

## ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ ПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**А.А. Серегин, А.Г. Кравцов**

*Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия*

Рассмотрен метод вероятностной оценки кинематической погрешности передач и трансмиссий с избыточными связями в зависимости от качества изготовления их деталей. Метод основан на результатах анализа технологической точности оборудования, задействованного при производстве деталей передач, с последующим синтезом модели точности передач. Геометрическая точность технологической системы – это ожидаемые погрешности готовых изделий. Её связь с точностью технологической среды носит вероятностный характер. Для вскрытия этой связи произвели разделение систематических и случайных погрешностей, характеризующих технологический процесс изготовления деталей сложного контура. На основе известных работ по точности технологических процессов разработана методика разделения систематических и случайных погрешностей. Приведены основные формулы этой методики.

В качестве примера рассмотрен метод синтеза вероятностной модели выходной точности шариковых винтовых передач. Данный метод, с небольшими модификациями, можно использовать также для расчёта кинематической точности роликовых винтовых, червячно- и спирально-реечных передач. Эффективность разработанного алгоритма расчёта точности доказана на практике. Повышение эффективности метода синтеза вероятностной модели выходной точности шариковых винтовых передач возможно при учёте в математической модели влияния упругих свойств деталей передачи на её выходную точность.

Основные задачи, решённые в ходе исследования:

- 1) выяснены особенности технологической среды, при которых осуществляют производство основных элементов передач с избыточными связями;
- 2) разработан метод синтеза вероятностной модели выходной точности передач с избыточными связями, позволяющий учитывать основные погрешности технологических систем;
- 3) осуществлена проверка разработанной вероятностной модели, на основании гипотезы нормального распределения погрешностей изготовления.

*Ключевые слова: детали передач, кинематическая точность, передачи с избыточными связями, стабильность, точность технологической среды.*

### **Введение**

Одним из основных требований, предъявляемым к передачам и трансмиссиям, является кинематическая точность [1]. Известно, что точность передачи полностью зависит от точности деталей передач и трансмиссий (ДПТ). Например, для винтовых пар (за счёт обработки данных измерений ошибок шага, радиуса резьбы, профиля винтовой канавки и других параметров партий – до 50 штук – деталей одного размера по известным правилам) можно получить статистические функции погрешностей указанных размеров. Далее, представляя указанные погрешности стационарными можно определить выходную точность передачи. В настоящее время при налаживании выпуска новых изделий машиностроения решение задачи по априорной оценке кинематической точности, в зависимости от точности выпускаемых ДПТ, остаётся актуальным для предприятий-изготовителей.

Предварительные исследования были произведены в цехах предприятий транспортного машиностроения. Основные результаты этих исследований можно сформулировать в виде следующих выводов:

1. Корреляционная зависимость между точностью изготовления ДПТ и выходной точностью передачи с избыточными связями может иметь как положительные, так и отрицательные значения коэффициентов в пределах смежных партий.

2. Разброс значений коэффициентов корреляции вызван непрогнозируемым, скачкообразно изменяющимся, характером погрешности перемещения (позиционирования) элементов передачи с избыточными связями.

Полученные результаты доказывают сложность проведения исследований кинематической точности передач с избыточными связями в зависимости от погрешностей ДПТ. При кажущейся простоте ответ на поставленный вопрос не может быть однозначным. Требование по высокой точности предъявляют к передачам с избыточными связями, используемым в металлорежущих станках, но тем не менее ни в специальной [1–4], ни в учебной литературе [5] не представлены расчёты этих передач на точность. Для того чтобы использовать существующие методологии формирования эксплуатационных свойств деталей в технологических средах [6, 7] необходимо уметь прогнозировать точность передач с избыточными связями в процессе изготовления ДПТ. Конструкции передач с избыточными связями представляют статически неопределимые системы. Невозможно произвести расчёт точности, применяя к этим системам известные методы размерного анализа [8–12], поскольку при смене координат независимые погрешности могут стать зависимыми друг от друга. Несмотря на высокую точность используемых ДПТ, комбинации точек контакта между деталями непредсказуемы, и поэтому расчёт точности передач с избыточными связями можно выполнить только методами математической статистики.

**Цель работы:** создание метода априорной оценки кинематической погрешности привода, основанного на результатах анализа точности технологического оборудования, производящего основные элементы передач и трансмиссий, имеющих избыточные связи по одной координате.

