

Разработке метода расчета усилий, возникающих при соединении несоосных валов, посвящен ряд работ [1–3]. Однако в этих работах рассматриваются в основном случаи несоосности двухопорных валов (статически определимых систем), к тому же большей частью с регулярной схемой расстановки подшипников; практически такие случаи крайне редки.

В настоящей работе рассматривается метод расчета, учитывающий статическую неопределимость схем, которыми описываются большинство валопроводов и валов главных механизмов.

Известно, что несоосность валов принято оценивать величинами излома φ и смещения δ их осей в плоскости соединения (рис.1). Для устранения этой несоосности при соединении валов прикладываются усилия, являющиеся внешними для каждого из валов в отдельности и приводимые к моменту M и поперечной силе P .

Рассматривая, например, левый участок валопровода на рис.1, вынесенный на рис.2, можно видеть, что действие момента M приводит к повороту сечения вала в плоскости соединения и к линейному перемещению этого соединения:

$$\theta_M^{\text{лев}} = MK_{\theta_M}^{\text{лев}}; \quad (1)$$

$$V_M^{\text{лев}} = MK_{V_M}^{\text{лев}}. \quad (2)$$

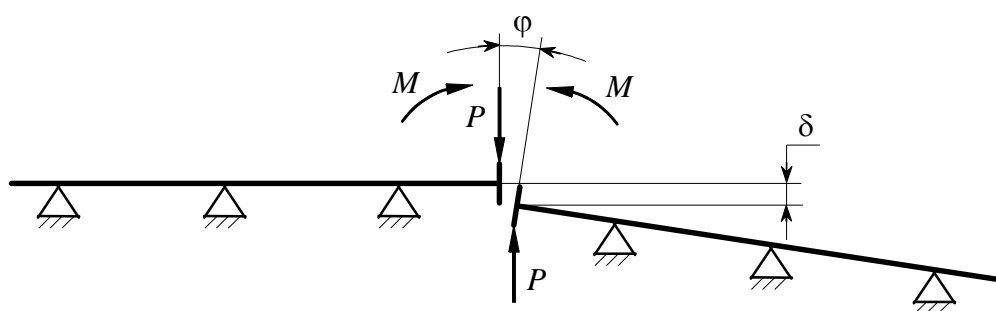


Рис.1. Схема соединения фланцев валов

В данных выражениях:

$$K_{\theta_M}^{\text{лев}} = \frac{1}{E} \left[\frac{l_0}{I_0} + \frac{l_1}{3EI_1} \left(1 + \frac{K_{M_2}}{2} \right) \right],$$

$$K_{V_M}^{\text{лев}} = \frac{1}{E} \left[\frac{l_0^2}{2I_0} + \frac{l_0 l_1}{3I_1} \left(1 + \frac{K_{M_2}}{2} \right) \right]$$

– коэффициенты, характеризующие поворотную и линейную податливости валопровода соответственно в сечении, в котором приложен момент M ; E – модуль упругости материала вала; l_0 , l_1 – длины участков валопровода по схеме на рис.2; I_0 ,

I_1 – моменты инерции сечений валопровода на участках длиной l_1 и l_2 соответственно; $K_{M_2} = \frac{M_2}{M_1} = \frac{M_2}{M}$ – коэффициент момента в сечении валопровода над опорой 2.

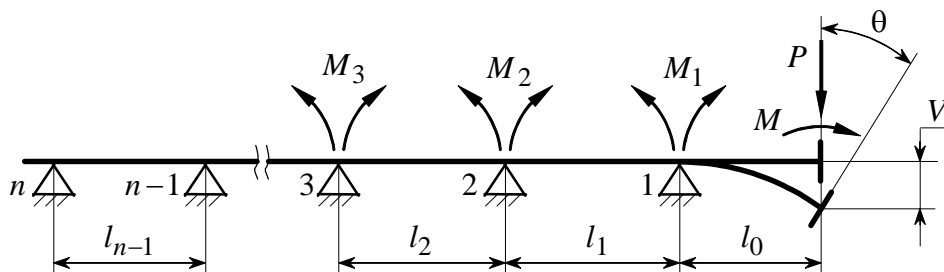


Рис.2. Расчетная схема участка валопровода

Действие силы P , в свою очередь, приводит к линейному перемещению того же сечения вала и повороту этого сечения:

$$V_P^{\text{лев}} = PK_{V_P}^{\text{лев}}; \quad (3)$$

$$\theta_P^{\text{лев}} = PK_{\theta_P}^{\text{лев}}. \quad (4)$$

В данных выражениях, аналогично:

$$K_{V_P}^{\text{лев}} = \frac{1}{3E} \left[\frac{l_0^3}{I_0} + \frac{l_0^2 l_1}{I_1} \left(1 + \frac{K_{M_2}}{2} \right) \right],$$

$$K_{\theta_P}^{\text{лев}} = \frac{1}{E} \left[\frac{l_0^2}{2I_0} + \frac{l_0 l_1}{3I_1} \left(1 + \frac{K_{M_2}}{2} \right) \right]$$

