

УДК 623.205

Токарь С.Е., Дудко В.В., Афонский П.В, Мормило Я.М., Каторгин А.Н.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЮ В ПОВОРОТНОЙ ОПОРЕ ЛОПАСТИ ВЭУ

Постановка проблемы

Важным направлением развития современной энергетики, является создание экологически чистых источников энергии, использующих возобновляемые ресурсы. Ветроэнергетические установки (далее ВЭУ) – один из таких ресурсосберегающих источников.

Создание ВЭУ представляет собой сложную инженерную задачу. И как показал опыт эксплуатации подобных установок, одним из наиболее сложных и ответственных элементов конструкции ВЭУ является поворотная опора лопасти. В КП ХКБМ им. А.А. Морозова разработаны и изготовлены 3-и поворотные опоры для ВЭУ-500 (ГКБ «Южное»), которые по сравнению с существующими опорами имеют меньший момент сопротивления вращению при воздействии эксплуатационных нагрузок. Ввиду значительных внешних силовых воздействий и ограничения габаритов – высоты и диаметра опоры, предложена конструкция с двухрядным расположением шаров (рис. 1), одной внутренней обоймой (подвижной 1), двумя наружными обоймами (неподвижными 2) и двумя резиновыми манжетами (верхней 3 и нижней 4).

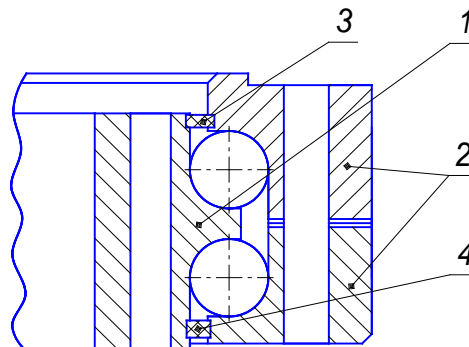


Рисунок 1 – Конструкция поворотной опоры

Обоснование проекта на начальных этапах выполняется расчетным методом, моделированием, изучением прототипов и аналогов. Экспериментальные исследования на этих этапах служат подтверждением расчетных условий, силовых и кинематических схем, выбранных критериев и конструкционных материалов.

Таким образом, для оптимизации и усовершенствования конструкции одного расчетного метода недостаточно, а поэтому требуется подтверждение правильности выбора конструкции и при необходимости улучшение технико-экономических показателей на основе экспериментальных исследований

Анализ последних достижений и публикаций

В процессе разработки конструкции для обеспечения ее надежности обычно ограничиваются рядом прочностных расчетов. Расчеты основаны на методах определения усилий и напряжений в опорах кранов [1] и поворотных шариковых опор башен танков [2]. Ресурс опор оценивается согласно нормативным документам [3 - 5].

Проведенный анализ определения сопротивления вращению в опорах [3] показал, что расчет не учитывает момента страгивания, являющегося существенным показателем для выбора мощности привода изменения угла поворота лопастей. Кроме того, при определении момента сопротивления вращению в опорах исходят из общих коэффициентов и ряда допусков, которые не в полной мере отражают действующие факторы.

Для решения указанной задачи – определения моментов сопротивления вращению и страгивания, в испытательной установке должна быть обеспечена возможность проворота обойм под нагрузкой. Такая схема может быть реализована с использованием дополнительного подшипникового узла, который, в свою очередь, должен выдерживать действующие нагрузки, и иметь заранее известный собственный момент сопротивления вращению. Готовых же стендов, позволяющих создать такие нагрузки, на Украине не существует.

Цель и постановка задачи

Определение опытным путем моментов сопротивления вращению и страгивания поворотной опоры при всех эксплуатационных нагрузках. Разработка и реализация схемы нагружения, позволяющая без значительных трудозатрат изменять требуемые режимы нагружения (опрокидывающий момент и осевую силу), разработка методики проведения испытаний и на этапе конструкторско-доводочных испытаний определение путей повышения качества, надежности и прочности.

Расчет момента трения в испытуемой поворотной опоре.

