

УДК 621.82

Экспериментальное исследование подшипников качения

В.С. Сыромятников, С.Ю. Гончаров, О.А. Ряховский

По результатам многофакторного эксперимента исследована зависимость момента сопротивления вращению подшипника от нагрузки, частоты вращения вала, уровня масла и их взаимодействий. Статистический анализ экспериментальных данных выполнен в пакете STATGRAPHIC PLUS. Адекватность результатов эксперимента обоснована «нормальным распределением остатков». С помощью дисперсионного анализа определена относительная значимость факторов и их взаимодействий. Получена регрессия момента сопротивления вращения подшипника по трем факторам. Методика эксперимента и статистического анализа может быть использована при исследованиях различных типов подшипников.

Ключевые слова: подшипник качения, план эксперимента, ANOVA, регрессионный анализ.

Experimental Research of Rolling Bearings

V.S. Syromyatnikov, S.Yu. Goncharov, O.A. Ryahovskiy

Based on the results of multiple-factor experiment the dependence of the moment of resistance to the bearing rotation on the load as well as on the shaft speed, the oil level and their interaction is investigated. Statistical analysis of experimental data was performed through the use of STATGRAPHIC PLUS package. Experiment results adequacy is proved by «the normal distribution of the residuals». Relative impacts of the factors and their interactions are defined by using the dispersive analysis. Three-factor regression equation of the moment of resistance to the bearing rotation is received by means of ANOVA. Experimental and statistical analysis technique can be used in further studies of different types of bearings.

Keywords: rolling bearing, design of experiment, ANOVA, regression analysis.

Подшипники качения служат для крепления валов и осей в корпусах машин. Их используют в бытовых приборах, автомобилях, аэрокосмических системах. От качества подшипников зависит работоспособность машин: производительность, точность, бесшумность, долговечность и др. В 2007 г. в фирмах, выпускающих подшипники, работало более 92 000 сотрудников, а объем продаж составлял 37 млрд. долл. К 2016 г. эта сумма должна превзойти 96 млрд. долл. [1]. Подшипники качения постоянно модернизируются: улучшается их конструкции, технологии и эксплуатации.



СЫРОМЯТНИКОВ
Владимир Сергеевич

кандидат технических наук,
доцент
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

SYROMYATNIKOV
Vladimir Sergeevich
Cand. Sc. (Eng.),
Associate Professor
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named
after N.E. Bauman)



ГОНЧАРОВ
Сергей Юрьевич

инженер
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

GONCHAROV
Sergey Yurievich
Engineer
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named
after N.E. Bauman)



РЯХОВСКИЙ
Олег Анатольевич

доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

RYAHOVSKIY
Oleg Anatolyevich
Dr. Sc. (Eng.), Professor,
Head of Department
(Moscow, Russian Federation,
MSTU named
after N.E. Bauman)

Основной рабочей характеристикой подшипника является коэффициент полезного действия (КПД). Как составляющая часть общего КПД машины он используется при расчете мощности привода. Значение КПД связано с сопротивлением вращению подшипника, которое зависит от конструкции, точности и чистоты поверхностей деталей, нагрузки, типа смазки и др. Замена трения скольжения трением качения позволяет уменьшить сопротивление в подшипниках при средних частотах вращения в 3–6 раз и в 10–15 раз при пуске.

Подшипник состоит из наружного и внутреннего колец, шариков и сепаратора для равномерного распределения их по окружности между кольцами (рис. 1). На поверхности колец имеются дорожки качения, по которым перекатываются тела качения при вращении одного из колец.

В технической литературе [2] момент сопротивления вращению определяется по упрощенной формуле:

$$T_{\text{под}} = F_r f \frac{d}{2}, \quad (1)$$

где F_r — радиальная нагрузка; f — приведенный коэффициент трения; d — внутренний диаметр кольца подшипника.

