

УДК 621.833

С.А. ХАНМАМЕДОВ, д-р техн. наук, зав. каф. СЭУ ОНМА, Одесса

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ЗУБЧАТЫХ МУФТ

На прикладі зубчастих муфт з бочкоподібними зубами втулок і прямими зубами обойм експериментальним шляхом в статичних і динамічних умовах знайдені співвідношення між результуючими згинними і крутними моментами, котрі задовільно співпали з розрахунковими даними.

На примере зубчатых муфт с бочкообразными зубьями втулок и прямыми зубьями обойм экспериментальным путем в статических и динамических условиях определены соотношения между результирующими изгибающими и вращательными моментами, которые удовлетворительно совпали с расчетными данными.

Correlations between the resulting bending and torque moments have been determined experimentally on the example of gear couplings with barrel teeth of bushings and straight teeth of cages. Obtained data satisfactorily have coincided with calculated ones.

Постановка проблемы. При перекосе осей агрегатов, соединенных зубчатыми муфтами, в последних возникают изгибающие моменты от действия неуравновешенных усилий и сил трения. Неуравновешенность усилий в каждой паре находящихся в зацеплении диаметрально противоположных зубьев обусловлена смещением усилий к торцам зубьев. Силы трения на рабочих поверхностях зубьев вызваны относительным перемещением зубьев.

Изгибающие моменты оказывают отрицательное влияние на работу ма-

шин, перегружая их вследствие дополнительного силового воздействия, что необходимо учитывать при проектировании энергетических установок, соединенных зубчатыми муфтами.

Анализ последних данных. В работах [2-4, 6] приведены теоретические зависимости для определения изгибающих моментов, а также изложены результаты экспериментальных исследований изгибающих моментов от действия неуравновешенных усилий в статических условиях для зубчатой муфты с бочкообразными зубьями втулки и прямыми зубьями обоймы.

Однако в литературе отсутствуют экспериментальные данные о величинах изгибающих моментов от сил трения, что обусловлено сложностью и длительностью проводимых исследований и отсутствием достоверных данных по коэффициентам трения в зоне контакта зубьев.

В связи с этим рекомендации по изгибающим моментам в зубчатых муфтах носят противоречивый характер. В одних случаях предлагается при расчетах зубчатых муфт принимать величину изгибающего момента от сил трения равной $0,1T$ (T – вращательный момент) [1], в других рекомендуется при хороших условиях смазки моменты от сил трения не учитывать [2, 3]. Кроме того, отсутствуют экспериментально доказанные соотношения между результирующими изгибающими и вращательными моментами, передаваемыми зубчатыми муфтами.

Цель работы – экспериментальное исследование в статических и динамических условиях дополнительных силовых факторов в зубчатых муфтах в виде результирующих величин изгибающих моментов от действия неуравновешенных усилий и сил трения, обусловленных перекосами осей соединяемых валов агрегатов, с целью их сравнения с расчетными данными.

Изложение основного материала. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований зубчатых муфт в статических и динамических условиях. Экспериментальные исследования проводились на трех зубчатых муфтах с бочкообразными зубьями втулок и прямыми зубьями обойм. Основные параметры исследуемых зубчатых муфт, при которых определялись изгибающие моменты, приведены в таблице.

Таблица

Параметры исследуемых зубчатых муфт

Номер зубчатой муфты	Радиус бочкообразности зубьев R , м	Шерохова-тость поверхности зубьев R_a , мкм	Угол перекоса осей $\psi \cdot 10^3$, рад	Вращательный момент $T \cdot 10^3$, Н·м	Угловая скорость ω , рад/с
1	0,5	1,25	5; 10; 15;	8;	333;
2	1,5	2,50	20 4; 8; 12	16;	209;
3	2,5	1,87	2,5; 5; 7,5	25	104,5

Все зубчатые муфты имели модуль зацепления $m = 6$ мм, число зубьев $z = 40$, коэффициент высоты головки зуба $h_\alpha^* = 1$, температуру входящего масла

$t_{вх} = 30^{\circ}\text{C}$. Испытания проводились в динамических условиях на двух сортах масла (турбинное 46 и трансформаторное) поочередно при трех значениях вращательных моментов с соответствующими заданными углами перекоса осей, каждому из которых соответствовали по три значения угловых скоростей.