В этой части проведено сопоставление экспериментальных данных с расчетными величинами. Расчет момента трения в опоре поворотной вычисляется по формуле[3]:

$$M = M_0 + M_1, \quad (1)$$

где M_0 – момент трения, зависящий от конструкции подшипника, частоты вращения и вязкости смазки, кгс·м; M_1 – момент трения, зависящий от нагрузки на опору, кгс·м. Как видим, в этой формуле не учитывается момент трения манжет M_m , увеличивающий момент сопротивления вращению в опоре. Поэтому в последующем расчете учитывался момент трения манжет, который определялся экспериментально.

$$M_0 = f_g \cdot 10^{-8} \cdot (vn)^{2/3} d_0^3, \quad (2)$$

где d_0 – диаметр расположения ряда шаров, $d_0=1,085$ м; f_g – коэффициент, зависящий от типа подшипника, $f_g=4$; v – вязкость смазочного материала; n – эквивалентные обороты. Эквивалентные обороты $n = \frac{1}{30}$ мин⁻¹. Вязкость вычислена по данным [8, 9] как распределение между значениями для температур от минус 50 до 30 °С по экспоненциальному закону $1 \cdot e^{\frac{b(30+50)}{30+273}} = 1100$, откуда $b=26,524$. Испытания опор проводились при температуре 15 °С, таким образом, вязкость $\mu = 1 \cdot e^{\frac{b(30-T)}{30+273}} = 3,72 \text{ Па} \cdot \text{с}$, при этом динамическая вязкость $\nu = 10^6 \cdot \frac{\mu}{\rho}$, где $\rho=900$ кг/м³, составляет $\nu=4133$ сст. Учитывая что $(v \cdot n)=138 < 2000$, то принимаем $(v \cdot n)^{2/3}=160$.

$$M_1 = f_j \cdot P \cdot \left(\frac{P}{C_0} \right)^c \cdot d_0, \quad (3)$$

где P – статическая эквивалентная осевая нагрузка; C_0 – статическая эквивалентная осевая грузоподъемность подшипника f_j, c – коэффициенты, зависящие от типа подшипника. Принимаем $f_j=0,0012, c=0,33$.

Статическая эквивалентная осевая нагрузка рассчитана по формуле [1]:

$$P = 2,3 \cdot F_r + F_a, \quad (4)$$

где F_r – радиальная нагрузка, F_a – осевая нагрузка.

Радиальная нагрузка в условиях данной схемы нагружения поворотной опоры $F_r = 0$. Осевая нагрузка рассчитана по формуле:

$$F_a = T + 4,5 \cdot \frac{M_{on}}{d_0}, \quad (5)$$

где T – осевая нагрузка, M_{on} – опрокидывающий момент.

Базовая статическая осевая грузоподъемность находится по формуле [5]:

$$C_0 = 5 \cdot z \cdot d_0^2 \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

где z – количество тел качения в одном ряду $z = 81$; α – номинальный угол контакта (угол между линией действия нагрузки и плоскостью, перпендикулярный к оси подшипника) $\alpha = 45^\circ$.

Результаты расчетов и эксперимента приведены в таблице и представлены в виде графика на рисунке 2.

Таблица

T, кН	M _{оп} , кН·м	P, кН	M ₀ , кН·м	M ₁ , кН·м	M _м , кН·м	M _{расч} , Н·м	M _{эксп} , Н·м	
							M _{стр}	M _{вр}
9,22	2,55	2018	80	4	120	204	230	219
55,33	74,48	37121		215		415	348,5	334
101,44	146,40	72147		520		720	565,5	537
147,54	218,33	107589		885		1085	855	681