При необходимости более точного расчета возникают трудности, обусловленные особенностями работы подшипника. Например, на величину сопротивления вращению подшипника может влиять небольшой перекос колец. Это приводит к смещению шариков и неравномерности их вращения, вызывающей проскальзывание точек контакта относительно беговых дорожек и ячеек сепаратора. Возможны также автоколебания шариков из-за погрешностей их диаметров или биений дорожек качения, боковых и радиальных [3]. Эти и другие явления, присущие работе подшипников, носят случайный характер и препятствуют точному аналитическому решению.

В качестве альтернативы в этой работе для исследования момента сопротивления вращению подшипника использован эксперимент и статистический анализ данных эксперимента. Была подготовлена установка для исследо-

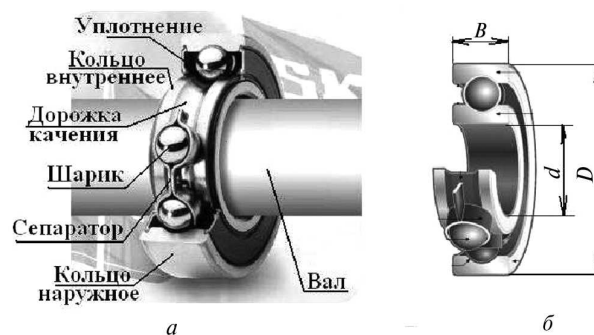


Рис. 1. Подшипники шариковые радиальные однорядные:

а — с уплотнениями ГОСТ 8882–75;

б — без уплотнений ГОСТ 8338–75

вания стандартного радиального подшипника легкой серии № 208 ГОСТ 8338 —75 [4]. Цель работы — определение момента сопротивления вращению в зависимости от трех факторов: скорости вращения внутреннего кольца подшипника, нагрузки и уровня масла. В технической литературе обычно не определяют взаимное влияние скорости вращения подшипника, нагрузки и уровня масла на величину момента сопротивления вращению, т. е. не учитывают взаимодействие факторов. Этот пробел необходимо было восполнить. Ставилась задача проверки пригодности лабораторной установки для проведения факторного эксперимента и оценки его возможных сценариев. Одновременно определялась относительная значимость факторов и их взаимодействий. Оценивалась степень изменчивости момента сопротивления вращению подшипника от контролируемых факторов и от случайных ошибок, вызванных погрешностями измерений, колебаниями скорости, нагрузки, уровня смазки и др. Для применения на практике результатов исследования необходимо было получить регрессию момента сопротивления вращению по факторам и их взаимодействиям [5].

Экспериментальная установка. Стенд для измерения момента сопротивления вращению подшипника и температуры масла содержит электродвигатель и клиноременную передачу со ступенчатыми шкивами (рис. 2). Четыре подшипника установлены в общей головке, из них два средних в обойме под динамометрической скобой. Для измерения температуры смазки использован термометр. Изменение

уровня смазочного материала внутри головки с подшипниками выполняют с помощью штока. Момент сопротивления вращению измеряют по отклонению стрелки маятника относительно шкалы или с помощью тензометрических датчиков (на рис. 2 не показаны). Нагрузочное приспособление состоит из винта, индикатора и динамометрической скобы.

Для изменения угловой скорости вращения приводного вала с подшипниками используют 3-ступенчатую клиноременную передачу: $n_1 = 102 \text{ с}^{-1}$ (955 об./мин), $n_2 = 200 \text{ с}^{-1}$ (1 910 об./мин), $n_3 = 300 \text{ с}^{-1}$ (2 865 об./мин). Нагрузки F (Н) на подшипники определяют по тарировочному графику скобы (рис. 3) или по формуле

$$F = 159,93 + 44,72 N, \quad (2)$$

где N — число делений индикатора (см. рис. 2).

Значение силы F устанавливают винтом по числу делений индикатора N , например,

при $N_1 = 100$ делений $F_1 = 159,93 + 44,72(100) = 4 632 \text{ Н}$;

при $N_2 = 150$ делений $F_2 = 159,93 + 44,72(150) = 6 868 \text{ Н}$;

при $N_3 = 200$ делений $F_3 = 159,93 + 44,72(200) = 9 097 \text{ Н}$.