Таким образом, с учетом используемых сортов масла, заданных вращательных моментов, углов перекоса осей и угловых скоростей зубчатые муфты в динамических условиях исследовались на 180 режимах, из которых 72 приходились на первую зубчатую муфту и по 54 - на вторую и третью.

Зубчатые муфты исследовались на установке многоцелевого назначения, кинематическая схема которой приведена на рис. 1. Установка работала по принципу замкнутого силового потока. Устройство 1, состоящее из электродвигателя мощностью 125 кВт и системы клиноременных передач, позволяло регулировать частоту вращения входного вала в диапазоне $n = 200...4000$ об/мин.

Силовой поток по замкнутому контуру проходил через две ступени редуктора с зубчатыми колесами 2, 4, 6, 9, исследуемые зубчатые муфты 3, 8 и торсионные валы 11. Загрузка валов при нагружении зубчатых муфт осуществлялась при помощи устройства 5. Устройство 7 позволяло создавать необходимые углы перекоса осей. Зубчатые муфты, подшипники качения, зубчатые колеса, шлицевые соединения и другие подвижные элементы трения смазывались циркулирующим под давлением маслом.

На каждом режиме исследования снимались показания восьми тензодатчиков 10 (рис. 1) из константановой проволоки диаметром 0,03 мм с базой 5 мм, которые были расположены в четырех сечениях валов 11 (по два сечения на каждом валу) по окружности и отстояли друг от друга на 180° . Все коммуникации на вращающихся элементах закреплялись полосками фольги, приваренными с помощью импульсной сварочной машины. Передача сигналов с тензодатчиков производилась токосъемником, установленным на валу приводного механизма. В качестве измерительной аппаратуры использовались осциллограф Н-115 и шестиканальный тензометрический усилитель БУТ-4. Относительные деформации записывались при скорости 0,25 м/с. Показания амплитудных значений тензодатчиков для каждой из зубчатых муфт

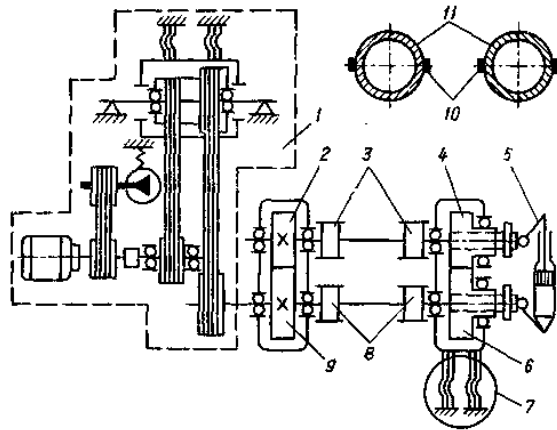


Рис. 1. Кинематическая схема экспериментальной установки для исследования зубчатых муфт

усреднялись.

Экспериментальные значения результирующих изгибающих моментов определялись из выражения [6]

$$M_{\Sigma} = \pi E \epsilon_i D_n^3 (1 - \alpha_0^4) / (32(1 - \nu^2)), \quad (1)$$

где ϵ_i – относительная деформация, определяемая по показаниям тензодатчиков 10 (рис. 1), наклеенных на валах 11 установки; E – модуль упругости материала вала; ν – коэффициент Пуассона; $\alpha_0 = D_b/D_n$ – коэффициент, характеризующий отношение внутреннего диаметра вала D_b к наружному D_n .

После замеров результирующих изгибающих моментов в рабочих условиях были замерены упругие изгибающие моменты от действия неуравновешенных усилий в статических условиях на экспериментальной установке, описанной в работе [6].

