

УДК 621.833

В.С. ПОДГУРЕНКО, канд. техн. наук,
директор ООО „Ветряной парк „Очаковский”, Николаев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗУБЧАТЫХ МУФТ

Экспериментальным путем определены упругие изгибающие моменты в зубчатой муфте при перекосах осей, которые удовлетворительно совпали с расчетными данными.

Експериментальним шляхом знайдено пружні згинні моменти в зубчастій муфті при перекосах осей, котрі задовільно співпали з розрахунковими даними.

The elastic bending moments in gear couplings under misalignments of axes have been determined experimentally. Obtained data satisfactorily have coincided with calculated ones.

Постановка проблемы. Зубчатые муфты помимо соединения элементов машин, передающих вращательные моменты, компенсируют расцентровки осей соединяемых валов судовых агрегатов. При этом в зубчатых муфтах возникают изгибающие моменты от действия неуравновешенных усилий и от сил трения, которые приводят к дополнительному нагружению валов, фланцевых соединений, опор агрегатов и других элементов машин, что необходимо учитывать при проектировании силовых установок.

Анализ последних исследований. Наиболее полно технические решения отражены в [1-6], которые являются основой для проведения теоретических и

экспериментальных исследований зубчатых муфт. Что же касается проводимых теоретических и экспериментальных исследований зубчатых муфт, то эти исследования в течение длительного срока, в том числе и в последнее время, базируются на методологии профессора А.П. Попова, опубликованной в научных трудах, в том числе и в [7-11].

Целью работы является экспериментальное исследование упругих изгибающих моментов в зубчатой муфте в условиях перекоса осей судовой редукторной трансмиссии и их сопоставление с теоретическими данными.

Изложение основного материала. На рис.1 показана часть конструкции судовой редукторной трансмиссии с исследуемой зубчатой муфтой, которая имеет следующие параметры: модуль $m = 5$ мм; число зубьев $z = 56$; радиус бокообразности $R = 2,62$ м; угол зацепления $\alpha_w = 20^\circ$; ширина зуба $b = 40$ мм; коэффициент

высоты головки зуба $h_a^* = 0,8$. Ведущая обойма 3 конструктивно состоит из шлицевого венца и стенки, которая воспринимает изгибающие моменты, возникающие в зубчатой муфте. При этом смазка рабочих поверхностей зубьев обеспечивается

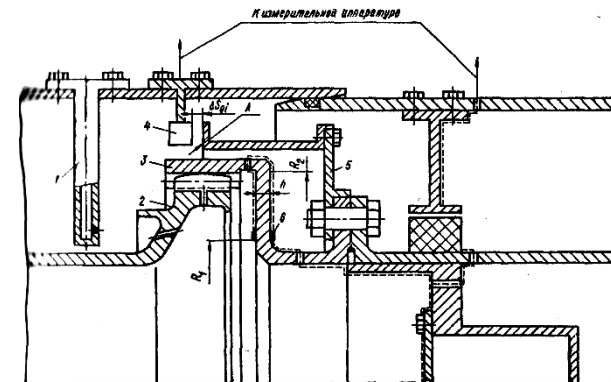


Рис. Конструкция исследуемой зубчатой муфты

индивидуальным подводом масла через спрейер 1 и отверстия во втулке 2. В качестве смазки использовалась маслосмесь, состоящая из 35% газотурбинного масла и 65% масла МС-20. Температура масла в зоне контакта зубьев равнялась 50°C . С учетом эксплуатационных особенностей трансмиссии перекося втулки 2 осуществлялся в сторону раскрытия муфты в верхней части. Замер перекосов осей обоймы и втулки производился при помощи технологической втулки 5, жестко связанной с обоймой 3, и четырех индуктивных датчиков 4, соединенных с корпусом втулки 2. Тарировка датчиков производилась последовательным перемещением на 1, 2, 3, 4 и 5 мм от упора в поверхность А. В результате тарировки установлены начальные зазоры ΔS_{0i} , которые, соответственно, для первого - четвертого датчиков были следующими: $\Delta S_{01} = 2,4$ мм; $\Delta S_{02} = 3,1$ мм; $\Delta S_{03} = 3,7$ мм; $\Delta S_{04} = 3,4$ мм.