### 1. Стохастическая модель точности технологической среды

Предлагаемая математическая модель точности технологических процессов основана на алгоритме разделения систематической и случайной составляющих погрешности обработки. Приём разделения этих погрешностей известен давно и используется на практике. Например, при проведении контрольных операций [13]. Отправной точкой разрабатываемой модели будет уравнение распределения ошибок, взятое из [14] и [15]. Включаем в него значения систематических и случайных показателей точности технологического процесса по правилам, известным из основ технологии машиностроения. Используя формулы для анализа многомерных данных, получим функцию распределения  $\Delta(R_i)$  случайного гипервектора погрешности размеров  $R_i$  партии деталей для заданного промежутка времени  $t$ , которое изменяется от  $t = 0$  до  $t = T$  ( $T$  – трудоёмкость изготовления партии)

$$\Delta(R_i) = \frac{1}{\sigma_{R^i}(t)\sqrt{2\pi}} \int \dots \int \frac{1}{\sigma_{R^i}(t)} \exp \left\{ - \sum_{i=1}^N \frac{[R_i - m_{R^i}^i(t)]^2}{2\sigma_{R^i}^2(t)} \right\} dt, \quad (1)$$

где  $\Omega$  – область существования размеров  $R_i$ , её размерность равна  $N$ ;  $m_{R^i}^i(t)$  – функция, характеризующая изменения во времени систематических факторов (износ инструмента, деталей оборудования, станочного приспособления и т. д.)  $R_i$ -х размеров;  $\sigma_{R^i}^i(t)$  – функция, характеризующая изменение мгновенного поля рассеивания  $R_i$ -х размеров. В знаменателе, перед знаками интегралов, происходит умножение показателя  $\sigma_{R^i}^i(t)$  ( $i$ -й индекс у  $m$  и  $\sigma$  обозначает номер размера).

Рассмотрим гипервектор  $\Delta(R_i)$  как функцию случайного аргумента  $t$ . Пусть величина  $t$  распределена равномерно в интервале от 0 до  $T$ . Тогда, согласно [16] и [17], среднее значение случайного вектора  $\Delta(R_i)$  и её дисперсия равны

$$M\{R_i\} = M\{m_{R^i}^i(t)\},$$

$$\sigma^2\{R_i\} = M\{m_{R^i}^i(t)\} + M\{\sigma_{R^i}^2(t)\} - M^2\{m_{R^i}^i(t)\}.$$

Далее, используя выражение для среднего значения функции и её дисперсии с развёрткой во времени [13–15] получим окончательное выражение для дисперсии произвольной  $i$ -й компоненты вектора погрешности обработки

$$\sigma^2\{R_i\} = \sigma^2\{m_{R^i}^i(t)\} + \sigma^2\{\sigma_{R^i}^2(t)\} + M^2\{m_{R^i}^i(t)\}. \quad (2)$$

Слагаемые этого уравнения, согласно [15], имеют вид

$$\sigma^2 \{m_R^i(t)\} = M\{m_R^2(t)\} - M^2\{m_R^i(t)\};$$

$$\sigma^2 \{\sigma_R^i(t)\} = M\{\sigma_R^2(t)\} - M^2\{\sigma_R^i(t)\}.$$

Приступим к оценке доли систематической составляющей, вызванной изменением функции  $m_R^i(t)$ , количественной оценки доли случайной составляющей от изменения функции  $\sigma_R^i(t)$  и доли собственно случайной составляющей, вызванной постоянной составляющей функции  $\sigma_R^i(t)$ , в общей погрешности обработки. Введём оператор  $\lambda_R = 1/\sigma_R^2$ . Перемножим все компоненты уравнения (2) на  $\lambda_R$ . Получим следующие безразмерные коэффициенты, которые представляют собой модификацию коэффициента вариации  $C_V$  [15] процесса обработки:

$$\xi_{mi}^2 = [M\{m_R^2(t)\} - M^2\{m_R^i(t)\}] \cdot \lambda_R = \sigma_i^2 \left( \frac{1}{C_V^{mi}} \right); \quad (3)$$

$$\xi_{\sigma i}^2 = [M\{\sigma_R^2(t)\} - M^2\{\sigma_R^i(t)\}] \cdot \lambda_R = \left[ \frac{C_V^{\sigma i(t)}}{C_V^\sigma} \right]^2; \quad (4)$$

$$\xi_{Mi}^2 = M^2\{\sigma_R^i(t)\} \cdot \lambda_R = \left[ \frac{1}{C_V^{Mi}} \right]^2. \quad (5)$$

При умножении  $\sigma(R_i)$  на  $\lambda_R$  в уравнении (2) получим 1, следовательно, значения коэффициентов (3)–(5) должны удовлетворять простому равенству

$$\xi_{mi}^2 + \xi_{\sigma i}^2 + \xi_{Mi}^2 = 1.$$

Каждая из строк (3)–(5) представляет собой систему из  $N$  уравнений (по одному на каждый индекс  $i$ ). Любое  $i$ -е уравнение системы характеризует стабильность процессов, происходящих в технологической среде, настроенной на получение некоторого  $R_i$  размера. Основным показателем, определяющим величину и постоянство во времени систематической составляющей гипервектора погрешности, является коэффициент, рассчитанный по уравнению (3). Рандомизированный коэффициент, определяемый по уравнению (4), описывает изменение случайной составляющей гипервектора погрешности изготовления во времени, а компоненты уравнения (5) представляют собой комплект вариационных коэффициентов, характеризующих стабильность процесса изготовления ДПТ в целом. Коэффициенты (5) являются комплексным показателем качества технологического процесса. Они объединяют в себе показатели изменения математического ожидания величин погрешностей ДПТ и изменение их среднего квадратичного отклонения.

