

УДК 62-115

*А. В. Щенятский*, доктор технических наук, профессор  
*Р. А. Рудин*, магистрант  
*К. А. Горбунова*, магистрант  
*А. А. Имангулова*, аспирант  
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ ОПОР

*Рассмотрены существующие стенды для испытания подшипников. Разработана кинематическая схема стенда. Для выявления направления и величины реакции в опоре, которая может отклониться на некоторый угол, создана математическая модель – интегрированный датчик направления силы (ИДНС), оптимизированы его параметры для исследований.*

**Ключевые слова:** стенд для испытания подшипников, контроль, подшипники качения, реакция в подшипниковой опоре, напряженно-деформированное состояние (НДС), интегрированный датчик направления силы (ИДНС).

В современных условиях одной из важных проблем в машиностроении является проблема преждевременного выхода из строя подшипника качения. Подшипник является одним из наиболее ответственных узлов практически любого механизма, выход его из строя может не только стать причиной остановки отдельного механизма, но и привести к нарушению всего производственного цикла, серьезным разрушениям и простоям, что повлечет за собой значительные экономические потери. Поэтому остро стоит вопрос качественного контроля подшипников на

многих предприятиях, как изготавливающих, так и применяющих их в различных механизмах.

Многие предприятия осуществляют входной контроль подшипников. Для этого используются стенды анализа технического состояния подшипников. Стенды предназначены для корректного выявления дефектов подшипников качения (новых и бывших в употреблении).

На рис. 1 и 2 представлены основные кинематические схемы существующих стендов СВК-04 (рис. 1) [1] и ПРОТОН-СПП-2 (рис. 2) [2].

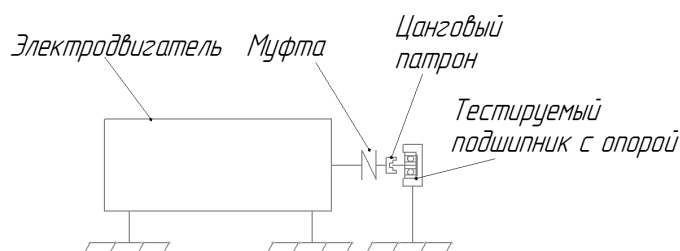


Рис. 1. Кинематическая схема стенда СВК-04

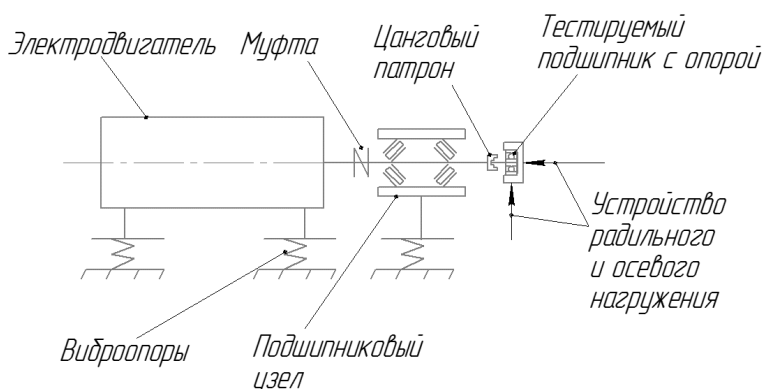


Рис. 2. Кинематическая схема стенда ПРОТОН-СПП-2

Оба стенда осуществляют вибрационный контроль подшипников [3]. Стенд на рис. 2 является более совершенным, так как он позволяет имитировать осевую и радиальную нагрузки на исследуемый подшипник. Стенд может эксплуатироваться в цехах основных производств, а также в лабораториях виброконтроля подшипников. Для гашения посторонних

шумов (колебаний) от пола цеха и колебаний, передаваемых от привода, узлы осевого и радиального нагружения оснащены специальными амортизаторами. На полу стенд стоит на четырех виброопорах.

