



УДК 608.4

А.А. Королев, А.В. Королев, Е.В. Мухина
ФГБОУ ВПО Саратовский государственный
технический университет им. Гагарина Ю.А
г. Саратов, Россия

E-mail: lento4ka.2013@mail.ru

Дата поступления 06.02.2015

В авторской редакции

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТОХАСТИЧЕСКОГО СПОСОБА КОМПЛЕКТОВАНИЯ ШАРИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ¹

Аннотация

Разработана математическая модель процесса комплектования методом индивидуального подбора деталей. В качестве закона распределения был взят усеченный закон нормального распределения. В основе способа лежит схема, основанная на измерении собираемых деталей и последующих расчетах значения вероятности собираемости деталей. Рассмотрены несколько видов предложенной схемы осуществления процесса комплектования.

Ключевые слова: стохастическая модель, подшипники качения, вероятность комплектования, индивидуальный подбор, закон нормального распределения.

Введение.

Наиболее распространенным методом сборки высокоточных изделий в машиностроении является метод селективной сборки, основанный на групповой взаимозаменяемости. Он заключается в изготовлении деталей со сравнительно широкими технологически выполнимыми допусками, сортировке деталей на равное число групп с более узкими групповыми допусками и сборке их (после комплектования) по одноименным группам. Процесс комплектования данными способами имеет некоторые недостатки: необходимость использования высокоточных средств сортировки, невозможность применения при мелкосерийном и единичном производствах, появление значительного незавершенного про-

изводства, увеличение амортизационных отчислений на контрольно-измерительное оборудование и затрат на контроль и др.

В связи с этим предлагается использовать способ комплектования подшипников, который основан индивидуальном подборе деталей. Элементарные расчеты показывают, что схемы комплектования подшипников, основанные на индивидуальном подборе поступающих на рабочие позиции деталей, обеспечивают максимально возможную собираемость изделий.

Основная часть

Для определения рациональных параметров комплектования подшипников примем схему, предложенную в работе [1] и изображенную на рисунке 1:

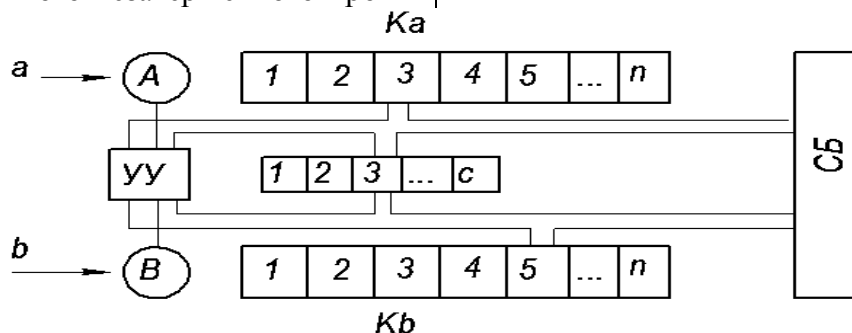


Рисунок 1. Обобщенная схема комплектования подшипников

1

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России -УИН ФЦП RFMEFI57414X0015

Предварительно в специальные бункеры (1,2,3...с) засыпают тела качения (в каждый бункер определенное количество шариков с одним типоразмером), а информацию об их размерах запоминают с помощью управляющего устройства УУ. С помощью того же устройства УУ запоминают допустимые величины зазоров в подшипнике.

Наружные a и внутренние b кольца подшипника подают на измерительные позиции А и В, подвергают измерению и направляют соответственно в накопитель наружных колец K_a и накопитель внутренних колец K_b , имеющих n позиций. Эти позиции постепенно заполняют кольцами.

Информацию о размерах колец также запоминают с помощью управляющего устройства УУ. Располагая информацией о размерах колец в накопителях K_a и K_b , об имеющихся размерах тел качения и заданных величинах зазоров, определяют возможность комплектования деталей. Если она имеется, то с помощью управляющего устройства УУ, например, наружное кольцо с позиции 3 накопителя K_a , внутреннее кольцо с позиции 5 накопителя K_b и тело качения из бункера 2 перемещают на комплектовочную позицию СБ. Освободившееся место в накопителях K_a и K_b заполняют новыми кольцами.