### 2. Синтез модели выходной точности передач

Обработывая результаты контроля ДПТ различных размеров, определяем основные параметры распределения отклонений размеров деталей от номинальных значений по формулам (1)–(5). Далее, погрешности измеренных параметров приводим к погрешности траекторий движения элементов передач с избыточными связями. Соответственно, статистические характеристики рабочих линий движения элементов передач суммируем согласно основным положениям теории вероятностей. Расчётная процедура оценки кинематической точности состоит в определении погрешности положения или погрешности перемещения подвижного элемента передачи на основе определения положения точки контакта ДПТ. Составив дискретный план перемещений, можно определить кинематическую погрешность передачи как на длине перемещения подвижного элемента, так и на произвольном участке.

Основными представителями передач с избыточными связями по одной координате в машиностроении являются передачи, имеющие детали с винтовыми (спиральными) поверхностями: 1) с гайкой скольжения; 2) шариковые (ШВП); 3) роликовые; 4) с резьбовыми роликами; 5) безгаечные с резьбовыми роликами; 6) червяк-червячная рейка; 7) спирально-реечные.

Наиболее распространёнными в современном станочном оборудовании являются ШВП. Предлагаемую математическую модель рассмотрим на примере расчёта точности ШВП. В модели отсутствуют параметры не связанные с деталями ШВП – исключена погрешность монтажа. Но могут быть включены параметры, характеризующие особенности конструкций ШВП. Например,

предприятиями РФ освоен выпуск конструкций ШВП, дающих возможность создания предварительного натяга между телами качения и гайкой. Разработанная модель может включать в себя величину натяга. Если за счёт поворота полуаек можно установить натяг заданной величины, то значение натяга используем в модели как дискретную составляющую.

Максимальную кинематическую погрешность  $ERS$  перемещения гайки вдоль винта можно представить в виде отклонения в шесть сигма некоторой случайной функции, характеризующей её кинематическую точность. Приближённые выражения для кинематической точности на интервале в  $6\sigma$  можно получить, как разность амплитуд максимума  $ERS_{max}$  и минимума  $ERS_{min}$ , полученных на длине  $S$  перемещения гайки, равной длине нарезной части винта. Большинство получаемых размеров деталей машин подчиняется нормальному закону распределения. Тогда математическое ожидание максимального значения кинематической погрешности будет стремиться к величине

$$ERS = \{ERS_{min} - ERS_{max}\} + q\sqrt{2\sigma_{ERS}^2}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{ERS}(t)$  – среднеквадратическое отклонение;  $q$  – коэффициент функции распределения абсолютного максимума. Общее значение  $\Sigma ERS$  кинематической погрешности определяют по формуле

$$\Sigma ERS = ERS + ERS_{var}, \quad (7)$$

где  $ERS_{var}$  – приращение математического ожидания погрешности от возможного нестационарного процесса. В случае влияния на кинематическую точность нестационарного процесса формула (7) применима при условии, что данный процесс вносит не более половины величины от всех действующих погрешностей.

Формулы (6) и (7) получены на основе минимаксной математической модели точности ШВП. В качестве входных погрешностей были приняты ошибки перемещения винта или гайки, полученные в результате аттестации ШВП. Но поскольку указанные ошибки зависят от погрешности изготовления деталей ШВП, формулы (6) и (7) можно преобразовать к виду:

$$\Sigma ERS = \mu \left[ \sum_{i=1}^z Rscr_i + \sum_{j=1}^z Rnut_j \right] + \{h(S)\delta(S - S_0) \sum_{k=1}^z RS_k\}, \quad (8)$$

где  $Rscr$  – систематическая погрешность шага нарезки винта;  $Rnut$  – систематическая погрешность шага нарезки гайки;  $z$  – показатель, зависящий от длины сопряжения винта и гайки;  $RS_k$  – вероятность комбинации случайных погрешностей шага винта и гайки, суммирующихся в направлении перемещения гайки;  $\mu$  и  $h(S)$  – операторы, представляющие собой переходные функции от комплексных аргументов, характеризующих распределение погрешностей;  $\delta(S - S_0)$  – обобщённая единичная функция. Применение обобщённой функции обусловлено тем, что пик максимума погрешности ШВП можно представить как единичный всплеск.

Верификация математической модели (8) была произведена в производственных условиях.

