

УДК 621.833.3, 681.2.08

Математическое и программное обеспечение для обработки результатов метрологических измерений деталей роликовинтовой передачи

**Блинов Д. С.^{1,*}, Морозов М. И.¹,
Анисимов П. Д.¹**

[*dmitriyblinov@mail.ru](mailto:dmitriyblinov@mail.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Роликовинтовые передачи (РВП) являются сейчас наиболее перспективными преобразователями вращательного движения в поступательное. Высокие эксплуатационные параметры РВП достигаются, в первую очередь, за счет прецизионной точности изготовления специальной резьбы ее деталей. Отсюда актуальным и высокоответственным мероприятием становится полный метрологический контроль резьбы винта, роликов и гайки. Измерение на контурографе профиля витков в осевом сечении резьбовой детали позволяет рассчитать и проконтролировать целый ряд важнейших параметров этой детали. Для обработки результатов измерений разработано математическое и программное обеспечение, которое можно использовать для контроля деталей РВП со специальной резьбой, а также для контроля высокоточных деталей с треугольной или трапецеидальной резьбой, имеющей симметричный профиль.

Ключевые слова: передача, винт, ролик, профиль витка, шаг резьбы

Введение

В высокотехнологичных изделиях машиностроения среди механизмов, преобразующих вращательное движение в поступательное движение, доминируют винтовые передачи качения, обеспечивающие высокий КПД. К ним относятся шариковинтовые передачи (ШВП) и роликовинтовые передачи (РВП).

Из сравнительного анализа ШВП и РВП следует, что РВП по большинству основных параметров превосходят ШВП, а по остальным не уступают последним [1]. Особо следует отметить, что РВП существенно превосходят ШВП по нагрузочной способности, быстродействию, надежности и долговечности. Кроме того, количество конструктивных разновидностей ШВП ограничено, и размеры их основных деталей находятся в довольно узких диапазонах. Отсюда диапазон выбора передаточной функции ШВП узок и, составляя обычно 5, 10, 16, 20 мм, не выходит за границы следующего диапазона 2 ... 38 мм. К достоинствам РВП следует отнести наличие целого ряда конструкций (подклассов) этих передач, которые позволяют перекрыть диапазон передаточной функции ШВП. Для конкретного исполнительного механизма, условий его работы и заданных

эксплуатационных параметров можно подобрать или сконструировать наиболее рациональную (дешевую) конструкцию РВП. В связи с этим в западных странах во многих изделиях РВП почти полностью вытеснили ШВП, а в настоящее время прослеживается тенденция по замене пневмоцилиндров и гидроцилиндров электромеханическими цилиндрами на базе РВП [2]. Отечественное машиностроение на десятилетия отстало от Запада. Большинство изделий, которые выпускает наше машиностроение, по-прежнему оснащено ШВП. Особенно остро проблема перехода от ШВП к РВП стоит в оборонных отраслях, аэрокосмической технике и т.д. Чтобы совершить указанный переход надо освоить серийное производство РВП. Это не только приобретение технологий, специализированных станков и инструмента, но и изготовление или покупка вспомогательного оборудования и оснастки, а также разработка и освоение методик для сборки, наладки и приработки РВП, для метрологического контроля ее деталей, для испытания и аттестации передач и многое другое. В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с метрологическим контролем деталей РВП и обработкой полученных результатов.

1. Конструкция РВП и ее важнейшие параметры

Высокие эксплуатационные характеристики РВП объясняются оригинальной конструкцией передачи с целым рядом особенностей и прецизионной точностью изготовления ее важнейших деталей. Как уже отмечалось, РВП имеют различные конструкции. Наиболее распространены планетарные роликовинтовые передачи (ПРВП) с короткими роликами [3]. На примере этой передачи (рис. 1) определим ее важнейшие детали и параметры.