Распределение нагрузки F между подшипниками представлено на рис. 4.

При проведении эксперимента момент сопротивления вращению измерялся для четырех подшипников (см. рис. 2, рис. 4):

$$T = 4 T_{\text{под}} = Ffd, \quad (3)$$

где $T_{\text{под}}$ — момент сопротивления вращению одного подшипника, $T_{\text{под}} = F_r f \frac{d}{2} = \frac{1}{4} F f d$; f —

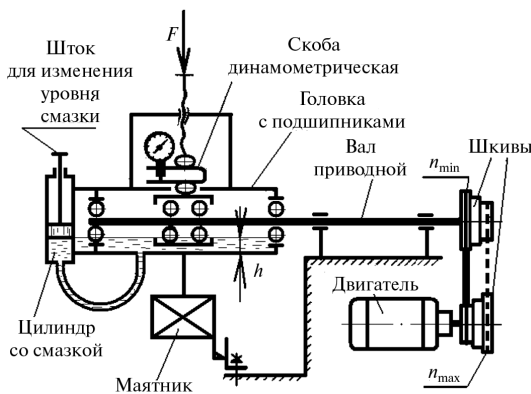


Рис. 2. Стенд для определения момента сопротивления вращению в подшипниках качения

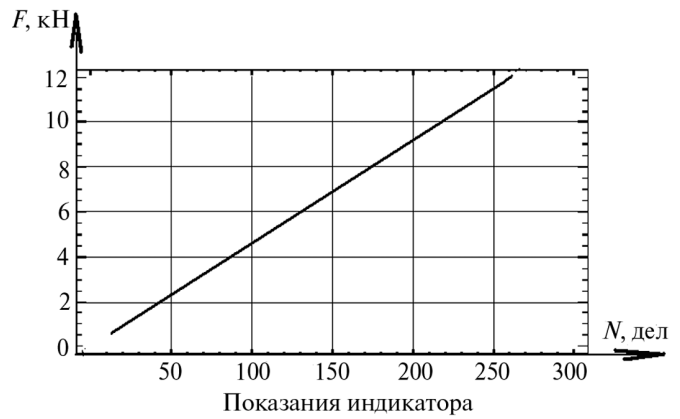


Рис. 3. Тарировочный график динамометрической скобы 171

приведенный коэффициент трения; d — внутренний диаметр кольца подшипника, $d = 0,040 \text{ м}$.

При известных значениях момента сопротивления вращению T , силы F и диаметра d по формуле (3) можно найти приведенный коэффициент трения:

$$f = \frac{T}{F d}. \quad (4)$$

Уровень смазки h в испытательной головке (см. рис. 2) может быть установлен штоком на разной высоте, например:

$h_1 = 5 \text{ мм}$ — до погружения в масло наружного кольца подшипника;

$h_2 = 10 \text{ мм}$ — до центра нижнего шарика;

$h_3 = 15 \text{ мм}$ — до погружения в масло нижнего шарика.

План эксперимента. При исследовании зависимость переменной отклика T (момент сопротивления вращению подшипников) от частоты вращения вала n , нагрузки F и уровня смазки h

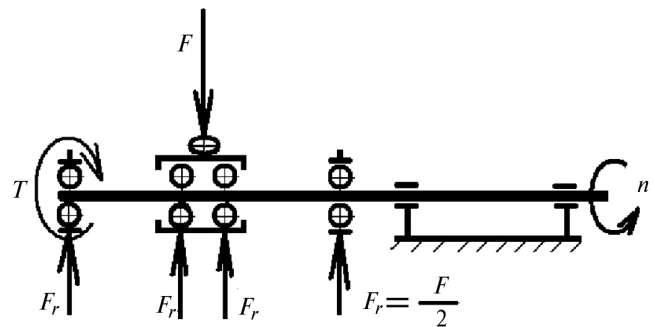


Рис. 4. Схема распределения нагрузки между подшипниками

можно определить отдельно для каждого фактора, так называемые однофакторные эксперименты, или для совокупности факторов — двухфакторные или трехфакторные эксперименты, например:

$$T = \varphi(n); T = \varphi(n, F); T = \gamma(n, F, h). \quad (5)$$

В однофакторном эксперименте изменяют значение (уровень) только одного фактора, например:

$$T_1 = \varphi(n_1 = 102 \text{ с}^{-1}) \quad T_2 = \varphi(n_2 = 300 \text{ с}^{-1}). \quad (6)$$

В двухфакторных и трехфакторных экспериментах изменяют уровни всех факторов и определяют переменную отклика при всех комбинациях факторов. При двух уровнях варьирования каждого фактора в двухфакторном эксперименте число комбинаций составляет $2^2 = 4$, а в трехфакторном — $2^3 = 8$. При трех уровнях в трехфакторном эксперименте число комбинаций составляет $3^3 = 27$. Количество испытаний эксперимента зависит не только от числа комбинаций факторов, но и от числа параллельных испытаний (реплик) при одних и тех же уровнях факторов. Поскольку каждое измерение представляет собой случайную величину из-за тех или иных погрешностей, то дополнительные реплики повышают их точность [5]. Однако, с увеличением числа испытаний возрастает трудоемкость и продолжительность экспериментов.

Известно, что наиболее эффективными по точности и времени являются многофакторные

эксперименты [6]. В данной работе выбран трехфакторный эксперимент с двумя уровнями каждого фактора, план которого имеет код 2^3 . Число реплик $R = 3$. По этим данным в пакете STATGRAPHIC PLUS [7] получен рандомизированный блочный план отсеивающего (screening) эксперимента (табл. 1).

Повторные испытания сгруппированы в три блока с одинаковыми уровнями факторов и одинаковым чередованием их комбинаций. Общее число испытаний равно 24. Нагрузка F задана в делениях N индикатора (см. рис. 2): $N = 100$ дел., $N = 200$ дел., что соответствует силам:

$$F(N = 100) = 4\,632 \text{ Н}; \quad F(N = 200) = 9\,097 \text{ Н}.$$

Испытания проводились в соответствии с планом, представленным в табл. 1. Измерялись момент T и температура смазочного материала t ($^{\circ}\text{C}$) для первого блока, содержащего восемь комбинаций уровней факторов. Результаты испытаний приведены в табл. 2. Сравнение измерений момента T и температуры t ($^{\circ}\text{C}$) в трех блоках при одинаковых значениях факторов (n, N, h) табл. 2, показывает, что они имеют случайные отклонения.

Анализ результатов эксперимента. Для анализа данных эксперимента использованы методы математической статистики пакета STATGRAPHIC PLUS. Основным показателем адекватности результатов является нормальный закон распределения измерений. Значения момента сопротивления вращению в зависимости от уровней факторов и номера реплик приведены в табл. 3.

Таблица 1

План эксперимента 2^3 с тремя блоками (Число реплик $R = 3$)

Блок	$n, \text{ с}^{-1}$	$N, \text{ дел.}$	$h, \text{ мм}$	$T, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Блок	$n, \text{ с}^{-1}$	$N, \text{ дел.}$	$h, \text{ мм}$	$T, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Блок	$n, \text{ с}^{-1}$	$N, \text{ дел.}$	$h, \text{ мм}$	$T, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$t, \text{ }^{\circ}\text{C}$
1	300	100	15			2	300	100	15			3	300	100	15		
1	300	100	5			2	300	100	5			3	300	100	5		
1	300	200	15			2	300	200	15			3	300	200	15		
1	300	200	5			2	300	200	5			3	300	200	5		
1	102	100	5			2	102	100	5			3	102	100	5		
1	102	200	5			2	102	200	5			3	102	200	5		
1	102	100	15			2	102	100	15			3	102	100	15		
1	102	200	15			2	102	200	15			3	102	200	15		