### 3. Апробация метода на практике

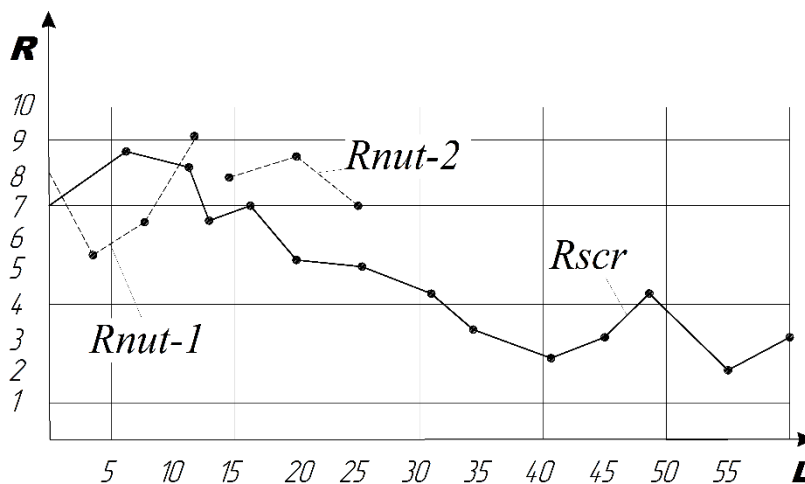
Апробацию методики произвели как на предприятиях-изготовителях ШВП, так на предприятиях, эксплуатирующих эти изделия. Была проведена проверка оборудования и ШВП находящихся на складе готовой продукции. Все детали изготовленных ШВП были получены в так называемом режиме «автоматического получения размеров». Этот режим предполагает одноразовую настройку при обработке партии деталей с поднастройкой технологического оборудования, только если размеры или качество поверхности изделия выходят за пределы, регламентированные заводскими техническими условиями на изготовление. Вскрыты следующие особенности используемых технологий.

Установлено, что систематические погрешности изготовления могут быть устранены соответствующей коррекцией настройки технологического оборудования, которую необходимо производить аperiодически. Именно аperiодический характер проявления погрешностей затрудняет управление точностью технологического процесса. Величина систематических погрешностей зависит от множества технологических факторов, среди которых число технологических переходов, распределение припуска между переходами, глубина и скорость резания, вид и способ подачи СОЖ, материал и точность правки шлифовального круга, а также особенности заготовки, ко-

## Численные методы моделирования

торые невозможно прогнозировать. Установлено, что указанные технологические факторы являются трудноуправляемыми.

Графики стохастических функций ошибок шага нарезки гайки  $R_{nut}$  и винта  $R_{scr}$  представлены на рис. 1. Длина свинчивания нарезки винта  $L$  на рис. 1 измеряется в шагах нарезки (это сделано для возможности абстрагирования от габаритных размеров деталей ШВП).



**Рис. 1.** График погрешности по шагу  $R_{scr}$  винта (сплошная линия) и гайки (штриховая линия):  $R_{nut-1}$  – погрешность шага первой полугойки;  $R_{nut-2}$  – тоже для второй полугойки; точка – математическое ожидание измеренных величин; линии аппроксимируют функциональную зависимость; размерность  $R$  – мкм  
 1. От 15,6 до 21 % готовых деталей соответствует классам точности П1 и Т1.  
 2. От 38 до 43 % деталей ШВП соответствует классам точности П3 и Т3.  
 3. От 45 до 50 % – классам точности П5, Т5, П7 и Т7.

Номера классов точности согласно ОСТ 2 Р31-4-88. Заводские технические условия на изготовление ШВП разработаны с учётом ОСТ 2 Р31-5-89, ОСТ 2 Н06-1-86 и нормали станкостроения 23–7.

Процентное отношение составляющих суммарной погрешности получили на основе анализа значений коэффициентов (3)–(5). Для того чтобы получить значение каждого из коэффициентов в отдельности, за счёт использования ремесленных приёмов уменьшали значения двух других компонент до минимума. В расчётах другие коэффициенты представляли равными нулю  $\xi = 0$ . В этом случае закон распределения отдельно взятой случайной величины может быть представлен в виде степенной функции с показателем  $1/\Psi$ . Тогда, используя последовательность расчётов, взятых из [15–17], получим следующее значение коэффициента систематической составляющей погрешности обработки одного, отдельно взятого, размера:

$$\xi_m^2 = \frac{2n\theta_m^2}{2\Psi\theta_m^2 + q_m^n} \quad (9)$$

Квадрат обратной величины вариационного коэффициента, характеризующего стабильность процесса получения этого же размера, равен

$$\xi_M^2 = \frac{q_m^n}{2\Psi\theta_m^2 + q_m^n} \quad (10)$$

В уравнениях (9) и (10) компонента  $\theta_m$  представляет собой отношение значений изменения функции  $m_R^i(t)$  к дисперсии размера  $R_i$  в начальный момент времени  $t = 0$ .  $\theta_m$  – первоначальное прямое значение коэффициента вариации для отдельно взятого размера. В (9) и (10) введены обозначения:

$$q_m = \Psi + 1; \quad q_n = \Psi + 2; \quad q_m^n = q_m^2 q_n$$

Процентное соотношение систематической и случайной составляющих погрешности было получено решением уравнений (9) и (10) относительно аргумента  $\Psi$ .