Анализ конструкций подшипниковых опор [4] показал, что в зависимости от схемы установки, способа нагружения, конструктивных особенностей из-

деля, условий смазки, ремонтпригодности и много другого корпуса и цапфы имеют различную и многообразную геометрию. Несомненно, что неравножесткая форма корпуса подшипниковой опоры влияет на распределение контактного давления между ним и внешним кольцом подшипника [5] и, как следствие, на напряженно-деформированное состояние (НДС) [6] элементов подшипника и их долговечность даже при соблюдении необходимых режимов смазывания. В большинстве механизмов подшипниковые опоры эксплуатируются на различных скоростях, которые изменяются от нуля до предельных величин в соответствии с режимом работы оборудования.

Проведенный предварительный анализ условий взаимодействия подшипника с неподвижным корпусом при различных режимах и скоростях нагружения показал, что направление реакции в опоре может

отклониться на некоторый угол, величина которого зависит, на наш взгляд, от режимов нагружения, точности изготовления корпуса, его жесткости, условий смазки и состояния самого подшипника. Для определения угла отклонения реакции в опоре на кафедре «Мехатронные системы» ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» разрабатывают испытательный стенд, кинематическая схема которого представлена на рис. 3.

Перед изготовлением основных составных частей стенда для сокращения времени подготовки и отработки конструкции узла определения направления и величины реакции неравножесткой опоры было предложено создать математическую модель интегрального датчика направления силы (ИДНС), провести исследования, дающие возможность оптимизировать ее параметры для планируемых исследований.

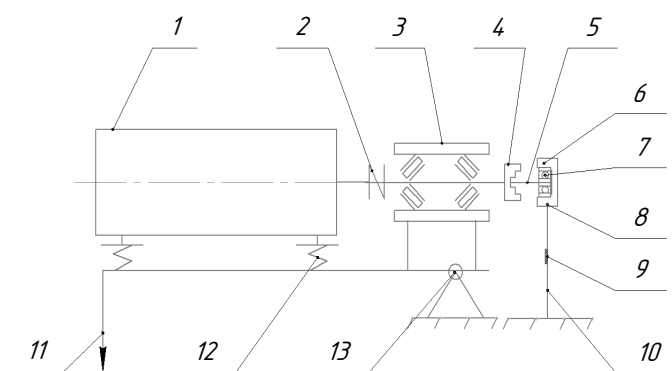


Рис. 3. Кинематическая схема разрабатываемого стенда

Стенд состоит из электродвигателя 1, муфты 2, шпинделя в сборе 3, цангового патрона 4, сменного вала 5, неравножесткой переустанавливаемой подшипниковой опоры 6 с испытуемым подшипником 7, датчика вибрации 8, тензометрических датчиков 9, ИДНС 10, узла радиального нагружения 11, виброопор 12, качающейся опоры 13. На опоре подшипника 6 установлены датчики 8 для измерения вибропараметров подшипника, для гашения вибрации от двигателя используются виброопоры 12.

Вследствие отклонений формы и размеров деталей от идеальной подшипники качения уже в состоянии поставки (т. е. в исправном состоянии) работают с механическими ударами, интенсивность которых значительно возрастает при повреждениях. В точке удара тела качения о кольцо подшипника возникают ударные, быстро затухающие в теле обоймы подшипника волны сжатия [7]. Для оценки состояния подшипникового узла используется датчик измерения вибропараметров.

Из-за того что направление силы реакции опоры при различных скоростях вращения вала 5 и положениях неравножесткой опоры 6 изменяется, ИДНС деформируется неравномерно. ИДНС представляет собой стальную пластину толщиной 10 мм с вырезами для разделения пластины на секторы. На каждом секторе установлены тензометрические датчики 9 по

стандартной мостовой схеме [8]. Напряжения в каждом секторе пластины зависят от направления и величины силы реакции опоры.

При отработке конструкции ИДНС с помощью системы твердотельного 3D-моделирования проведено исследование двух вариантов пластины при различных условиях нагружения (рис. 4, а).