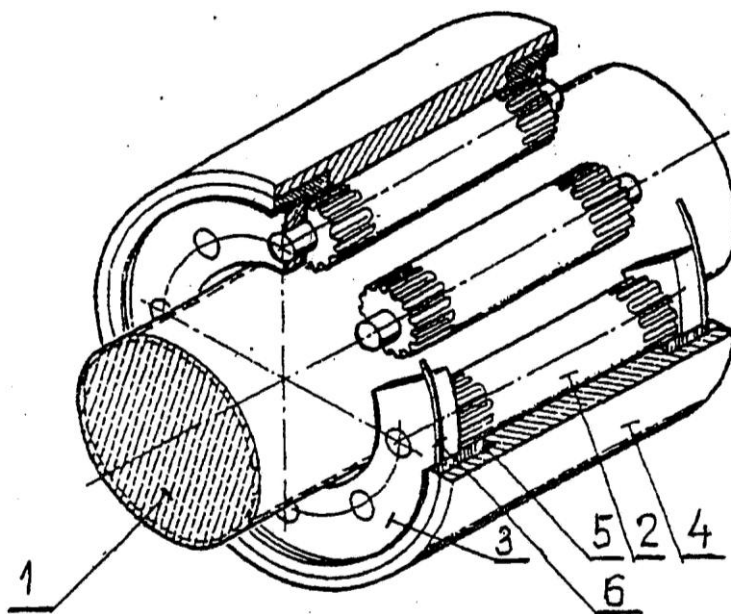


Рис. 1 Планетарная роликовинтовая передача

Конструкция ПРВП состоит из многозаходных винта 1 и гайки 4, резьбовых роликов 2, шейки которых входят с зазором в отверстия сепараторов 3, расположенных с двух

торцов гайки. Чтобы гайка относительно винта имела одну степень свободы, ролики дополнительно связывают с гайкой с помощью зубчатых зацеплений. Для этого на концах каждого ролика непосредственно по резьбе нарезают наружные зубья, которые зацепляются с внутренними зубьями втулок 5, закрепленных в гайке. Осевое перемещение сепараторов ограничивается с помощью разрезных, пружинных колец 6. При работе ПРВП винт (входное звено) вращается, ролики совершают планетарное движение (отсюда название передачи), а гайка (выходное звено) вместе с роликами перемещается вдоль оси винта. Возможно и обратное движение, когда входным звеном будет гайка, а выходным – винт. Отсюда в преобразовании движения участвуют резьбовые детали (винт, ролики и гайка), а сепараторы и втулки с зубчатыми венцами выполняют вспомогательные функции. Кроме того, резьбовые детали существенно влияют на точность осевого перемещения выходного звена ПРВП.

Все резьбовые детали имеют, как правило, правую резьбу. Винт и гайка имеют многозаходную резьбу с равным числом заходов. В зависимости от типоразмера ПРВП число заходов этих деталей чаще всего составляет от 4-х до 6. Ролики, обычно, однозаходные, но для изменения передаточной функции передачи они могут быть и многозаходными. Резьба деталей ПРВП — специальная с углом профиля $\alpha=90^\circ$. Для исключения кромочных контактов сопрягаемых витков резьбы, профиль витков винта и гайки треугольный, а профиль витков роликов фасонный (рис. 2). Контур витка ролика с двух сторон выполнен по дуге окружности, центр которой расположен на оси ролика. Фасонным выполнен профиль витков именно ролика, так как по одной образующей витки ролика взаимодействуют с витками винта, а по противоположной образующей – с витками гайки. В номинальном состоянии без нагрузки витки ролика будут взаимодействовать с витками винта и гайки в точках начального контакта, расположенных на средних диаметрах резьбы всех деталей. При приложении нагрузки сопрягаемые витки резьбовых деталей ПРВП будут взаимодействовать в локальных зонах, внутри которых располагаются точки начального контакта.