На рис. 2 дан график максимальной кинематической погрешности  $ERS$  ШВП и график, представляющий собой сумму величин математического ожидания ошибок шага нарезки гайки  $Rnut$  и винта  $Rscr$ . Как видно из графиков, они не совпадают по длине нарезки винта  $L$ . Наложение графиков выполнено в зоне отклонения (большого выброса), которое дано в (8) в виде:

$$\xi = h(S)\delta(S - S_0).$$

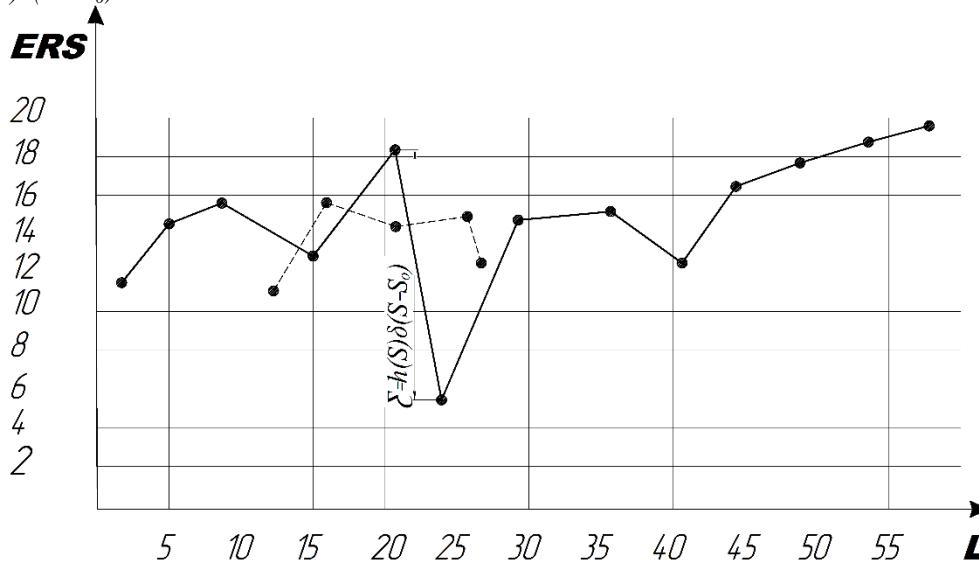


Рис. 2. Графики кинематической погрешности ШВП (сплошная линия) на длине хода гайки и суммарной погрешности  $Rscr + Rnut$  (штриховая линия): суммарная погрешность приведена для участка «скачка»  $\xi$  величины кинематической погрешности, размерность  $ERS$  – мкм

### 3.1. Проверка формулы (8)

Анализ результатов аттестационных испытаний позволил проверить зависимость влияния погрешностей размеров деталей ШВП на её кинематическую точность. Математическую модель (8), полученную феноменологическим путём, представили как нуль гипотезу [20]. Во избежание ошибок обработки эмпирических данных, возможных при проведении экспериментальных исследований [21], было рассмотрено несколько вариантов обработки эмпирических данных. Робастный метод был отклонён, так как «большой выброс» наблюдали с постоянной периодичностью. Отклонение было мотивировано тем, что робастный метод призван заглаживать подобные крупные отклонения результатов измерений, а не описывать их в отдельности.

Была выдвинута общепринятая гипотеза, что ошибки подчинены нормальному закону распределения, а погрешность  $ERS$  имеет многомерный характер, так как зависит от нескольких случайных величин. На этом основании было принято решение определить частоту скачкообразного изменения значения  $ERS$  в зависимости от объёма выборки. Подобные изменения отмечены у 15 % аттестованных ШВП 1-го класса и до 28 % у ШВП 5-го и 7-го класса. Коэффициент корреляции  $ERS$  и  $Rscr$ ,  $Rnut$ , в этом случае, незначительно отличен от нуля.

В результате апробации методики доказано, что изменение любого из коэффициентов  $\xi$  характеризующих технологическую среду изменяет точность ШВП. Влияние систематической погрешности изготовления винта на кинематическую точность в пределе стремится к значению 25 %, гайки – 28 %, тел качения – 19 %. Случайная составляющая погрешности изготовления соответственно: винта 38 %, гайки 42 %, тел качения 21 %. Таким образом, наибольшее влияние на выходную точность ШВП оказывает качество изготовления нарезки гайки. Следующая, по степени влияния, погрешность – накопленная ошибка шага нарезки винта.