Для устранения температурных погрешностей в схеме использовались четыре компенсирующих датчика, которые на рисунке не показаны. Величины зазоров по датчикам при каждом режиме работы зубчатой муфты, определенные по тарировочному графику в соответствии с отклонением луча на ленте осцилло-

графу в соответствии с отклонением луча на ленте осцилло-

граммы, обозначены через ΔS_i . Изменение зазора ΔS_i между датчиком и поверхностью A соответственно равно $\Delta_i = \Delta S_i - \Delta S_{0i}$.

В качестве измерительной аппаратуры при проведении эксперимента использовался осциллограф Н-115 и усилитель 8АН4.

Углы перекося осей обоймы 3 и втулки 2, определяемые по датчикам, которые расположены соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, находились из выражений $\varphi_b = |\Delta_1 - \Delta_3|/D$; $\varphi_r = |\Delta_2 - \Delta_4|/D$, где $D = 346$ мм – диаметр окружности, на которой расположены датчики. Значения замеренных зазоров ΔS_i и их изменения Δ по индуктивным датчикам в зависимости от режима работы трансмиссии и соответствующие углы перекося φ_b и φ_r приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения замеренных зазоров и их изменения по индуктивным датчикам в зависимости от режима работы трансмиссии

Частота вращения n , об/мин	Перемещение, мм, замеренное индуктивными датчиками				Угол перекося, рад $10^3 \psi_b / 10^3 \psi_r$
	1	2	3	4	
1700	2,40/-0	3,10/-0	3,70/-0	3,40/-0	0,43/-0
2500	3,05/0,65	3,40/0,30	3,77/-0,07	3,70/0,30	1,90/-0
3700	3,72/1,32	3,85/0,75	4,15/0,45	4,42/1,02	2,54/0,29
4000	3,75/1,35	3,87/0,77	4,03/-0,33	4,37/0,97	3,07/0,60
4500	3,40/1,06	3,37/0,27	3,65/-0,05	4,00/3,26	3,26/0,60

Одновременно с измерением углов перекося производились замеры напряжений изгиба в стенке исследуемой обоймы 5 бесконтактным методом. При этом тензодатчики 6 наклеивались вблизи внутреннего радиуса стенки толщиной $h = 10$ мм с двух сторон. Замеренные радиальные напряжения σ_{R1} , осредненные по двум показаниям тензодатчиков, позволяют определить изгибающий момент, действующий на стенку, который равен суммарному изгибающему моменту в зубчатой муфте. В качестве расчетной модели для стенки принята круглая пластина с жестким центром, защемленная по контуру окружности, для которой изгибающий момент имеет вид [1]

$$M_\sigma = \pi R_1 h^2 \sigma_{R1} \beta (1 + \beta^2) / [3(1 - \beta^2)], \quad (1)$$

где $\beta = R_1/R_2 = 0,714$; $R_1 = 102,5$ мм – внутренний радиус стенки; $R_2 = 143,5$ мм – наружный радиус стенки.

Результирующий изгибающий момент в зубчатой муфте имеем в виде [7]

$M_\Sigma = \sqrt{(M_n + M_{тр} \sin \alpha_w)^2 + (M_{тр} \cos \alpha_w)^2}$. Здесь M_n , $M_{тр}$ – изгибающие моменты соответственно от действия неуравновешенных усилий и сил трения [2, 3]:

$$M_n = \frac{R \psi_\Sigma z}{2} \left(\frac{F_m}{\cos \alpha_w} + \frac{R \psi_\Sigma^2}{8 \delta_\Sigma} \right); \quad M_{тр} = \frac{m z^2 f_{тр}}{2} \left(\frac{F_m}{\cos \alpha_w} + \frac{R \psi_\Sigma^2}{12 \delta_\Sigma} \right), \quad (2)$$

где $F_m = 2M/mz^2$ – среднее усилие, действующее на зуб муфты; M – вращательный момент, передаваемый зубчатой муфтой; δ_Σ – податливость сопряженной пары зубьев, обусловленная изгибом, смятием и осадкой оснований зубьев втулки и обоймы [7]; ψ_Σ – результирующий угол перекося осей, представляющий собой геометрическую сумму углов φ_b и φ_r ; $f_{тр}$ – коэффициент трения определяемый по формуле [7]

$$f_{тр} = \frac{0,035 W_m^{0,08} R_a^{0,45}}{\left(\alpha_0^{0,28} R^{0,324} \omega^{0,225} \mu_0^{0,35} v_{\Sigma cp}^{0,174} h_p^{0,15} \right)},$$

где $W_m = F_m/h_p$ – удельная нагрузка, Н/м; R_a – среднеквадратичная величина шероховатости, принимаем, равной $2,08 \cdot 10^{-6}$ м, что соответствует шероховатости, заключенной между 6 и 7 классами чистоты обработанных поверхностей; α_0 – пьезокоэффициент вязкости масла, 1/Па; μ_0 – вязкость масла при атмосферном давлении, Па·с; ω – угловая скорость зубчатой муфты, рад/с; h_p – рабочая высота зуба в м; $v_{\Sigma cp} = 2\omega \psi_\Sigma / [R - mz/2(1 + \sin \alpha_w)]$ – среднеинтегральная относительная скорость перемещения зубьев, м/с.