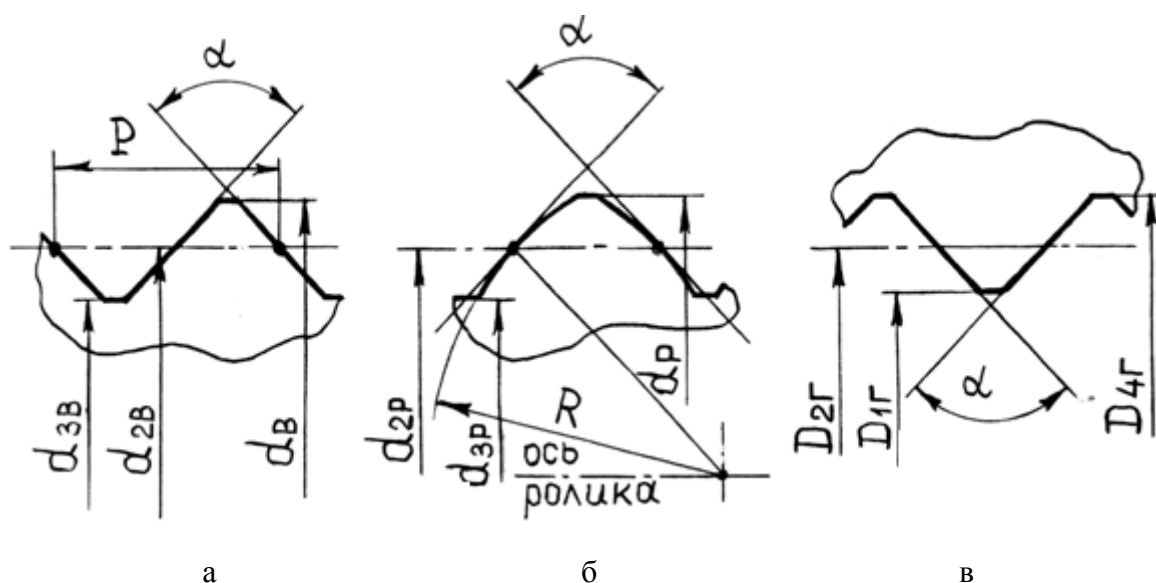


Рис. 2. Профиль витка резьбы: а – винта; б – ролика; в – гайки

Отсюда средние диаметры резьбы являются важнейшими параметрами винта, роликов и гайки, и они являются номинальными диаметрами резьбы деталей ПРВП.

В ПРВП нагрузка передается с винта на n роликов (n обычно от 7 до 11) через пары сопрягаемых витков резьбы (количество пар измеряется десятками), а затем с роликов – на гайку примерно через такое же количество пар сопрягаемых витков. В итоге нагрузка передается через несколько сотен пар сопрягаемых витков винта, роликов и гайки. Таким образом, ПРВП – это механизм с многочисленными избыточными связями, для которого характерна неравномерность распределения нагрузки между роликами и неравномерность распределения нагрузки между парами сопрягаемых витков каждого ролика вдоль образующей, по которой он взаимодействует с винтом, и по образующей, по которой он взаимодействует с гайкой.

Если рассматривать неравномерность распределения нагрузки между роликами, которые в ПРВП расположены между гайкой и винтом, то на нее наибольшее влияние будет оказывать разноразмерность всех роликов одной передачи по среднему диаметру резьбы. Если рассматривать неравномерность распределения нагрузки между парами сопрягаемых витков всех резьбовых деталей ПРВП, то на нее наибольшее влияние будут оказывать погрешность изготовления этих деталей по шагу резьбы, разноразмерность всех роликов одной передачи по среднему диаметру резьбы и отклонения реальных профилей витков резьбы от номинальных.

Перечисленные погрешности будут влиять на прочностные характеристики ПРВП, ее долговечность, надежность, КПД, кинематическую погрешность [4] и на ошибку в положении выходного звена передачи от номинального значения при приложении нагрузки. Отсюда следует, что погрешности изготовления резьбовых деталей ПРВП надо контролировать.

2. Обзор литературы

В зарубежных источниках практически нет информации о средствах и методиках контроля параметров ПРВП. Имеется нормативная документация [5, 6] об аттестации по кинематической погрешности РВП в соответствие со стандартом ISO 3408–3, в котором предусмотрены 1, 3, 5, 7 и 9 классы точности (1-ый самый точный). Этого недостаточно, так как необходимо контролировать размеры и параметры резьбовых деталей ПРВП на соответствие полям допусков и техническим требованиям.

В работах [7, 8] фрагментарно описаны методики и средства метрологического контроля ПРВП, приведены полученные результаты. Однако средства измерения не позволяют получить всю информации о контролируемой резьбе, эти средства низкопроизводительные, и с помощью применяемых средств измерения невозможно передавать результаты измерения на ЭВМ для дальнейшей обработки. То есть использованные средства измерения не соответствуют современному уровню развития техники.