Дальнейшая проверка методики происходила при проведении экспериментов на станках с ЧПУ в рамках выполнения работы [12]. Для абстрагирования результатов экспериментов от алгебраических значений величины погрешности был использован энтропийный метод оценки выходной точности устройств [12, 22]. Он необходим для того, чтобы иметь возможность качественного сравнения показателей ШВП, отличающихся габаритными размерами и значением допусков на эти размеры. В результате апробации метода доказано, что энтропийный коэффициент стабильности выходной точности ШВП уменьшается при повышении качества нарезки гайки.

Уменьшение этого коэффициента говорит о повышении качества ШВП как механизма точного позиционирования.

### Выводы

1. Предложен метод позволяющий производить управление точностью изготавливаемых передач и трансмиссий с избыточными связями непосредственно в технологической среде.

2. Для практического применения можно использовать изменение значений показателей  $\xi$  стабильности технологических процессов. Так как изменение любого из вариационных коэффициентов – систематической погрешности, рандомизированного и общего – влечёт за собой снижение качества продукции.

3. Доказано, что для повышения стабильности выходных характеристик ШВП достаточно улучшить качество гайки при прочем неизменном качестве остальных деталей. Это обеспечивает снижение трудоёмкости изготовления ШВП относительно известных методов повышения качества этого изделия.

### Литература

1. Детали и механизмы металлорежущих станков. В 2 т. Т.2: Шпиндели и их опоры. Механизмы и детали приводов / под. ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение, 1972. – 520 с.

2. Promising Rotation-Translation Converters / P.A. Sokolov, D.S. Blinov, O.A. Ryakhovskii et al. // *Russian Engineering Research*. – 2008. – Т. 28, № 10. – С. 949–956. DOI:10.3103/S1068798X08100079

3. Huang, Y.Ch. Method of Intelligent Fault Diagnosis of Preload Loss for Single Nut Ball Screws through the Sensed Vibration Signals classification [Электронный ресурс] / Y.Ch. Huang, Y.-Ch. Shi // open-access repository Zenodo. – 2012. (Version 13973). – <http://doi.org/10.5281/zenodo.1082113>

4. Benker, M. Estimating remaining useful life of machine tool ball screws via probabilistic classification / M. Benker, R. Kleinwort, M.F. Zäh // *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*. – 2019. – <http://doi.org/10.1109/ICPHM.2019.8819445>

5. Гулиа, Н.В. Детали машин: учебник / Н.В. Гулиа; под общ. ред. Н.В. Гулиа. – СПб: Лань, 2013. – 416 с.

6. Васильев, А.С. Статистическая модель трансформации свойств изделий в технологических средах / А.С. Васильев // *Вестник МГТУ. Машиностроение*. – 1997. – № 4. – С. 13–20.

7. Кондаков, А.И. Технологические решения и гарантированное обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / А.И. Кондаков // *Справочник. Инженерный журнал*. – 2009. – № 3. – С. 17–20.

8. Bazrov, V.M. Plotting Dimensional Chains of Parts by Means of Surface-Module Graphs / V.M. Bazrov // *Russian Engineering Research*. – 2008. – Vol. 28, № 7. – P. 651. DOI:10.3103/S1068798X0807006X

9. Kolybenko, E.N. Types of Technological System Dimensional Chains / E.N. Kolybenko // *Russian Engineering Research*. – 2007. – Vol. 27, № 7. – P. 479. DOI:10.3103/S1068798X07070179

10. Kolybenko, E.N. Theory of Dimensional Chains in Technological Production Systems / E.N. Kolybenko // *Russian Engineering Research*. – 2007. – Vol. 27, № 9. – P. 647. DOI:10.3103/S1068798X07090171

11. Kolybenko, E.N. Structure of the Chain of Dimensional Relations in Technological Systems / E.N. Kolybenko // *Russian Engineering Research*. – 2007. – Vol. 27, № 11 – P. 464. DOI:10.3103/S1068798X07110214

12. Seregin, A.A. Mathematical Model of Machine-Tool Accuracy with Account for the Oscillations of Its Actuators / A.A. Seregin // *Russian Engineering Research*. – 2007. – V. 30, № 7. – P. 454. DOI:10.3103/S1068798X07070118.

13. Коротков, В.П. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств / В.П. Коротков, Б.А. Тайц. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 352 с.

14. Agresti, A. Bayesian Inference for Categorical Data Analysis / A. Agresti, B.H. David // *Statistical Methods & Applications*. – 2005. – Vol. 14, no. 3. – P. 298. DOI:10.1007/s10260-005-0121-y.

15. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.