Если имеющиеся в накопителях K_a и K_b кольца не могут быть скомплектованы с находящимися в бункерах телами качения, то находящиеся на последних позициях накопителей K_a и K_b кольца подают на повторное комплектование, оставшиеся кольца смещают на одну позицию, а на позицию 1 подают новые кольца.

Кроме того, с помощью устройства УУ накапливают значения размеров колец, поступающих на комплектование, и вычисляют значение вероятности комплектования деталей подшипника с теми или иными размерами. Если для определенного размера колец значение вероятности их комплектования с имеющимися телами качения (далее собираемость) мало, то при поступлении колец с такими размерами на позицию 1 накопителей K_a и K_b они с помощью управляющего устройства УУ уда-

ляются и в дальнейшем комплектовании не участвуют.

Рассмотренную на рисунке 1 схему берем за основу при рассмотрении других схем.

За основные допущения примем следующие:

1. В качестве закона распределения размеров наружных и внутренних колец примем нормальный закон распределения и усеченный закон нормального распределения. Известно, что нормальный закон распределения обычно проявляется при изготовлении деталей на настроенных станках с автоматическим получением размера в тех случаях, когда на погрешность обработки действует множество случайных факторов одного порядка малости [2, 3]. Это - наиболее часто встречающийся на практике случай. Однако на комплектование подшипников кольца поступают с различных рабочих мест, на каждом из которых настроечный размер имеет различное значение. В таком случае проявляется действие систематического фактора - смещение среднего размера колец в каждой из партии. Если это смещение составляет основную долю в поле рассеивания размеров колец, то закон распределения поступающих на комплектование колец будет близок к усеченному закону нормального распределения.

2. Законы распределения наружных и внутренних колец примем одинаковыми, но с различными параметрами распределения (математическим ожиданием и дисперсией). Это допущение соответствует реальным производственным условиям, так как условия изготовления наружных и внутренних колец одинаковые, и к тому же различный характер распределения размеров наружных и внутренних колец, как известно, обеспечивает низкую собираемость подшипника.

3. Максимальное число различных размеров тел качения, с которыми осуществляется комплектование колец, примем равным трем (три типоразмера тел качения). Как будет показано ниже, это число размеров тел качения, с одной стороны, обеспечивает высокий уровень комплектования подшипников, а с другой стороны,

не вызывает трудностей в создании соответствующего технологического оборудования.

Обозначим $f(d)$ - плотность вероятностей распределения размеров внутренних колец с математическим ожиданием (МО) M_d и средним квадратическим отклонением (СКО) σ_d ; $f(D)$ - плотность вероятностей распределения размеров наружных колец с МО M_D и СКО σ_D . В бункеры загружены тела качения с размерами ds_1, \dots, ds_c . Допустимые максимальный и минимальный зазоры составляют соответственно Z_{\max} и Z_{\min} .

В общем виде распределение размеров колец подшипников является усеченным:

$$f_{yc}(D) = \frac{1}{A} f(D); \quad (1)$$

$$f_{yc}(d) = \frac{1}{B} f(d), \quad (2)$$

где

$$A = \int_{d_n}^{d_v} f(d) dd, \quad B = \int_{D_n}^{D_v} f(D) dD,$$

d_n, d_v, D_n, D_v - верхние и нижние значения размеров колец.

Усечение можно осуществлять искусственно для повышения производительности комплектования и предотвращения поступления на комплектование колец с крайними и редкими размерами, которые в процессе комплектования удаляют. Кроме того, усечение часто возникает на практике, так как размеры деталей ограничиваются допуском, а сами детали подшипников поступают на комплектование с разных рабочих мест и имеют различные поля рассеивания размеров.