Предполагаемые места установки тензодатчиков представлены на рис. 4, б. Параметры секторов выбирались таким образом, чтобы деформации и напряжения в ИДНС были меньше предела упругости материала пластины, а тензометрические датчики могли быть размещены в соответствии с выбранной схемой измерения (рис. 4, б).

Реальная конструкция стенда обеспечивает возникновение радиальной силы и изгибающего момента, которые действуют на подшипниковую опору. Поскольку реакция в процессе испытания может отклоняться на некоторый угол в плоскости, перпендикулярной оси Z, совпадающей с осью вала, то возникает необходимость определения этого угла и самой величины реакции. На указанные параметры влияют и такие факторы, как жесткость конструкции, которая оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние узла и может изменяться как по величине, так и по направлению.

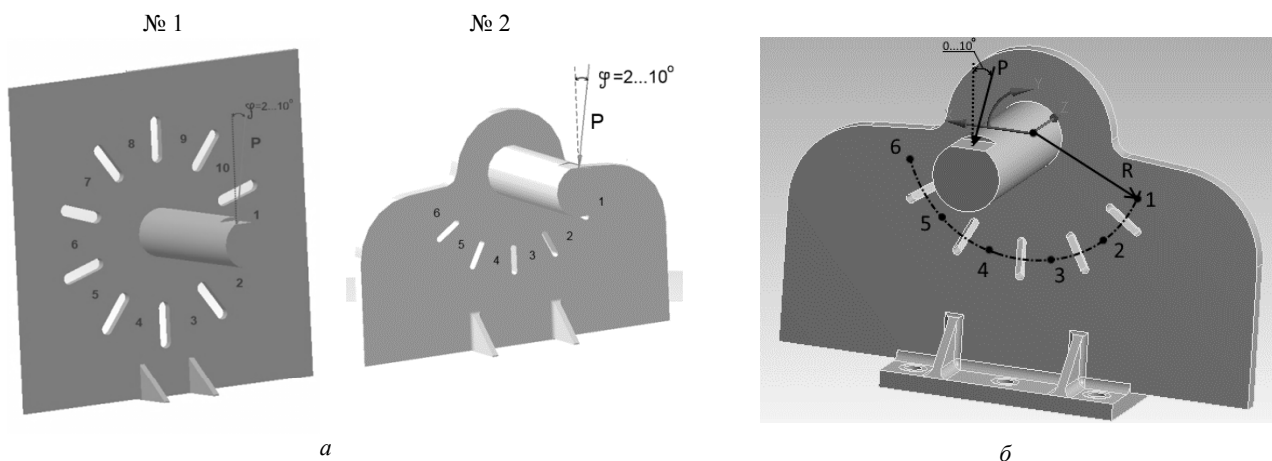


Рис. 4. Схема: а – нагрузки вариантов измерительной пластины; б – измерения напряжений

Под действием внешней нагрузки, передаваемой от вала через подшипник корпусу опоры, жестко закрепленному на пластине, в секторах последней возникают деформации и напряжения.

Для оценки влияния реакции и направления ее действия на НДС пластины разработана соответствующая методика:

1. На первом этапе устанавливается корпус с постоянной жесткостью на пластину.
2. На втором этапе задается величина внешней нагрузки.
3. На третьем этапе задаются 6 вариантов направлений внешней нагрузки.
4. Определяются напряжения в средних точках предполагаемой установки тензодатчиков (таблица) от каждой нагрузки (6 вариантов).

По полученным данным определяем зависимость угла поворота от напряжений.

При проведении расчетов принято условие, что нижние границы пластины и ребер жесткости были неподвижными. Деформации были упругими.

Исходя из НДС пластин со стороны действия нагрузки (на рис. 5) видно, что в секторах под номерами 7–10 изменение напряженно-деформированного состояния незначительное, и его измерение не обеспечит качественной оценки величины и направления силы реакции опоры. В качестве окончательного варианта была выбрана пластина № 2.