16. Rahou, M. *Time Compensation of Machining Errors for Machine Tools NC based on Systematic Dispersion* / M. Rahou, A. Cheikh, F. Sebaa // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. – 2009. – Vol. 32. – P. 10–16. – <http://doi.org/10.5281/zenodo.1075573>

17. Пугачев, В.С. *Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. для вузов* / В.С. Пугачев. – М.: Физматлит, 2002. – 496 с.

18. Brown, L.D. *Interval estimation for a binomial proportion* / L.D. Brown, T.T. Cai, A. DasGupta // *Statistical Science*. – 2001. – Vol. 16. no. 2 – P. 101–133. – [https://projecteuclid.org/download/pdf\\_1/euclid.ss/1009213286](https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.ss/1009213286).

19. Brown, L. D., *Confidence Intervals for a Binomial Proportion and Asymptotic Expansions* / L.D. Brown, T.T. Cai, A. DasGupta // *The Annals of Statistics*. – 2002. – Vol. 30, no. 1. – P. 160–201. <http://dx.doi.org/10.1214/aos/1015362189>.

20. Sellke, T. *Calibration of  $p$  Values for Testing Precise Null Hypotheses* / T. Sellke M.J. Bayarri, J.O. Berger // *Am Stat*. – 2001. – Vol. 55. – P. 62–71. – <https://doi.org/10.1198/000313001300339950>

21. Ioannidis, J.P.A. *Why Most Published Research Findings Are False* / J.P.A. Ioannidis // *PLoS Medicine*. – 2005. – Vol. 2, no. 8. – p. 124. DOI:10.1371/journal.pmed.0020124.

22. Пицкель, Б.С. *Энтропийная оценка точности позиционирования* / Б.С. Пицкель, В.А. Ратмиров, Т.С. Хрящева // *Машиноведение*. – 1979. – № 1. – С. 42–46.

**Серегин Андрей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и комплексы», Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, aasdom@yandex.ru.

**Кравцов Александр Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и комплексы», Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, teplo1955@mail.ru.

*Поступила в редакцию 8 апреля 2020 г.*

DOI: 10.14529/engin200206

## FORECAST OF THE QUALITY OF MANUFACTURED TRANSMISSION PARTS BASED ON A PROBABILISTIC MODEL OF THE FUNCTIONING OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS

**A.A. Seregin**, aasdom@yandex.ru,

**A.G. Kravtsov**, teplo1955@mail.ru

*Orenburg's State University, Orenburg, Russian Federation*

The method of probabilistic estimation of the kinematic error of transmissions with excessive connections depending on the quality of manufacturing of their parts is considered. The method is based on the results of the analysis of the technological accuracy of the equipment involved in the production of gear parts, followed by the synthesis of a model of gear accuracy. The geometric accuracy of the technological system is the expected errors of the finished product. Its connection with technological accuracy is probabilistic in nature. To open this connection, a separation of systematic and random errors characterizing the technological process was made. On the basis of well-known works on the accuracy of technological processes, a technique for separating systematic and random errors has been developed. The basic formulas of this technique are given.

As an example, a method for synthesizing a probabilistic model of the output accuracy of ball screw gears is considered. This method, with minor modifications, can also be used to calculate the kinematic accuracy of roller screw, worm, and spiral-pinion gears. The effectiveness of the developed algorithm for calculating accuracy has been proven in practice. Increasing the effi-



ciency of the method of synthesis of a probabilistic model of the output accuracy of ball screw gears is possible if the influence of elastic properties of transmission parts on its output accuracy is taken into account in the mathematical model:

1) clarified the features of the technological environment in which the production of the main transmission elements with excessive connections is carried out;

2) a method for the synthesis of a probabilistic model of the output accuracy of gears with redundant connections has been developed, which allows taking into account the basic errors of technological systems;

3) the developed probabilistic model is verified based on the hypothesis of normal distribution of manufacturing errors.

*Keywords:* transmission details; kinematic accuracy; transmissions with excessive connections; stability; accuracy of technological equipment.