Значение вероятности комплектования (в дальнейшем вероятность комплектования) того, что для произвольного наружного кольца подшипника с размером D будут подобраны при комплектовании внутренние кольца при наличии тел качения с размером ds_i , равна

$$p(D) = f(D) \int_{d_{ni}}^{d_{vi}} f(d) dd, \quad (3)$$

где

$$d_{vi} = D - 2ds_i - z_{\min}; \quad (4)$$

$$d_{ni} = D - 2ds_i - z_{\max}. \quad (5)$$

Если при комплектовании используется не один, а несколько комплектов тел качения, равных c , то выражение (3) примет вид:

$$p(D) = f(D) \sum_{i=1}^c \left(\int_{d_{ni}}^{d_{vi}} f(d) dd \right). \quad (6)$$

При суммировании вероятностей в формуле (6) следует придерживаться следующего правила. Если соседние размеры тел качения отличаются между собой более чем на величину допуска на зазор в подшипнике, то пределы интегралов, суммируемых в выражении (6), определяются по формулам (4) и (5). Если два соседних по размеру тела качения отличаются между собой на величину меньшую допуска на зазор, то нижнее значение предела интегрирования последующего интеграла принимается равным верхнему значению интегрирования предыдущего интеграла.

Указанное правило поясняется рисунком 2. Кривая на этом рисунке соответствует распределению размеров внутренних колец, D -случайный размер наружного кольца, Z_{\max} и Z_{\min} - предельные размеры зазоров в подшипнике, ds_1 и ds_2 - размеры тел качения.

Из рисунка 2 видно, что если $(ds_1 - ds_2) < (Z_{\max} - Z_{\min})$, то границы интегрирования перекрываются, а вероятности комплектования колец с первым и вторым телами качения (заштрихованные площади) частично накладываются одна на другую. Нижней границей интегрирования в этом случае является нижняя граница, рассчитанная по формуле (5) при $ds_1 = ds_2$, а верхней - верхняя граница, рассчитанная по формуле (4) при $ds_1 = ds_2$. При определенных размерах колец комплектование можно осуществлять как с теми, так и с другими телами качения.

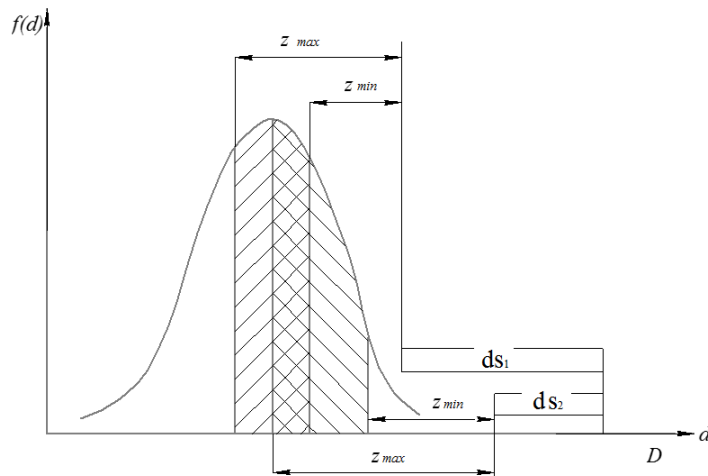


Рисунок 2. Схема индивидуального подбора внутренних колец к наружному кольцу размером D при комплектовании подшипника шарами двух размерных групп

Из этого следует вывод, что наибольшая вероятность комплектования, а следовательно и наибольшая производительность, достигается в том случае, если разноразмерность тел качения, засыпаемых в бункеры, будет больше допуска на зазор в подшипнике.

Вероятность того, что кольца и данные тела качения при заданных величинах зазоров будут собраны в подшипники, определится равенством:

$$p_y = \int_{D_n}^{D_v} f(D) dD \sum_{i=1}^c \left(\int_{d_{ni}}^{d_{vi}} f(d) dd \right). \quad (7)$$

Величина p_y представляет собой условную вероятность того, что два случайных наружных и внутренних кольца, попав на первую позицию, сразу могут быть скомплектованы с имеющимися в бункере телами качения. Полная вероятность комплектования p двух случайных поступивших в накопители колец определяется равенством:

$$p = p_y F, \quad (8)$$

где F - вероятность поступления на комплектование только тех колец, которые могут быть скомплектованы с имеющимися в бункерах телами качения.