На основе результатов моделирования построена таблица и диаграмма (рис. 6) радиальных напряжений  $\sigma_r$  (совпадают с направлением оси  $x$ , повернутой на угол  $Y$ , см. рис. 4, б) в точках, расположенных в середине секторов ИДНС на радиусе  $R=70$  мм.

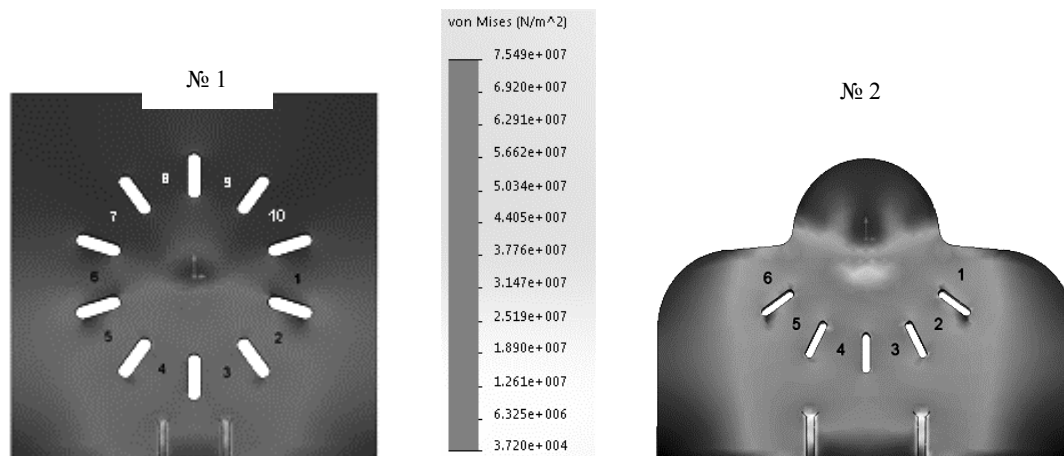


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние (НДС) вариантов пластины со шкалой напряжений

Напряжения в секторах ИДНС

| φ, град | Радиальные напряжения в секторах $\sigma_r$ , МПа |        |        |        |        |        |
|---------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | 1   | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |
| 0       | -9,48   | -23,61 | -33,45 | -33,45 | -23,61 | -9,48  |
| 2       | -8,94   | -22,38 | -32,92 | -33,82 | -24,24 | -10,41 |
| 4       | -8,4  | -21,58 | -32,75 | -34,13 | -24,66 | -10,82 |
| 6       | -7,42   | -21,15 | -32,6  | -34,21 | -24,83 | -11,15 |
| 8       | -6,83   | -20,75 | -32,23 | -34,5  | -25,03 | -11,23 |
| 10      | -6,12   | -20,22 | -31,66 | -34,9  | -25,54 | -12,05 |