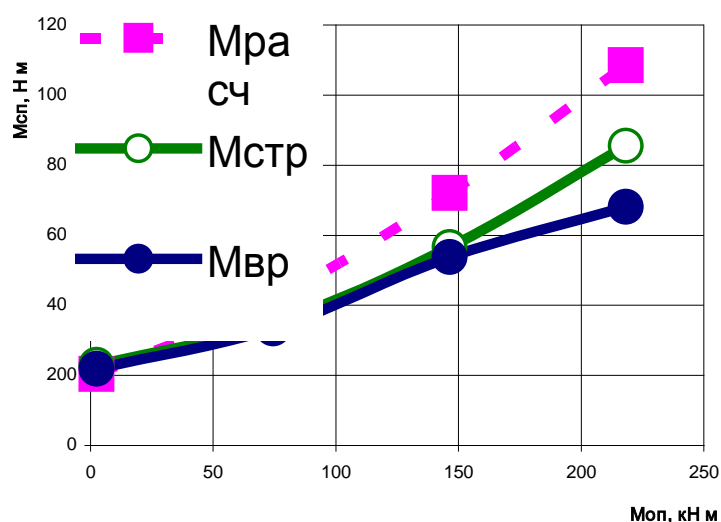


Рисунок 2 – Момент трения в опоре от опрокидывающего момента

Учитывая, что опора будет работать и при отрицательной температуре, то с учетом температурной поправки, M₀ при температуре минус 20 °С увеличится с 80 Н·м до 103 Н·м, т.е. увеличится незначительно. Это обусловлено тем, что проворот опоры осуществляется с малой скоростью и следовательно вязкость смазочного материала при температуре в диапазоне от минус 20 до 50°С практически не влияет на момент трения. Таким образом, общий момент трения в опоре, зависит в основном от приложенной нагрузки. Поэтому экспериментальные данные могут быть основой для дальнейшего расчета выбора приводных механизмов и кинематических схем.

Экспериментальные исследования

В КП ХКБМ на основе стэнда объемного нагружения была разработана и изготовлена компактная экспериментальная установка, в которой вместо дополнительного подшипникового узла использовалась вторая (аналогичная из комплекта) поворотная опора. Установка (рис. 3) состоит из двух поворотных опор, жестко скрепленных между собой по наружным обоймам. Внутренняя обойма нижней опоры (1) закрепляется на монтажной плите (основании стэнда), а к внутренней обойме верхней опоры (3) через переходную деталь (4) крепится нагружающий рычаг (5). Требуемое осевое усилие P и опрокидывающий момент M создаются приложением к рычагу вертикального усилия от гидродомкрата стэнда на расстоянии L. Проворот пакета из двух подвижных (наружных) обойм относительно внутренних (неподвижных) осуществляется лебедкой с червячным приводом (7) через динамометр (6). Такая конструкция, с использованием 2-х одинаковых опор, устраняет неконтролируемые моменты сопротивления (страгивания и вращению) и позволяет ускорить процесс обкатки поворотных опор.

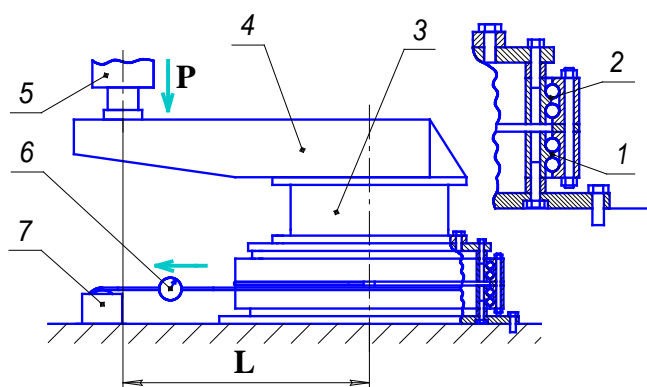


Рисунок 3 – Схема нагружения поворотных опор

При испытаниях определяется суммарный момент сопротивления двух поворотных опор. Для определения характеристик каждой опоры необходимо провести испытания с тремя аналогичными опорами, используя все комбинации.

Дополнительно для подтверждения прочностных расчетов и ресурса опоры, а также выбора режима термообработки и конструктивных улучшений, были проведены испытания на образцах свидетелей. Статические (для проверки прочности) и динамические (ресурсные испытания) нагрузки рассчитывались по методам расчета подшипников качения [5]. Стендовые испытания подтвердили прочность и ресурс опоры, определенные расчетным путем в процессе ее проектирования.

Экспериментальная оценка позволяет выполнять опережающие разработки принципиально новых узлов, соединений, деталей с целью получения ожидаемых лучших характеристик по прочности, долговечности, изнашиванию и т.д. по сравнению с данными известных технических решений.