Вероятность F представляет собой максимальную долю колец, которые могут быть скомплектованы с имеющимися телами качения при самых благоприятных для этого условиях. Назовем ее максимальной вероятностью комплектования и найдем ее значение.

На рисунке 3 приведена схема для расчета вероятности присутствия в партии колец, поступающих на комплектование, комплектных колец, т.е. колец таких размеров, которые могут быть скомплектованы с имеющимися телами качения.

Пусть для внутренних колец с размером d необходимо подобрать наружные кольца. Если в комплектовании подшипников участвуют тела качения одного размера, то к этим внутренним кольцам подойдут наружные кольца с размером: $D_i = d_i + 2ds + z$, где z -значение зазора.

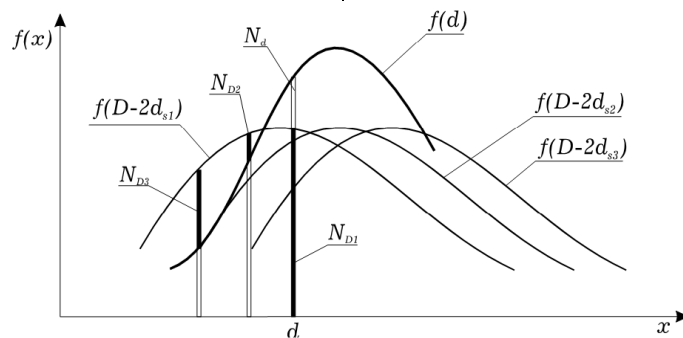


Рисунок 3. Схема к определению полной вероятности комплектования подшипника тремя группами размеров шаров

Но из рисунка 3 видно, что в партии находится разное количество колец нужных размеров D и d ($N_d > N_{D1}$). Если в партии наружных колец данного размера больше, чем внутренних, то останется нескомплектованной часть наружных колец; если в партии находится больше внутренних колец, как это представлено на рисунке 3, то часть этих колец также останется нескомплектованной. Поэтому при определении вероятности комплектования колец необходимо суммировать минимальные значения плотностей вероятностей распределения размеров наружных и внутренних колец:

$$F = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \min(f_d(d), f_D(d+2ds+z)) dd,$$

где $f_d(d)$ и $f_D(d+2ds+z)$ - плотности вероятностей распределения размеров соответственно внутренних и наружных колец при значениях размеров, стоящих в скобках.

Выражение $\min(f_d(d), f_D(d+2ds+z))$ означает, что из двух слагаемых при интегрировании надо взять минимальное.

При комплектовании с двумя или тремя размерами тел качения внутренние кольца размера d могут быть скомплектованы с наружными кольцами, имеющими другие размеры при соблюдении условия: $N_d = N_{D1} + N_{D2} + N_{D3}$. Причем, к внутренним кольцам размером d подойдут наружные кольца следующих размеров:

$$D_j = d + 2ds_{j-z} (j=1,3),$$

где D_j - размеры наружных колец, с которыми собираются внутренние кольца d при комплектовании шаром ds_j , j - порядковый номер.

Введем следующие обозначения:

d_j - размеры внутренних колец, с которыми собираются наружные кольца D_j при комплектовании шаром ds_j , и определяются из выражения:

$$d_j = D_j - 2ds_{j-z};$$

a_j - доля нескомплектованных d внутренних колец после последовательного комплектования его шарами различных размеров ds_1, \dots, ds_j ;

b_j - доля нескомплектованных D_j наружных колец после комплектации первым шаром ds_1 .