– коэффициенты, характеризующие линейную и поворотную податливости валопровода соответственно в сечении, в котором действует сила P .

Коэффициент K_{M_2} , которым учитывается статическая неопределимость валопровода, определяется решением системы уравнений трех моментов вида:

$$M_1 \frac{l_1}{I_1} + 2M_2 \left(\frac{l_1}{I_1} + \frac{l_2}{I_2} \right) + M_3 \frac{l_2}{I_2} = 0; \quad (5)$$

$$M_{n-2} \frac{l_{n-2}}{I_{n-2}} + 2M_{n-1} \left(\frac{l_{n-2}}{I_{n-2}} + \frac{l_{n-1}}{I_{n-1}} \right) + M_n \frac{l_{n-1}}{I_{n-1}} = 0,$$

в которых M_1 принимается равным единице, M_n – равным нулю, остальные величины – по схеме, подобной представленной на рис.2, где n – последняя опора

рассматриваемого участка валопровода, а l_{n-2} и l_{n-1} – длины предпоследнего и последнего участков. Решение этой системы позволяет определить величину M_2 , которая при $M_1 = 1$ численно равна K_{M_2} .

Определив аналогично для правого (по схеме рис.1) участка валопровода значения $\theta_M^{\text{пр}}$, $V_M^{\text{пр}}$, $V_P^{\text{лев}}$ и $\theta_P^{\text{лев}}$, можно видеть, что действие момента M и силы P приводит к взаимному излому осей соединяемых валов или, что то же самое математически, к устранению их излома, равному

$$\varphi = \theta_M^{\text{лев}} + \theta_P^{\text{лев}} + \theta_M^{\text{пр}} + \theta_P^{\text{пр}} \quad (6)$$

и смещению осей валов, равному

$$\delta = V_M^{\text{лев}} + V_P^{\text{лев}} + V_M^{\text{пр}} + V_P^{\text{пр}}. \quad (7)$$

Подставив значения θ и V в уравнения (6) и (7), из уравнений (1)–(4), приняв положительными смещение правого вала вниз и излом с раскрытием соединяемых сечений вверх (как показано на рис.1), можно получить:

$$\begin{aligned} \varphi &= M \left(K_{\theta_M}^{\text{пр}} + K_{\theta_M}^{\text{лев}} \right) - P \left(K_{\theta_P}^{\text{пр}} - K_{\theta_P}^{\text{лев}} \right); \\ \delta &= P \left(K_{V_P}^{\text{пр}} + K_{V_P}^{\text{лев}} \right) - M \left(K_{V_M}^{\text{пр}} - K_{V_M}^{\text{лев}} \right). \end{aligned}$$

Решение этой системы уравнений позволяет получить следующие выражения для определения момента и силы, необходимых для соединения несоосных участков валопровода:

$$\begin{aligned} M &= \varphi A_M^{\varphi} + \delta A_M^{\delta}; \\ P &= \varphi A_P^{\varphi} + \delta A_P^{\delta}. \end{aligned}$$

где

$$A_M^{\varphi} = \frac{K_{V_P}^{\text{пр}} + K_{V_P}^{\text{лев}}}{\left(K_{\theta_M}^{\text{пр}} + K_{\theta_M}^{\text{лев}} \right) \left(K_{V_P}^{\text{пр}} + K_{V_P}^{\text{лев}} \right) - \left(K_{\theta_P}^{\text{пр}} - K_{\theta_P}^{\text{лев}} \right) \left(K_{V_M}^{\text{пр}} - K_{V_M}^{\text{лев}} \right)}; \quad (8)$$

$$A_M^{\delta} = \frac{K_{\theta_P}^{\text{пр}} - K_{\theta_P}^{\text{лев}}}{\left(K_{\theta_M}^{\text{пр}} + K_{\theta_M}^{\text{лев}} \right) \left(K_{V_P}^{\text{пр}} + K_{V_P}^{\text{лев}} \right) - \left(K_{\theta_P}^{\text{пр}} - K_{\theta_P}^{\text{лев}} \right) \left(K_{V_M}^{\text{пр}} - K_{V_M}^{\text{лев}} \right)}; \quad (9)$$