Выводы

1. Разработана и создана установка, позволяющая определять опытным путем моменты сопротивления страгивания и вращению крупногабаритных поворотных элементов (таких как поворотные опоры лопастей ВЭУ), а также проводить их обкатку и ресурсные испытания.

2. Экспериментальные исследования образцов свидетелей вносят существенные поправки, направленные на повышения прочности и ресурса опоры на стадии изготовления.

3. Экспериментальное определение момента трения в опоре является одним из важных и необходимых мероприятий оценки качества изготовления крупногабаритных поворотных опор.

4. Экспериментальное определение момента трения в опоре подтвердило правильность выбора расчета, уточнив при этом моменты сопротивления страгивания и вращению.

Полученные результаты измерений могут быть использованы для уточнения расчетов аналогичных узлов.

Литература

1. М.П. Александров Подъемно-транспортные машины. Учебник для вузов. М. «Высшая школа», 1985.
2. С.С.Буров Конструкция и расчет танков. М. 1973. Академия противотанковых войск.
3. Подшипники качения, Справочник. Безельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я., Машиностроение. 1975.
4. Г.П.Алексеев, И.С.Мазовер Справочник конструктора машиностроителя. Судпромгиз. Ленинград. 1961.
5. ГОСТ 1885494 (ИСО 76-87) Межгосударственный стандарт. Подшипники качения. Статическая грузоподъемность.
6. ГОСТ 18855-94 (ИСО 281-89) Межгосударственный стандарт. Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс.

7. ГОСТ 17594-87 (ИСО 898/1-78) Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний.
8. ГОСТ 8773-73 Смазки ЦИАТИМ-203 Технические условия.
9. ГОСТ 62774 Смазка ЦИАТИМ-201 Технические условия. 10. ВЭУ 500.008 РР-01 Расчет прочности поворотного кольца ВЭУ-500.

Bibliography (transliterated)

1. M.P. Aleksandrov Pod'emno-transportnye mashiny. Uchebnyk dlja vuzov. M. «Vysshaja shkola», 1985.
2. S.S.Burov Konstrukcija i raschet tankov. M. 1973. Akademija protivotankovyh vojsk.
3. Podshipniki kachenija, Spravochnik. Bezel'man R.D., Сypkin B.V., Perel' L.Ja., Mashinostroenie. 1975.
4. G.P.Alekseev, I.S.Mazover Spravochnik konstruktora mashinostroitelja. Sudpromgiz. Leningrad. 1961.
5. GOST 1885494 (ISO 76-87) Mezghosudarstvennyj standart. Podshipniki kachenija. Sticheseskaja gruzopod'emnost'.
6. GOST 18855-94 (ISO 281-89) Mezghosudarstvennyj standart. Podshipniki kachenija. Dinamicheskaja raschetnaja gruzopod'emnost' i raschetnyj resurs.
7. GOST 17594-87 (ISO 898/1-78) Bolty, vinty i shpil'ki. Mehanicheskie svojstva i metody ispytanij.
8. GOST 8773-73 Смазки ЦИАТИМ-203 Технические условия.
9. GOST 62774 Смазка ЦИАТИМ-201 Технические условия. 10. ВJeU 500.008 RR-01 Расчет прочности поворотного кол'ца VJeU-500.

УДК 623.205

Токар С.С., Дудко В.В., Афонський П.В., Мормило Я.М., Каторгін О.М.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОМЕНТУ ОПОРУ ОБЕРТУ
У ПОВОРОТНІЙ ОПОРІ ЛОПАСТІ ВЕУ**

Розроблено та створено установку, яка дозволяє визначати дослідним шляхом момент опору зрушуванню та обертанню великогабаритних елементів, а також проводити їхню обкатку та ресурсні випробування.

Toкар S.E., Dudko V.V., Afonskiy P.V., Mormilo J.M., Katorgin A.N.

**EXPERIMENTAL DETERMINATION MOMENT OF THE RESISTANCE TO ROTATION
IN THUMB FULL TILT OF THE BLADES WEI (WINDS-ENERGY INSTALLATION)**

It is designed and created installation allowing defines experienced way moments resistances touch and rotation greater thumb element as well as conduct there smooth by rolling and resources of the test.