Экспериментальные значения изгибающих моментов от неуравновешенных усилий определялись из выражения

$$M_n = \pi E \epsilon_i (S - L_i) D_n^3 (1 - \alpha_0^4) / [32(1 - \nu^2) S], \quad (2)$$

где ϵ_i – относительная деформация, определяемая по показаниям тензодатчиков, наклеенных на валу установки; S – расстояние от середины зубьев исследуемой зубчатой муфты до места контакта смещаемого вала с опорой; L_i – расстояние от середины зубьев втулки до тензодатчика.

Величины относительных деформаций снимались по показаниям четырех тензодатчиков, расположенных в двух сечениях вала на расстояниях L_1 и L_2 от середины зубьев втулки. Все тензодатчики находились в плоскости перекоса осей, при этом два верхних тензодатчика работали на растяжение, а два нижних – на сжатие. Влияние температурной нестабильности учитывалось компенсационными датчиками, наклеенными на пластину. Тарировка измерительного тракта проводилась с помощью балки.

Величины упругих изгибающих моментов при удалении от зубчатой муфты к концу смещаемого вала уменьшились по линейному закону, поэтому $\epsilon_{i1}/\epsilon_{i2} = (S - L_1)/(S - L_2)$. Замеренные показания диаметрально противоположных тензодатчиков усреднялись. Величины вращательных моментов и углы перекоса осей принимались такими же, как при исследовании M_{Σ} . Следовательно, каждому значению M_n , найденному при исследовании зубчатых муфт в статических условиях, соответствовали шесть значений M_{Σ} , полученных в рабочих условиях.

Изгибающие моменты от сил трения определялись из выражения

$$M_{тр} = \sqrt{M_n^2 \sin^2 \alpha_{\omega} + (M_{\Sigma} - M_n)^2} - M_n \sin \alpha_{\omega}, \quad (3)$$

полученного из решения уравнения [6]

$$M_{\Sigma} = \sqrt{(M_n + M_{тр} \sin \alpha_{\omega})^2 + M_{тр}^2 \cos^2 \alpha_{\omega}}. \quad (4)$$

На рис. 2 показаны графические зависимости M_{Σ} и $M_{тр}$ от угла перекося осей для трех значений вращательных моментов T при $\omega = 104,5$ рад/с. Из рис. 2 следует, что результирующие изгибающие моменты и моменты от сил трения возрастают при уменьшении угловых скоростей, использовании менее вязких масел и увеличении вращательных моментов, углов перекося осей, радиусов бочкообразности зубьев.

При снижении вязкости масла ухудшаются условия смазки в зоне контакта зубьев, возрастают коэффициенты трения, что приводит к росту $M_{тр}$, а следовательно, и к росту M_{Σ} . Увеличение угловых скоростей улучшает условия смазки зубьев и характеризуется возрастанием толщин масляных слоев между ними, а также снижением потерь на трение, что способствует уменьшению изгибающих моментов.

Результирующие изгибающие моменты M_{Σ} в зубчатых муфтах, составляют 12-17% от передаваемых вращательных моментов T .

Сравнение экспериментально полученных величин M_{Σ} и $M_{тр}$ с теоретическими, подсчитанными по зависимостям [6] и учитывающими все основные факторы, от которых зависят величины изгибающих моментов, показало, что расхождения между ними не превышают 2,5%.