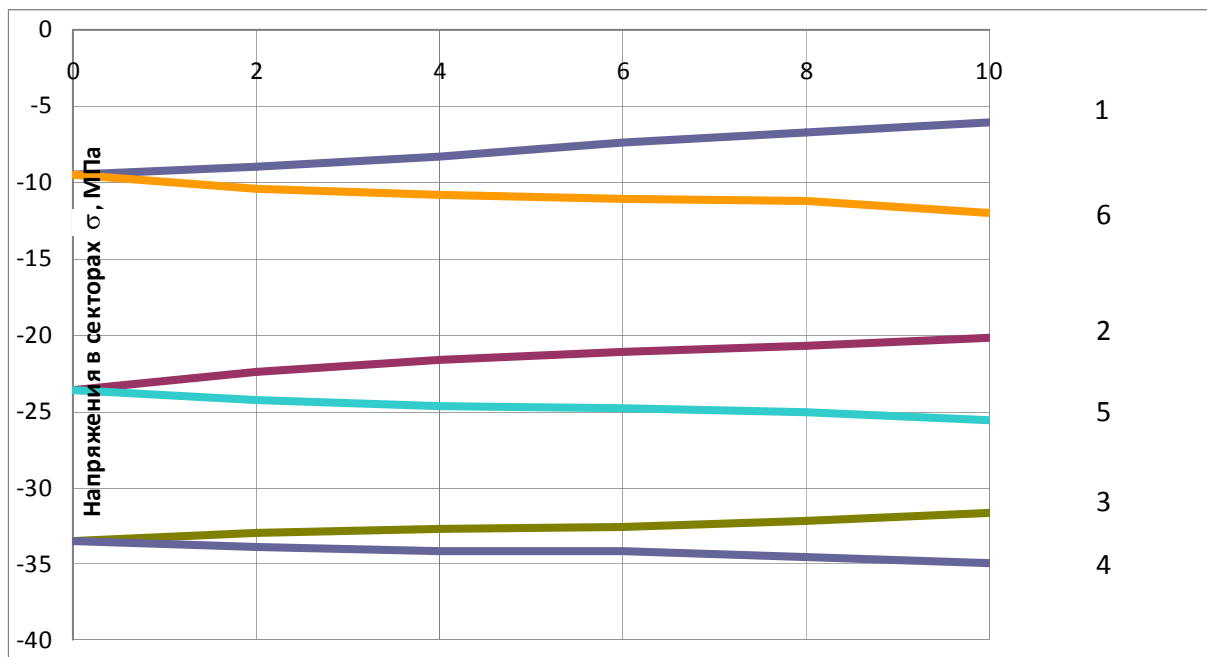


Рис. 6. Диаграмма радиальных напряжений

На основе полученных результатов, представленных в таблице, и уравнения:

$$\varphi = k_1\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3\sigma_3 + k_4\sigma_4 + k_5\sigma_5 + k_6\sigma_6 \quad (1)$$

для 6 случаев получена зависимость угла отклонения реакции  $\varphi$  в подшипниковой опоре от напряжений  $\sigma_i$ ;  $k_i$  – коэффициент, определяющий положение сектора;  $\sigma_i$  – напряжение на  $i$ -м секторе.

Проведя решение уравнения (1) с применением обратной матрицы [9], получили зависимость угла реакции опоры от напряжений в секторах ИДНС в виде:  $\varphi = 2,024 \cdot \sigma_1$ .

$$\varphi = 2,024 \cdot \sigma_1 - 0,279 \cdot \sigma_2 + 1,266 \cdot \sigma_3 + 2,572 \cdot \sigma_4 - 7,293 \cdot \sigma_5 + 3,294 \cdot \sigma_6. \quad (2)$$

Поскольку напряжения в секторах определялись для максимального значения внешней нагрузки, равной величине динамической грузоподъемности исследуемого подшипника  $C = 3100$  Н, то для определения угла отклонения реакции от любой нагрузки  $P$  введем поправочный коэффициент  $\frac{P}{3100}$ , и зависимость приобретет вид:

$$\varphi = \frac{P}{3100} [2,024 \cdot \sigma_1 - 0,279 \cdot \sigma_2 + 1,266 \cdot \sigma_3 + 2,572 \cdot \sigma_4 - 7,293 \cdot \sigma_5 + 3,294 \cdot \sigma_6]. \quad (3)$$

Анализ напряженно-деформированного состояния ИДНС со стороны нагрузки показывает, что при увеличении угла отклонения внешней нагрузки от вертикали в диапазоне от 0 до 10 градусов на секторах 1–3 происходит уменьшение напряжений, т. к. возникает эффект растяжения, обусловленный схемой нагружения, а в секторах 4–6 напряжения продолжают расти по абсолютной величине. На противоположной стороне ИДНС возникают растягивающие напряжения.

Наибольшие изменения напряжений наблюдаются в секторах 1 и 6, что обусловлено, с одной стороны, их большей жесткостью, с другой – крайним расположением в конструкции, которое сказывается более сильно.