В работах [9, 10] описан контроль резьбы деталей ПРВП с помощью высокоточного сертифицированного прибора Form Talysurf со встроенной ЭВМ (фирма-производитель

"Taylor Hobson", Англия). Для обработки большого объема результатов измерения использовалась ПЭВМ, на которую данные передавались с помощью дискеты с ЭВМ прибора Form Talysurf. На языке Turbo Pascal были разработаны программы для обработки результатов измерения винта и роликов ПРВП, которые измерялись с годовым разрывом по времени. Поэтому в разработке программ отсутствовала системность, а сами программы в настоящее время нельзя использовать, так как они разрабатывались в операционной системе DOS под ЭВМ с 32 разрядами. Однако проделанную работу можно считать фундаментом для той работы, которая описана в данной статье.

3. Постановка задачи

Особенности контроля среднего диаметра резьбы деталей ПРВП рассмотрены в работе [11], а данная статья посвящена измерению профиля витков в осевом сечении резьбовой детали, что позволит рассчитать и проконтролировать целый ряд важнейших параметров резьбовой детали. Для этого необходимо следующее.

1) Выбрать высокоточный и высокопроизводительный прибор для измерения координат точек профиля резьбовой детали в ее осевой плоскости.

2) Для обработки результатов измерения (координат точек профиля резьбовой детали) и определения ответственных параметров резьбовой поверхности разработать математическое обеспечение, позволяющее выполнить обработку полученных результатов для резьбы с треугольным симметричным профилем витков (для винта и гайки) и для резьбы с фасонным профилем витков (для роликов).

3) Разработать комплекс программ для реализации математического обеспечения на основе системного подхода к вводу-выводу информации, ее передаче и обработке. Программы для ЭВМ зарегистрировать в Федеральном институте промышленной собственности (ФИПС) РФ.

Следует отметить, что кроме деталей ПРВП со специальной резьбой треугольного или фасонного симметричного профиля, по разработанным программам можно обрабатывать результаты измерения деталей с трапецеидальной, метрической или дюймовой резьбой, которые имеют треугольный или трапецеидальный симметричный профиль витков.

4. Выбор измерительного прибора

Как показал опыт, в качестве измерительного средства необходимо выбрать высокоточный компьютеризированный прибор контурограф одной из ведущих в этой области фирм. Измерения проводились на контурографе MITUTOYO CV-2000 (рис. 3) и на контурографе Form Talysurf PGI 420.



Рис. 3. Контурограф MITUTOYO CV-2000 с измеряемым винтом

Характеристики контурографа CV-2000: диапазон измерения 100 мм; разрешение 0,2 мкм; шкала измерения вдоль продольной оси – линейный датчик; скорость измерения вдоль продольной оси 0,5 мм/с. Программное обеспечение контурографа Formtracapak для анализа контуров, предлагает полную поддержку для системы управления измерениями, контурного анализа и создания несложных отчетов. Контурограф Form Talysurf PGI 420 имеет примерно такие же характеристики.

Для измерений осевая вертикальная плоскость резьбовой детали совмещается с плоскостью, образованной продольной осью X и поперечной вертикальной осью Y прибора. При перемещении иглы контурографа вдоль оси X последовательно измеряются на базовой длине две координаты N точек контура резьбовой детали. Пусть I – порядковый номер измеренной точки ($I = 1, 2, \dots N$), тогда $X[I]$ и $Y[I]$ — координаты измеренной точки. Результаты измерений записываются в память ЭВМ прибора и могут быть скопированы в виде файла на магнитный носитель для дальнейшей математической обработки. Удобно при копировании формировать текстовый файл, позволяющий просмотром получить необходимую информацию по ряду вопросов. Ниже для примера приведен фрагмент указанного текстового файла (рис. 4). Измерялся пятизаходный, правый винт, имеющий треугольный профиль витков и шаг резьбы 2 мм.

mm	
57411	
0.861074996984917,	-19.898060907749990
0.862245269203713,	-19.899857855076615
0.863938898324925,	-19.901256772862805
0.866133620248545,	-19.904078211232033
0.867531334713033,	-19.904858397169789
...	...

Рис. 4. Фрагмент информации, полученной на контурографе для измеренного винта

Из примера (рис. 4) видно, что в первой строке указана служебная информация, во второй строке указано количество N измеренных точек, которое равно количеству дальнейших строк. В каждой дальнейшей строке слева указано значение продольной координаты $X[I]$ измеренной точки, а справа – значение поперечной координаты $Y[I]$ этой же точки. Координаты точек даны в мм.