Выводы

1. Установлено, что замеренные и расчетные значения результирующих

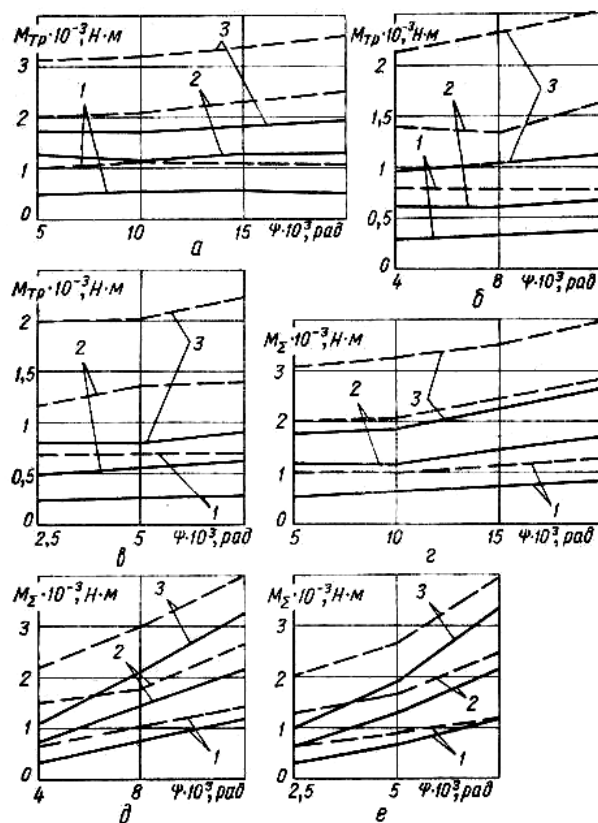


Рис. 2. График изменения изгибающих моментов от сил трения (а, б, в) и результирующих моментов (г, д, е) в зависимости от угла перекося осей при:
 а, г – $R = 0,5$ м; б, д – $R = 1,5$ м; в, е – $R = 2,5$ м
 (— турбинное масло; - - трансформаторное)

величин изгибающих моментов от действия неуравновешенных усилий и сил трения в зубчатой муфте с бочкообразными зубьями втулок и прямыми зубьями обойм практически совпадают друг с другом и не выходят за пределы общей погрешности, характерной для данного случая, что подтверждает правомерность использования в расчетной практике теоретических зависимостей для определения M_{Σ} .

2. Показано, что при малых радиусах бочкообразности зубьев ($R \leq 0,5$ м) результирующие величины изгибающих моментов M_{Σ} практически определяются моментами от сил трения. Изгибающие моменты $M_{н}$ составляют не более 7% от M_{Σ} при $\psi \leq 10 \cdot 10^{-3}$ рад. При $\psi > 10 \cdot 10^{-3}$ рад влияние $M_{н}$ на M_{Σ} достигает уже 20% от M_{Σ} , а при $\psi = 20 \cdot 10^{-3}$ рад – 30%. При увеличении радиусов бочкообразности зубьев влияние $M_{тр}$ на M_{Σ} уменьшается, и при $R = 2,5$ м, $\psi = 7,5 \cdot 10^{-3}$ рад моменты $M_{тр}$ составляют от M_{Σ} не более 20%.

Список литературы: 1. Поляков В.С. Справочник по муфтам / В.С. Поляков, И.Д. Бар-баш, О.А. Ряховский / Под ред. В.С. Полякова. – Л.: Машиностроение, 1979 – 343 с. 2. Попов А.П. Экспериментальное исследование зубчатых соединений с криволинейными образующими зубьев в статических условиях / А.П. Попов, В.В. Алек-сеенко // Сложность и долговечность судовых машин и механизмов: Тр. Николаев. судостроит. ин-та. – 1973. – Вып.75. – С. 54 - 65. 3. Попов А.П. Определение изгибающих моментов в зубчатых муфтах с криволинейными образующими зубьев / А.П. Попов // Судостроение и морские сооружения: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1974. – Вып.23. – С. 76-82. 4. Попов А.П. К вопросу исследования моментов от сил трения в зубчатых муфтах / А.П. Попов // Судовое энергомашиностроение: Тр. Николаев. судостроит. ин-та. – 1976. – Вып.109. – С.3-9. 5. Попов А.П. Коэффициенты трения в зубчатых муфтах судовых агрегатов / А.П. Попов. – Судостроение: Респ. науч.-техн. сб. – 1984. – Вып.33. – С. 78-83. 6. Попов А.П. Зубчатые муфты в судовых агрегатах / А.П. Попов. – Л.: Судостроение, 1985. – 237 с.

Поступила в редколлегию 13.02.2012