Таблица 2

Результаты эксперимента с тремя факторами (n, N, h) на двух уровнях $= 2^3$

Блок	n, c^{-1}	$N, \text{дел.}$	$h, \text{мм}$	$T, \text{Н}\cdot\text{м}$	$t, ^\circ\text{C}$	Блок	n, c^{-1}	$N, \text{дел.}$	$h, \text{мм}$	$T, \text{Н}\cdot\text{м}$	$t, ^\circ\text{C}$	Блок	n, c^{-1}	$N, \text{дел.}$	$h, \text{мм}$	$T, \text{Н}\cdot\text{м}$	$t, ^\circ\text{C}$
1	300	100	15	0,32	56	2	300	100	15	0,35	61	3	300	100	15	0,35	64
1	300	100	5	0,34	37	2	300	100	5	0,28	45	3	300	100	5	0,26	50
1	300	200	15	0,8	63	2	300	200	15	0,76	66	3	300	200	15	0,75	68
1	300	200	5	0,61	43	2	300	200	5	0,58	48	3	300	200	5	0,68	52
1	102	100	5	0,19	50	2	102	100	5	0,2	51	3	102	100	5	0,2	51
1	102	200	5	0,65	51	2	102	200	5	0,62	51	3	102	200	5	0,61	51
1	102	100	15	0,2	52	2	102	100	15	0,22	52	3	102	100	15	0,22	52
1	102	200	15	0,62	53	2	102	200	15	0,62	54	3	102	200	15	0,66	53

Символически, момент сопротивления подшипника может быть обозначен как:

$$(T)_{ijk r}, \quad (7)$$

где $i = j = k = \{1, 2\}$ — индексы уровней факторов n, N и h ; $r = \{1, 2, 3\}$ — индекс реплик.

Проверку распределения измерений момента T выполняют с помощью анализа распределения остатков (табл. 4). Остаток измерения $e_{ijk r}$, определяется как разность измерения $T_{ijk r}$ и среднего значения T_{ijk}^{cp} в группе повторных испытаний (см. табл. 3). Например, для скорости $n_2 = 300 c^{-1}$, нагрузки $N_1 = 100 \text{ дел.}$, уровня масла $h_2 = 15 \text{ мм}$ и реплики $r_1 = 1$, остаток:

$$e_{2121} = T_{2121} - T_{212}^{cp} = 0,32 - 0,34 = -0,02 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (8)$$

На рисунке 5 приведен нормальный вероятностный график остатков с распределением точек, близким к прямой линии, что указывает на нормальное распределение измерений момента и адекватность экспериментальных данных [6].

Оценка значимости факторов для переменной отклика T выполнена с помощью дисперсионного анализа. Дисперсия определяет меру рассеивания измерений относительно среднего значения. Например, дисперсия от случайных погрешностей, находится с помощью средней суммы квадратов остатков:

$$\bar{S}_e^2 = \frac{\sum_i \sum_j \sum_k \sum_r e_{ijk r}^2}{DF}, \quad (9)$$

где $Df = I J K R = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 24$ — число степеней свободы; $I = J = K = 2$ — число уровней факторов; $R = 3$ — число реплик.

Результаты анализа дисперсий для T представлены в табл. 5. Расчеты выполнены по данным эксперимента, приведенным в табл. 3. Влияние или эффект факторов на значение момента T определяется суммами квадратов отклонений от общего среднего значения всех измерений. Средняя сумма квадратов отклоне-