Доля скомплектованных внутренних колец d может быть найдена из выражения:

$$F(d) = f_d(d) - a_3, \quad (9)$$

где, учитывая, что

$$b_j = f_D(D_j) - \min(f_d(d_j), f_D(D_j)),$$

и

$$a_{j-1} = f_d(d) = f_d(d_1),$$

значение a_3 легко определяется из рекурсивной формулы:

$$a_j = a_{j-1} - \min(a_{j-1}, b_j).$$

Тогда долю всех скомплектованных внутренних колец можно получить, интегрируя выражение (9):

$$F = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} F(d) dd. \quad (10)$$

С учетом выражения (10) равенство (8) примет вид:

$$p = p_y \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} F(d) dd. \quad (11)$$

В таблице 1 представлены результаты расчета значения вероятности p комплектования подшипника при нормальном законе распределения размеров колец и $M_d = 9$ мм, $M_D = 21$ мм., $\sigma_d = \sigma_D = 0,040$ мм, $z_n = 0,006$ мм, $z_v = 0,014$ мм. Размеры тел качения соответствуют указанному выше наиболее благоприятному условию сборки:

-при сборке с одним телом качения $ds_1 = 5,995$ мм;

-при сборке с двумя телами качения $ds_1 = 5,991$ мм., $ds_2 = 5,999$ мм;

-при сборке с тремя телами качения $ds_1 = 5,987$ мм, $ds_2 = 5,995$ мм., $ds_3 = 6,003$ мм.

Таблица 1
Собираемость p подшипника при различных комплектах тел качения

Комплекты	ds_1	ds_1+ds_2	$ds_1+ds_2+ds_3$
Вероятность комплектования p	0.0567	0.1122	0.1656

Как видно, вероятность комплектования p во многом зависит от числа размеров тел качения, находящихся в бункерах. Однако в целом она не велика, а поэтому и производительность процесса комплектования мала.

Рассмотрим случай, когда накопители наружных и внутренних колец содержат всего по одной позиции. Определим вероятность того, что после измерения i пар колец встретится такая пара, которую можно скомплектовать с заданной точностью с имеющимися телами качения. Вероятность этого события после измерения первой пары равна p . Вероятность p_2 того, что вторая измеренная пара колец удовлетворяет условиям комплектования, равна произведению двух вероятностей:

- вероятности $(1-p)$ того, что предыдущая пара колец не удовлетворила условиям комплектования, и

- вероятности p комплектования данной пары:

$$p_2 = qp, \text{ где } q = 1 - p.$$

Подобным же образом рассчитываем вероятности комплектования любой пары колец с порядковым номером m . Ряд этого распределения представлен в таблице 2

Таблица 2

Ряд распределения вероятностей появления комплектных колец подшипника

m	1	2	—	i	—
p_m	p	qp	—	$q^{i-1} p$	—

Математическое ожидание числа замеренных пар колец, через которое появляется пара, удовлетворяющая условиям комплектования, равно:

$$M_x = p \sum_{i=1}^{\infty} i q^{i-1} = \frac{1}{p}, \quad (12)$$

а дисперсия

$$D_x = p \sum_{i=1}^{\infty} i^2 q^{i-1} - M_x^2 = \frac{q}{p^2}. \quad (13)$$

Например, при $p=0,056$ по формулам (12) и (13) найдем $M_x=17,7$, т.е. через каждые 17-18 замеренных пар колец одна пара комплектуется. Если при этом среднее время измерения равно T_0 , то такт комплектации $T_k = T_0 \cdot M_x$. Для нашего примера он равен $T_k = 17,7 T_0$.