5. Математическое обеспечение

5.1. Анализ и преобразование входной информации

Для обработки результатов измерений необходимо, чтобы продольная ось X в вертикальной осевой плоскости проходила по цилиндру, диаметр которого соответствует среднему диаметру измеряемой резьбовой детали. Назовем это положение детали в системе координат окончательным, пригодным для математической обработки. Если толщина произвольного витка $t[J]$, а ширина соседней впадины $v[J]$ (рис. 5,а), то для окончательного положения детали в системе координат суммарная толщина всех витков на базовой длине измерения должна равняться суммарной ширине соседних впадин, то есть

$$\sum_{J=1}^M t[J] = \sum_{J=1}^M v[J],$$

где M – количество витков на базовой длине измерения. В ряде случаев, для того, чтобы количество измеряемых витков равнялось количеству соседних впадин, приходилось из рассмотрения исключать виток или впадину.

Два частных случая предварительного положения детали в осях контурографа показаны на рис. 5,б, 5,в, но чаще всего получается общий случай предварительного положения детали, при котором ее нужно поворачивать и перемещать в вертикальной плоскости.

Из анализа фрагмента информации на рис. 4 следует, что шаг измерения (первый столбец) составляет менее 2-х микрон. При этом резьбовая деталь для начальных точек существенно опущена (второй столбец) относительно продольной оси, так как для шага

резьбы 2 мм глубина впадины (рис. 5,а) не превышает 0,5 мм, то есть поперечная координата должна быть с учетом знака больше, чем $-0,5$ мм, а она равна почти -20 мм.