Таблица 3

Момент сопротивления вращению подшипников $T, \text{Н}\cdot\text{м}$

	$N_1 = 100 \text{ дел.}$		$N_2 = 200 \text{ дел.}$		r_i
	$h_1 = 5 \text{ мм}$	$h_2 = 15 \text{ мм}$	$h_1 = 5 \text{ мм}$	$h_2 = 15 \text{ мм}$	
$n_1 = 102 c^{-1}$	0,19	0,20	0,65	0,62	$r_1 = 1$
	0,20	0,22	0,62	0,62	$r_2 = 2$
	0,20	0,22	0,61	0,66	$r_3 = 3$
$T^{cp}, \text{Н}\cdot\text{м}$	0,196667	0,213333	0,626667	0,633333	
$n_2 = 300 c^{-1}$	0,34	0,32	0,61	0,80	$r_1 = 1$
	0,28	0,35	0,58	0,76	$r_2 = 2$
	0,26	0,35	0,68	0,75	$r_3 = 3$
$T^{cp}, \text{Н}\cdot\text{м}$	0,293333	0,34	0,623333	0,77	

Остатки для T , Н·м

Частота вращения	$N_1 = 100$ дел.		$N_2 = 200$ дел.		r
	$h_1 = 5$ мм	$h_2 = 15$ мм	$h_1 = 5$ мм	$h_2 = 15$ мм	
$n_1 = 102 \text{ с}^{-1}$	-0,00666667	-0,01333333	0,02333333	-0,01333333	1
	0,00333333	0,00666667	-0,00666667	-0,01333333	2
	0,00333333	0,00666667	-0,01666667	0,02666667	3
$n_2 = 300 \text{ с}^{-1}$	0,04666667	-0,02	-0,01333333	0,03	1
	-0,01333333	0,01	-0,04333333	-0,01	2
	-0,03333333	0,01	0,05666667	-0,02	3

Таблица 5

 Анализ дисперсий для момента T , (ANOVA)*

Фактор влияния	Суммы квадратов отклонений	Степени свободы	Дисперсии	Статистика Фишера, F_0	Вероятность ошибки, p
n	0,0477042	1	0,0477042	58,71	0,0000
$N(F)$	0,972038	1	0,972038	1196,35	0,0000
h	0,0176042	1	0,0176042	21,67	0,0003
nN	0,0030375	1	0,0030375	3,74	0,0711
nh	0,0108375	1	0,0108375	13,34	0,0021
Nh	0,0030375	1	0,0030375	3,74	0,0711
nNh	0,0045375	1	0,0045375	5,58	0,0311
Случайные погрешности	0,013	16	0,0008125		
Общая сумма	1,0718	23			

* Для коэффициента детерминации $R^2 = 98,7871\%$.

ний или дисперсия, равна отношению суммы квадратов отклонений к числу степеней свободы.

Дисперсия измерений момента T разделена на части, соответствующие факторам (скорости n , нагрузке $N(F)$, уровню масла h), взаимодействиям факторов (nN , nh , Nh , nNh) и случайным погрешностям. Значимость каждого фактора определяется критерием Фишера F_0 в виде отношения дисперсии фактора к дисперсии от случайных погрешностей (0,0008125). Сравнение F_0 с критической вероятностью распределения Фишера [6] определяет вероятность ошибки p . Значение $p < 0,05$ указывает на статистическую значимость фактора с 95%-ной вероятностью. В таблице 5 значимыми являются три фактора (n , $N(F)$, h) и два взаимодействия факторов (nh , nNh). Коэффициент детерминации $R^2 = 98,7871\%$ показывает, что степень зависимости момента T от факторов n , $N(F)$ и h составляет 98,7871%. На диаграмме Парето,

изображенной на рис. 6, в графической форме представлены эффекты факторов.

Наибольшее влияние на значение T оказывает нагрузка $N(F)$, меньшее — скорость n , уровень смазки h и взаимодействие двух факторов nh . Минимальный эффект имеет взаимодействие трех факторов nNh .