$$A_P^{\varphi} = \frac{K_{V_M}^{\text{пр}} + K_{V_M}^{\text{лев}}}{\left(K_{\theta_M}^{\text{пр}} + K_{\theta_M}^{\text{лев}} \right) \left(K_{V_P}^{\text{пр}} + K_{V_P}^{\text{лев}} \right) - \left(K_{\theta_P}^{\text{пр}} - K_{\theta_P}^{\text{лев}} \right) \left(K_{V_M}^{\text{пр}} - K_{V_M}^{\text{лев}} \right)}; \quad (10)$$

$$A_P^{\delta} = \frac{K_{\theta_M}^{\text{пр}} + K_{\theta_M}^{\text{лев}}}{\left(K_{\theta_M}^{\text{пр}} + K_{\theta_M}^{\text{лев}} \right) \left(K_{V_P}^{\text{пр}} + K_{V_P}^{\text{лев}} \right) - \left(K_{\theta_P}^{\text{пр}} - K_{\theta_P}^{\text{лев}} \right) \left(K_{V_M}^{\text{пр}} - K_{V_M}^{\text{лев}} \right)}. \quad (11)$$

Следует отметить, что $A_M^\delta = A_P^\phi$ в силу того, что $K_{V_M}^{\text{лев}} = K_{\theta_P}^{\text{лев}}$ и $K_{\theta_P}^{\text{пр}} = K_{V_M}^{\text{пр}}$; это уменьшает объем расчета.

Коэффициенты A_M^ϕ , A_M^δ , A_P^ϕ и A_P^δ зависят только от конструктивных размеров соединяемых валов и определяются по формулам (8)–(11), в которые все коэффициенты K_i входят с положительными знаками. Знаки момента M и силы P зависят от знаков ϕ и δ по приятному правилу, иллюстрируемому на рис.1 (на котором значения ϕ и δ приняты положительными), а также от знака коэффициентов A_M^δ и A_P^ϕ .

Вычислив значения M и P по принятым или фактическим значениям ϕ и δ , можно определить дополнительные нагрузки на подшипники 1 и 2 при такой несоосности по известным формулам применительно к схеме на рис.2:

$$\Delta R_1 = P + \frac{M_2 - M_1}{l_1}; \quad \Delta R_2 = \frac{M_1 - M_2}{l_1} + \frac{M_3 - M_2}{l_2},$$

где $M_1 = -(M + Pl_0)$; $M_2 = M_1 K_{M_2}$; $M_3 = M_1 K_{M_3}$; K_{M_3} – коэффициент момента в сечении над опорой 3, численно равный значению M_3 , определенному при решении системы уравнений (5). При необходимости могут быть определены имеющие существенно меньшие значения величины дополнительных нагрузок и на следующих опорах валопровода по формуле:

$$\Delta R_i = \frac{M_{i-1} - M_i}{l_{i-1}} + \frac{M_{i+1} - M_i}{l_i}$$

Значения дополнительных напряжений в валах могут быть определены по значениям дополнительных моментов в сечениях валопровода, которые, в свою очередь, определяются при определении ΔR_i в зависимости от значений M_i .

Изложенный метод расчета использовался при определении допустимости несоосности главных механизмов с валопроводами, фактические величины которой по разным причинам превышали установленные допуски.

В случаях центровки валопроводов регулированием фактических нагрузок на подшипники правильность расчетов по изложенному методу при необходимости может быть проверена измерением нагрузок на первые два (со стороны главного механизма) подшипника до и после соединения валов.

Список литературы: 1. Шиманский Ю.А. Исследование главнейших факторов, влияющих на работу судовых валопроводов. Сборник статей по судостроению. – Л.: Судпромгиз, 1954. **2.** Гармашев Д.Л., Кудрявцев Ф.А., Марков А.П. Современные методы монтажа судовых валопроводов. – Л.: Судпромгиз, 1961. **3.** Лукьянов И.С. Напряжения, обусловленные монтажными смещениями фланцев валопровода, имеющего регулярную схему, и давления его на опоры.// Труды ЛКИ. – Л., 1973. – Вып. 88.

Сдано в редакцию 30.05.05
Рекомендовано д.т.н., проф. Бутенко В.И.