### References

1. Reshetova D.N. (ed) *Detali i mekhanizmy metallovezhushchikh stankov: v 2-kh tomakh. T.2: Shpindel i ikh opory. Mekhanizmy i detali privodov* [Details and Mechanisms of Metal-Cutting Machines: Two Volumes. Vol. 2: Spindles and Their Supports. The Mechanisms and Details of the Drives] Moscow: Mashinostroenie, 1972. 520 p.
2. Sokolov P.A., Blinov D.S., Ryakhovskii O.A., Ochkasov E.E., Drobizheva A.Yu. Promising Rotation-Translation Converters. *Russian Engineering Research*. 2008, vol. 28, no. 10, pp. 949–956. DOI:10.3103/S1068798X08100079
3. Huang Y.Ch., Shi Y.-Ch. Method of Intelligent Fault Diagnosis of Preload Loss for Single Nut Ball Screws through the Sensed Vibration Signals classification. *Open-access repository Zenodo*. – 2012. (Version 13973). <http://doi.org/10.5281/zenodo.1082113>
4. Benker M., Kleinwort R., Zäh M.F. Estimating remaining useful life of machine tool ball screws via probabilistic classification. *IEEE International Conference on Prognostics and Health Management*. – 2019. <http://doi.org/10.1109/ICPHM.2019.8819445>
5. Gulia N.V. (ed) *Detaly mashin: uchbnik* [Details of machines: textbook] Saint Petersburg: LAN, 2013. 416 p.
6. Vasiliev A.S. [Statistic Model of Transforming Goods Characteristics in Technological Environments]. *MSTU Bulletin: Machine Construction*, 1997, no. 4, pp. 13–20. (in Russ.)
7. Kondakov A.I. [Technological solutions and guaranteed maintenance of operational properties of machine parts.] *Reference Book . Engineering magazine*. 2009, no. 3, pp. 17–20. (in Russ.)
8. Bazrov B.M. Plotting Dimensional Chains of Parts by Means of Surface-Module Graphs. *Russian Engineering Research*. 2008, vol. 28, no. 7, p. 651. DOI:10.3103/S1068798X0807006X
9. Kolybenko E.N. Types of Technological System Dimensional Chains. *Russian Engineering Research*. 2007, vol. 27, no. 7, p. 479 DOI:10.3103/S1068798X07070179
10. Kolybenko E.N. Theory of Dimensional Chains in Technological Production Systems. *Russian Engineering Research*. 2007, vol. 27, no. 9, pp. 647 DOI:10.3103/S1068798X07090171
11. Kolybenko E.N. Structure of the Chain of Dimensional Relations in Technological Systems. *Russian Engineering Research*. 2007, vol. 27, no. 11. pp. 464 DOI:10.3103/S1068798X07110214
12. Seregin A.A. Mathematical Model of Machine-Tool Accuracy with Account for the Oscillations of Its Actuators. *Russian Engineering Research*. 2007, vol. 30, no 7, pp. 454. DOI:10.3103/S1068798X07070118.
13. Korotkov V.P., Taitis B. A. *Osnovy metrologii i tochnosti izmeritel'nykh ustroystv* [Fundamentals of Metrology and Theory of Accuracy of Measuring Devices] Moscow: Publishing House of Standards, 1978. 352 p.
14. Agresti A., David B.H. Bayesian Inference for Categorical Data Analysis. *Statistical Methods & Applications*. 2005, vol. 14, no. 3, p. 298. doi:10.1007/s10260-005-0121-y.
15. Katsev P.G. *Statisticheskie metody issledovaniya rezhustchego instrumenta* [Statistical research methods of a cutting tool] Moscow: Mechanical Engineering, 1974, 231 p.
16. Rahou M., Cheikh A., Sebaa F. Time Compensation of Machining Errors for Machine Tools NC based on Systematic Dispersion. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2009, vol. 32, pp. 10–16. – <http://doi.org/10.5281/zenodo.1075573>.

17. Pugachev V. S. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika*[Probability Theory and Mathematical Statistics: textbook for universities] Moscow: Fizmatlit, 2002. 496 p.
18. Brown L.D., Cai T.T., DasGupta A. Interval Estimation for a Binomial Proportion. *Statistical Science*. 2001, vol 16. no. 2, p.p. 101–133. – [https://projecteuclid.org/download/pdf\\_1/euclid.ss/1009213286](https://projecteuclid.org/download/pdf_1/euclid.ss/1009213286).
19. Brown L.D., Cai T.T., DasGupta A. Confidence Intervals for a Binomial Proportion and Asymptotic Expansions. *The Annals of Statistics*. 2002, vol. 30, no.1, p.p. 160–201. – <http://dx.doi.org/10.1214/aos/1015362189>.
20. Sellke T., Bayarri M. J., Berger J. O. Calibration of  $p$  Values for Testing Precise Null Hypotheses. *Am Stat*. 2001, vol 55, pp. 62–71. <https://doi.org/10.1198/000313001300339950>
21. Ioannidis J.P.A. Why Most Published Research Findings Are False. *PLoS Medicine*. 2005, vol. 2, no. 8, p. 124. doi:10.1371/journal.pmed.0020124.
22. Pickel B. S., Ratmirov V. A., Khryasheva T. S. [Entropy to Evaluate the Accuracy of Positioning]. *Engineering science*, 1979. no. 1, pp. 42–46. (in Russ.)

Received 8 April 2020

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Серегин, А.А. Прогноз качества изготавливаемых деталей передач на основе вероятностной модели функционирования технологических систем / А.А. Серегин, А.Г. Кравцов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 60–69. DOI: 10.14529/engin200206

**FOR CITATION**

Seregin A.A., Kravtsov A.G. Forecast of the Quality of Manufactured Transmission Parts Based on a Probabilistic Model of the Functioning of Technological Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 60–69. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200206