Пусть теперь число накопителей наружных и внутренних колец равно n , а накопители колец сразу после комплектования заполняются другими кольцами. Как было показано выше, вероятность ком-

плектования случайной пары колец равно p . Найдем вероятность P комплектования наружного кольца с внутренними. Она равна сумме вероятностей комплектования с каждым из находящихся в накопителе внутренних колец. Вероятность комплектования с кольцом, находящимся на первой позиции накопителя, равна p , с кольцом, находящимся на второй позиции, - qp и т.д. в соответствии с табл.2. Тогда $P = p + pq + pq^2 + \dots + pq^{n-1}$. После преобразования получим:

$$P = 1 - q^n. \quad (14)$$

Рассмотрим процесс комплектования подшипника по другой схеме. Пусть накопители наружных и внутренних колец имеют по n позиций. При поступлении в накопителя очередного наружного кольца с порядковым номером i оно может быть скомплектовано с теми внутренними кольцами, которые не были скомплектованы с другими предыдущими наружными кольцами. В общем виде вероятность осуществления события, состоящего в том, что наружное кольцо с порядковым номером i за время перемещения через накопитель с числом позиций n будет скомплектовано с одним из внутренних колец, равна:

$$P_i = \sum_{j=1}^N P_{ij} \quad (15)$$

где p_{ij} - вероятность комплектования наружного кольца имеющий порядковый номер i с внутренним кольцом имеющим порядковый номер j .

Пределы суммирования в выражении (15) ограничиваются только теми порядковыми номерами внутренних колец, с которыми данное наружное кольцо с порядковым номером i может быть скомплектовано в процессе прохождения через накопитель. Если накопители внутренних и наружных колец движутся поочередно навстречу друг другу, то число внутренних колец, с которыми может быть скомплектовано наружное равно $2n$. При других схемах перемещения накопителей число таких колец будет меньше, а следовательно, и условия для комплектования будут менее благоприятны. Поэтому в дальней-

шем будем рассматривать именно такую схему перемещения накопителей.

Определим вероятности p_{ij} . Вероятность комплектования первого наружного кольца подшипника с первым поступившим на комплектование внутренним кольцом равна $p_{11} = p$. Если предпочтение при комплектовании отдать первому кольцу, то вероятность комплектования этого кольца со вторым внутренним кольцом равна $p_{12} = pq$. Далее со всеми последующими кольцами первое наружное кольцо комплектуется с вероятностью, соответствующей табл. 2. Вероятность комплектования всех последующих i -ых наружных колец с каждым конкретно j -ым внутренним кольцом p_{ij} будет зависеть от произведения трех вероятностей: вероятности комплектования наружного кольца с самим внутренним кольцом p , вероятности того, что это наружное кольцо не было скомплектовано с предыдущими внутренними кольцами и вероятности того, что данное внутреннее кольцо не было скомплектовано с предыдущими наружными кольцами.

Известно, что линейные алгебраические преобразования удобно осуществлять с помощью матриц. Поэтому для удобства подсчета вероятностей комплектования i -го наружного кольца с j -ым внутренним кольцом p_{ij} рассмотрим матрицу $N \times N$, состоящую из элементов p_{ij} - пересечения i -ой строки и j -го столбца:

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1N} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{N1} & p_{N2} & \dots & p_{NN} \end{pmatrix}$$

Тогда каждый элемент матрицы, учитывая вышесказанное, может быть рекурсивно выражен через ее предыдущие элементы следующим соотношением:

$$p_{ij} = p \left(1 - \sum_{k=1}^{j-1} p_{ik} \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} p_{kj} \right),$$

где $\sum_{k=1}^{j-1} p_{ik}$ - вероятность того, что соответствующее наружное кольцо соберется хотя бы с одним предыдущим внутренним кольцом;

$\sum_{k=1}^{i-1} p_{kj}$ - вероятность того, что соответствующее внутреннее кольцо соберется хотя бы с одним предыдущим наружным кольцом.

Подставляя это выражение в равенство (15) получим вероятность комплектования i -го наружного кольца:

$$P_i = p \cdot \sum_{j=i-n+1}^{i+n} \left(1 - \sum_{k=1}^{j-1} p_{ik} \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} p_{kj} \right). \quad (16)$$

Очевидно, что индекс суммирования внешней суммы не может принимать значения меньше 1 и больше N . Если индекс выходит за допустимую границу, то он принимает значение самой границы.