Для практического использования результатов эксперимента, например, расчета момента сопротивления вращению T при различных скоростях в диапазоне $102 \leq n \leq 300 \text{ с}^{-1}$ или при разных нагрузках, необходимо иметь математическую зависимость переменной отклика T от факторов. Для этой цели в статистике используют уравнения регрессий. С помощью STATGRAPHIC PLUS получена регрессия (10) момента T по факторам n , N , h . Регрессионная модель определяет линейную зависимость момента T от нагрузки N , скорости n и уровня масла h :

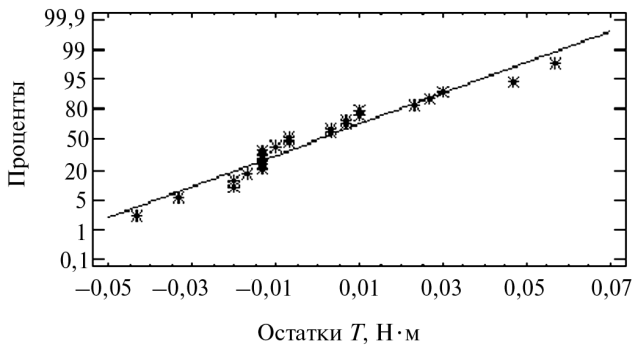


Рис. 5. Распределение остатков момента сопротивления вращению T

$$T = 10^{-3}(-286,351 + 4,025N + 0,450337n + 5,41667h), \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (10)$$

Поскольку вероятность ошибки p для всех факторов составляет $p < 0,01$ (см. табл. 5), то статистическая значимость регрессии (10) имеет 99%-ный доверительный уровень. Поверхность регрессии T , построенная при постоянном уровне смазки $h = 10$ мм, изображена на рис. 7.

Определение приведенного коэффициента трения. В инженерных расчетах моменты сопротивления вращению подшипников определяют с помощью приведенных коэффициентов трения, значения которых берут в справочных данных (табл. 6) [2].

Для сравнения со справочными данными, определим приведенные коэффициенты трения для подшипников лабораторной установки в трех точках:

- 1) $N = 100$ дел., $n = 102 \text{ с}^{-1}$ и $h = 5$ мм;
- 2) $N = 150$ дел., $n = 200 \text{ с}^{-1}$ и $h = 10$ мм;
- 3) $N = 200$ дел., $n = 300 \text{ с}^{-1}$ и $h = 15$ мм.

По формуле (10) рассчитаем моменты сопротивления вращению T :

$$T_1 = 0,189167, \text{ Н}\cdot\text{м}; T_2 = 0,461633 \text{ Н}\cdot\text{м}; T_3 = 0,735 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

По выражению (2) найдем нагрузки:

$$F_1 = 4\,632, \text{ Н}; F_2 = 6\,868, \text{ Н}; F_3 = 9\,104, \text{ Н}.$$

По формуле (4) определим приведенные коэффициент трения:

$$f_1 = 0,001021; f_2 = 0,001680; f_3 = 0,002018.$$

Полученные с помощью регрессионной модели (10) коэффициенты трения совпадают со

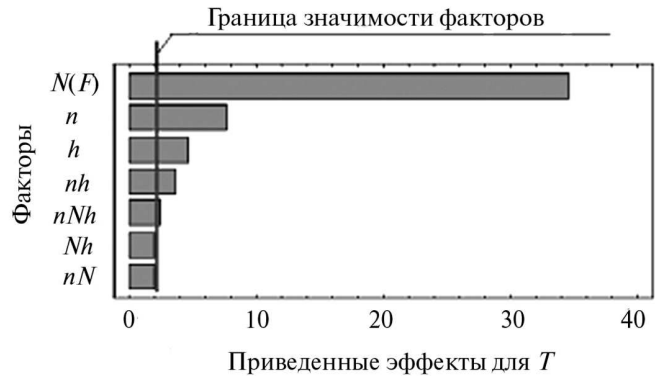


Рис. 6. Диаграмма Парето приведенных эффектов для T_{sum}



Рис. 7. Поверхность регрессии момента сопротивления вращению T

Таблица 6

Приведенные коэффициенты трения стандартных подшипников

Тип подшипника	Коэффициент трения f	
	Радиальная нагрузка	Осевая нагрузка
Шариковый радиальный однорядный	0,001—0,002	0,002—0,003
Шариковый радиальный сферический двухрядный	0,002—0,004	—
Шариковый радиально-упорный однорядный	0,002—0,003	0,0025—0,004

справочными данными, приведенными в табл. 6, что указывает на точность эксперимента.