Расположение тензодатчиков в указанных точках с одной стороны пластины ИДНС позволит, на наш взгляд, достаточно точно определить направление и величину реакции неравножесткой опоры, которая крепится с помощью винтов к ИДНС. Количество и месторасположение винтов позволяет изменять же-

сткость корпуса и поворачивать его на угол  $45^\circ$  в обоих направлениях.

Кинематические параметры вращения вала, оказывающие влияние на направление реакции в опоре, так же, как и ее переменная жесткость, определяются при дальнейших экспериментальных исследованиях.

### Заключение

На основе анализа существующих конструкций стендов для определения дефектов в подшипниках, предлагаемых на рынке, разработана кинематическая схема нового стенда. Смоделировано несколько вариантов ИДНС, при помощи системы твердотельного моделирования выбрана оптимальная форма. Подготовлена конечно-элементная модель и проведены исследования поведения ИДНС под различной нагрузкой, позволившие определить зависимость угла отклонения реакции в опоре от ее величины и напряжений, возникающих в секторах ИДНС:

$$\varphi = \frac{P}{3100} [2,024 \cdot \sigma_1 - 0,279 \cdot \sigma_2 + 1,266 \cdot \sigma_3 + 2,572 \cdot \sigma_4 - 7,293 \cdot \sigma_5 + 3,294 \cdot \sigma]$$

*Schenyatsky A. V.*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU;  
*Rudin R. A.*, Master's degree student, Kalashnikov ISTU;  
*Gorbunova K. A.*, Master's degree student, Kalashnikov ISTU;  
*Imangulova A. A.*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

### Improvement of test equipment for bearing arrangements

*The existing stands for testing of bearings are considered. The kinematics scheme of the test stand is developed. To detect the direction and magnitude of the reaction in the support, which may deviate by a certain angle, a mathematical model of the integrated sensor of the force direction (ISFD) is developed and its parameters are optimized for research purposes.*

**Keywords:** bearing test stand, control, bearings, bearing support reaction, stress-strain state (SSS), integrated sensor of the force direction (ISFD).

Получено: 12.05.15

### Библиографические ссылки

1. Входной контроль подшипников на стенде СВК-04. – URL: <http://www.promnavigator.ru/innovations/technologies/d1469/> (дата обращения: 15.10.2014).
2. Стенд проверки подшипников качения Протон СПП – 2. – URL: [http://www.baltech.ru/files/spp-ii\(40-50\).pdf](http://www.baltech.ru/files/spp-ii(40-50).pdf) (дата обращения: 15.10.2014).
3. Специальные методы измерения и анализа вибрации подшипников качения. ГОСТ ИСО 10816-1-97.
4. *Иванов М. Н.* Детали машин : учеб. пособие для вузов. – Изд. 3-е, доп. и перераб. – М. : Высш. шк., 1976. – 332 с.
5. *Щенятский А. В., Чухланцев Е. С.* Поликонтактные неравножесткие соединения с натягом и анализ их нагрузочной способности // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2 (20). – С. 80–83.
6. *Матвиенко Ю. Г., Бубнов М. А.* Контактное взаимодействие и разрушение поверхностного слоя в условиях трения качения и заклинивания // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М., 2009.
7. *Соколова А. Г.* Методы виброакустической диагностики зарождающихся эксплуатационных дефектов механизмов // Точность и надежность механических систем. – Рига, 1984.
8. Формирование тензометрических мостовых схем. – URL: <http://www.zetlab.ru/support/articles/tenzometriya/formirovanie-tenzometricheskikh-mostovykh-skhem/> (дата обращения: 10.03.2015).
9. Решение системы линейных уравнений методом обратной матрицы. – URL: <http://help-informatika.ru/primery-reshenij/zadachi-v-excel/8-reshenie-sistemy-uravnenij> (дата обращения: 18.03.2015).

\*\*\*