Используя равенство (16) найдем математическое ожидание числа пар колец, которые будут скомплектованы при прохождении наружного кольца с порядковыми номерами x через накопитель. Обозначим: Z - число пар колец скомплектованных с Z -ым наружным кольцом.

Случайная величина Z может принимать два возможных значения: 0 и 1. Рассмотрим вероятности появления этих значений:

$$P(Z=0) = (1-P); \quad P(Z=1) = P.$$

Тогда математическое ожидание и дисперсия определяются выражениями:

$$M_z = \sum_{i=0}^2 iP(Z=i) = P \quad (17)$$

$$D_z = \sum_i^2 P(Z=i) - M_z^2 = P \cdot (1-P) \quad (18)$$

Используя выражения (17) и (18) найдем математическое ожидание такта комплектования колец при такте измерения деталей T_0 :

$$T_k = T_0(x). \quad (19)$$

Доля пар колец, возвращающихся для повторного комплектования:

$$Q = (1-P)A + 1-A, \quad (20)$$

где A - доля поступающих на комплектование колец подшипников, определяемая по зависимостям, приведенным вначале этого раздела.

Выражения (11) - (13) и (17) - (20) моделируют основные результаты комплектования подшипников с применением различных схем и позволяют обоснованно управлять этим процессом.

Заключение

В статье была рассмотрена математическая модель процесса комплектования подшипников, в которой были найдены величины вероятности комплектования наружного кольца с внутренними кольцами. Входными параметрами являлись: размер минимального d_{\min} и максимального d_{\max} внутреннего кольца, размер минимального D_{\min} и максимального D_{\max} наружного кольца, размеры трех тел качения ds_1, ds_2, ds_3 , максимальный z_{\max} и минимальный z_{\min} допустимый радиальный зазор, средние размеры внутренних $d_{\text{ср}}$ и наружных колец $D_{\text{ср}}$, а также средние квадратические отклонения размеров наружных σ_1 и внутренних σ_2 колец.

Предполагалось, что наружные и внутренние кольца имеют усеченный закон нормального распределения.

Алгоритм вычисления вероятности комплектования наружного кольца с внутренним кольцом состоял из трех отдельных этапов:



УДК 621.746.047:621.86

1. Нахождение вероятности p комплектования наружного кольца с внутренним кольцом
2. Вычисление значения доли F колец, которые вообще могут быть скомплектованны.
3. Вычисление вспомогательных функций, которые участвуют в процессе определения вероятностей.
4. Вычисление вероятности комплектования каждого наружного кольца.

Библиографический список

1. Замятин, В.К. Технология и автоматизация сборки. Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. - М.: Машиностроение, 1993. -464с.
2. Гнеденко, Б.В. Курс теории вероятностей. Изд. 5-е. М.: Наука, 1969. - 400 с.
3. Королюк, В.С. и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. - М.: Наука. Физико-математической литературы, 1985. -640с.

К.Н. Вдовин

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

г. Магнитогорск, Россия

E-mail: vdovin@magtu.ru

Дата поступления 12.03.2015

РАЗРАБОТКА РАФИНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ МОДЕРНИЗИРУЕМЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОВШЕЙ МНЛЗ

Аннотация

Рассмотрена возможность модернизации оборудования промежуточных ковшей (ПК) машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Отмечены известные способы и устройства рафинирования металла. Приведенные рекомендации по конструированию устройств модернизируемых ПК являются обобщением наиболее известных работ в этом направлении и озвучивают минимальные требования к конструкции ковша. Представлены созданные конструкции для ПК слябовой МНЛЗ.

Ключевые слова: МНЛЗ, модернизация, промежуточный ковш, рафинирующие устройства.

Введение

В настоящий момент перспективным для РФ направлением является модернизация существующих, типовых ПК МНЛЗ с

учетом имеющихся у предприятий ресурсов [1]. Работы конструкторов, ведущиеся в этом направлении, связаны с интенсификацией процесса рафинирования стали [1, 2]. Для этих целей применяются