В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные значения изгибающих моментов, найденные по формулам (1) и (2).

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения изгибающих моментов

Частота вращения n , об/мин	Суммарный угол перекося $\psi_\Sigma \cdot 10^3$, рад	Максимальное радиальное напряжение σ_{R1} , МПа	Экспериментальное значение момента M_n , Н·м	Удельная нагрузка $W_m \cdot 10^{-4}$, Н/м	Коэффициент трения $f_{тр}$	Теоретическое значение момента M_Σ , Н·м	Расхождение между M_n и M_Σ в %
1700	1,87	25,0	825	24,3	0,057	830	0,61
2500	2,32	29,3	966	28,8	0,048	980	1,45
3700	3,00	35,8	1180	35,0	0,041	1200	1,69
4000	3,17	37,3	1230	36,0	0,040	1260	2,44
4500	3,45	40,0	1320	39,0	0,038	1360	3,03

Выводы.

1. На основании выполненных исследований установлено, что расхождения между экспериментальными и расчетными значениями изгибающих моментов находятся в пределах от 1 до 3%, что подтверждает удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных результатов.

2. Кроме того, проведенные исследования подтвердили достоверность приведенной зависимости для определения коэффициентов трения в зубчатых муфтах.

Список литературы: 1. А.с. 1504394 СССР. Зубчатая муфта [Текст] / А.П. Попов (СССР). – 4089604/31 – 27; заявл. 09.07.86; опубл. 30.08.89, Бюл. № 32. 2. А.с. 1328600 СССР. Зубчатая муфта

[Текст] / *А.П. Попов* (СССР). – 3932791/31 – 27; заявл. 22.07.85; опубл. 07.08.87. Бюл. № 29. **3.** А.с. 1695009 СССР. Зубчатая муфта [Текст] / *А.П. Попов* (СССР). – 4710770/27; заявл. 26.06.89; опубл. 30.11.91. Бюл. № 44. **4.** Пат. 55771 Україна. Зубчаста муфта [Текст] / *О.П. Попов, Л.О Попова, О.І. Савенков* – *и2010007003*; заявл. 07.06.10; опубл. 27.12.10, Бюл. № 24. **5.** Пат. 61719 Україна. Зубчаста муфта [Текст] / *О.П. Попов, О.І. Савенков* – *и201100458*; заявл. 17.01.11; опубл. 25.07.11, Бюл. № 14. **6.** Пат. 62922 Україна. Зубчаста муфта [Текст] / *О.П. Попов, О.І. Савенков* – *и201100858*; заявл. 26.01.11; опубл. 26.09.11, Бюл. № 18. **7.** *Попов А.П.* Зубчатые муфты в судовых агрегатах / *А.П. Попов* – Л.: Судостроение, 1985. – 240с. **8.** *Попов А.П.* Исследование законов распределения зазоров между зубьями зубчатых муфт с различными формами образующих боковых поверхностей зубьев / *А.П. Попов* // Смазка и трение в судовых машинах: Сб. науч. тр – Николаев: НКИ, 1992. – С.30-46. **9.** *Попов А.П.* Изгибающие моменты в зубчатой муфте *А.П. Попова* / *А.П. Попов* // Судовые энергетические установки: Сб. науч. тр – Николаев: НКИ, 1989. – С.42-50. **10.** *Попов А.П.* Экспериментальное исследование нагрузочной способности зубчатых муфт / *А.П. Попов, О.И. Савенков* // Вестник Инженерной академии Украины. – 2010. – № 3-4. – С.203-209. **11.** *Попов А.П.* Экспериментальное исследование изгибающих моментов в зубчатой муфте с продольной модификацией зубьев / *А.П. Попов, О.И. Савенков* // Вестник Инженерной академии Украины. – 2011. – № 1. – С.219-225.

Поступила в редколлегию 13.02.2012