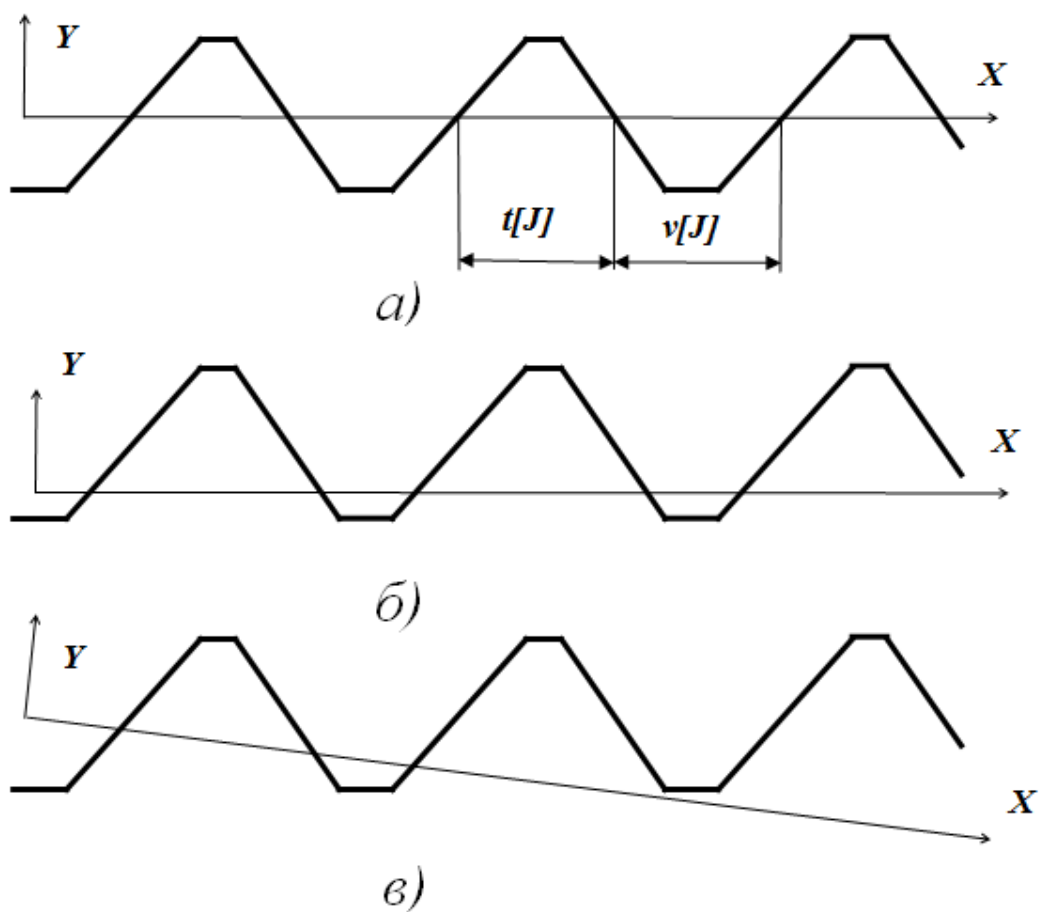


Рис. 5. В системе координат контурографа резьбовая деталь занимает: *а* – окончательное положение, пригодное для математической обработки; *б* – предварительное положение, для которого нужно вертикально перемещать деталь; *в* – предварительное положение, для которого нужно поворачивать деталь.

Контурограф позволяет выполнить предварительную установку резьбовой детали, а затем изменять ее положения или узлов прибора до совмещения оси X контурографа с цилиндром детали, который соответствует среднему диаметру резьбы, то есть получить окончательное положение детали. Однако этот процесс достаточно продолжительный, а стоимость аренды контурографа высокая. Проведя в различные годы такие измерения более 10-ти раз, только один раз удалось выставить измеряемый винт в требуемое окончательное положение, что заняло длительное время. При этом контроль положения детали по специально разработанной программе установил, что это положение можно уточнить.

Таким образом, целесообразно на контурографе для предварительного положения резьбовой детали получить текстовый файл с координатами ее измеренных точек, а затем передать этот файл на ЭВМ и, преобразуя систему координат, получить окончательное положение детали быстро и с очень высокой точностью. При этом разработанная

программа для ЭВМ производит анализ информации для предварительного положения детали и выбирает план преобразования системы координат. Обычно он включает грубый поворот системы координат и ее вертикальное перемещение, а затем высокоточную прогонку вверх и вниз. Грубый поворот системы координат осуществляется на угол между продольной осью и прямой, полученной в результате линейной аппроксимации всех измеренных точек. Затем продольная ось совмещается с полученной прямой. Высокоточная прогонка включает в себя вертикальное перемещение системы координат на малый шаг. Для каждого шага поворот системы координат в обе стороны на малый угол с поиском величины

$$MIN = abs(\sum_{j=1}^M t[j]) - abs(\sum_{j=1}^M v[j]), \quad (1)$$

где abs – абсолютное значение

5.2. Разбиение входной информации на витки с левой и правой стороной

Резьбовая деталь находится в окончательном положении относительно осей координат X и Y . Точка «О» – начало координат (рис. 6), которые назовем глобальными. Необходимо массив всех измеренных точек (всю входную информацию) разделить на M подмассивов, каждый из которых описывает один виток резьбы. За начало произвольного J -го витка (рис. 6) предложено брать точку во впадине между J -ым витком и предыдущем, которая имеет наименьшую поперечную координату Y . Эта точка расположена на вертикальной оси, вводимой для J -го витка, локальной системы координат $x[J] - y[J]$ с началом координат в точке $O[J]$. Для преемственности результатов расчета в глобальной системе координат вводятся продольные координаты $x_o[J]$ до начала локальных систем координат (точек $O[J]$).