Выводы

Результаты исследования показали, что момент сопротивления вращению подшипников зависит от скорости вращения внутреннего кольца подшипника, от нагрузки, уровня смазки, взаимодействия скорости и уровня масла и от взаимодействия скорости, нагрузки и уровня масла. Наибольшую значимость име-

ет нагрузка, наименьшую — взаимодействие трех факторов: скорости, нагрузки и уровня масла (см. рис. 6). Коэффициент детерминации $R^2 = 98,7871\%$ показывает, что изменчивость момента сопротивления вращению определяется на 98,7871% контролируемыми факторами: скоростью, нагрузкой и уровнем смазки. Изменения момента от случайных погрешностей составляют менее 1,2%. Это свидетельствует об успешном выполнении эксперимента и статистического анализа результатов. Регрессия момента сопротивления вращению по факторам позволяет рассчитывать его значение в широком диапазоне скоростей 955...2 865 об./мин, нагрузок 4 632...9 097 Н, уровней смазки 5...15 мм и любых их комбинациях (см. рис. 7). Методика эксперимента и статистического анализа может быть использована при исследованиях различных типов подшипников,

Литература

1. Ball and Roller Bearings. Available at: <http://gaton.uky.edu — faculty — scott — mba603 — 605f>.
2. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. М.: Машиностроение, 2006. Т. 2. 960 с.

3. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Детали машин. Справочник. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
4. Фомин М.В. Расчеты опор с подшипниками качения. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 97 с.
5. Harrell C., Ghosh B.K., Bowden R.O., *Simulation Jr. Using ProModel*. Mc.Graw Hill. Higher Education, 2003. 733 p.
6. Douglas C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2008. 686 p.
7. Robert Nau. *STATGRAPHICS VERSION 5: OVERVIEW & TUTORIAL GUIDE*. Fuqua School of Business. Duke University, 2005. 23 p.

References

1. Ball and Roller Bearings. <http://gaton.uky.edu — faculty — scott — mba603 — 605f>.
2. Anur'ev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelia [Directory-Machinist]*. Moscow, Mashinostroenie publ., 2006. Vol. 2. 960 p.
3. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Detali mashin. Spravochnik [Machine parts. Handbook]*. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979. 702 p.
4. Fomin M.V. *Raschety opor s podshipnikami kachenii [Calculations supports with bearings]*. Moscow, MSTU named after N.E. Bauman publ., 2001. 97 p.
5. Harrell C., Ghosh B.K., Bowden R.O., *Simulation Jr. Using ProModel*. Mc.Graw Hill. Higher Education, 2003. 733 p.
6. Douglas C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2008. 686 p.
7. Robert Nau. *STATGRAPHICS VERSION 5: OVERVIEW & TUTORIAL GUIDE*. Fuqua School of Business. Duke University, 2005. 23 p.

Статья поступила в редакцию 26.12.2012

Информация об авторах

СЫРОМЯТНИКОВ Владимир Сергеевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: vsyromia@gmail.com).

ГОНЧАРОВ Сергей Юрьевич (Москва) — инженер кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1, e-mail: gsu@pochta.ru).

РЯХОВСКИЙ Олег Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: rolgan@mail.ru).

Information about the authors

SYROMYATNIKOV Vladimir Sergeevich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. MSTU named after N.E. Bauman (105005, BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya Street 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: vsyromia@gmail.com).

GONCHAROV Sergey Yurievich (Moscow) — engineer of «Fundamentals of Machine Design» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya Street 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: gsu@pochta.ru).

RYANOVSKIY Oleg Anatolyevich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Fundamentals of Machine Design» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya Street 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: rolgan@mail.ru).