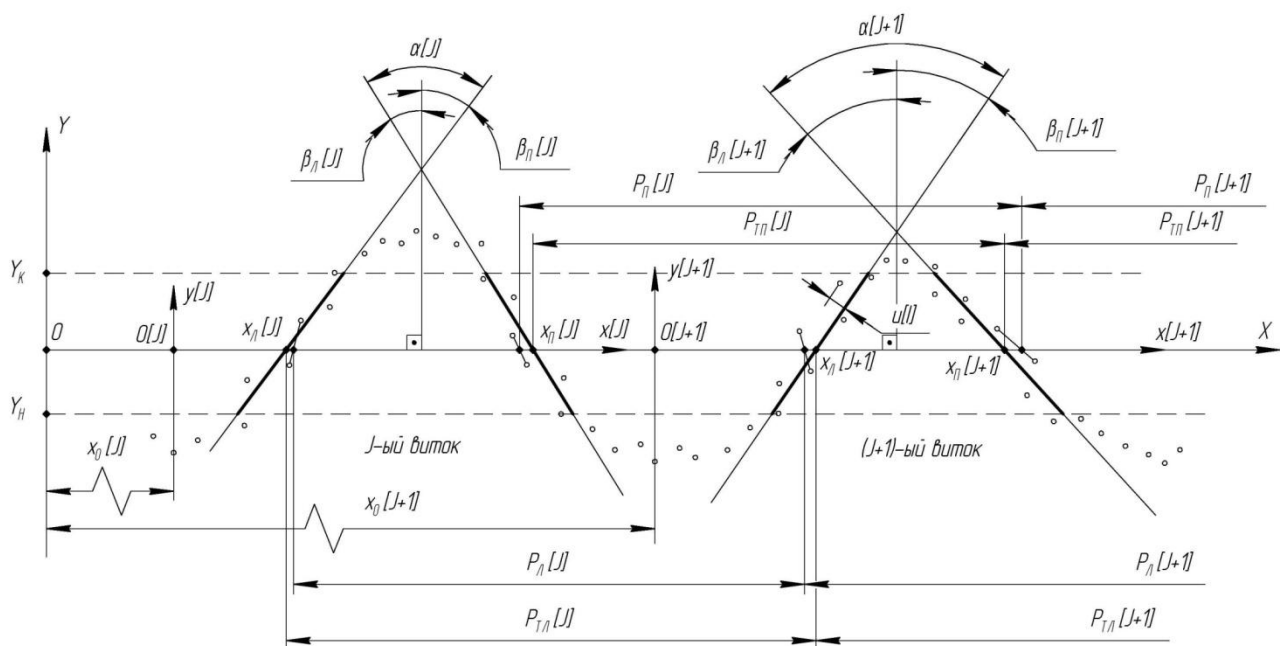


Рис. 6. Измеренные точки для двух произвольных соседних витков.

К J -ому витку относятся все точки, расположенные между осями $y[J]$, $y[J+1]$ локальных систем координат или точки, продольные координаты которых удовлетворяют неравенству

$$x_o[J] < X[I] < x_o[J+1]. \quad (2)$$

Специальную резьбу деталей ПРВП обрабатывают по различным чертежам и технологии. В одних случаях впадины резьбы выполняют в виде сопряжения (скругления) одним радиусом. В других случаях впадина состоит из цилиндрического участка с галтелями на краях, которые переходят в боковые стороны соседних витков. Чтобы гарантированно отделить скругление или галтели впадины от рабочих боковых профилей витков, вводится одинаковая для всех витков координата Y_H – поперечная наименьшая координата рабочего профиля витков. В вершине витка также могут быть особенности при переходе боковой стороны витка в наружную цилиндрическую поверхность. Кроме того, вдоль оси резьбовой детали диаметр вершин витков (наружный диаметр резьбы) может незначительно изменяться. Отсюда предлагается ввести одинаковую для всех витков координату Y_K – поперечную наибольшую координату рабочего профиля витков. Таким образом, к рабочему профилю витков резьбы (рис. 6) относятся измеренные точки, если их поперечные координаты удовлетворяют условию

$$Y_H < Y[I] < Y_K. \quad (3)$$

Виток резьбы состоит из левой стороны и правой стороны. К левой стороне J -го витка относятся все точки, для которых выполняются условия (2), (3), а также условие

$$X[I] < x_o[J] + 0.25 \cdot P, \quad (4)$$

где P – шаг резьбы.

К правой стороне J -го витка относятся все точки, для которых выполняются условия (2), (3), а также условие

$$X[I] > x_o[J] + 0.25 \cdot P. \quad (5)$$

Кроме того, необходимо проанализировать информацию по измеренным точкам в начале и в конце базовой длины измерения (в начале и в конце массива всех измеренных точек). Считалось, что первым витком является виток, у которого протяженность боковой левой стороны составляет не менее 70-75% от номинальной протяженности или если (рис. 7).

$$abs(Y[1]) > 0.5 \cdot abs(Y_H)$$

Если первая измеренная точка была на правой стороне витка, например, около продольной оси, то в расчетах не учитываются все точки, начиная с первой точки и до точки на левой стороне следующего витка, которая расположена первой над линией со значением поперечной координаты Y_H .

Последним M -ым витком считался виток, ширину последующей за которым впадины можно определить по координатам точек или если для правой стороны впадины $Y[N] > 0$, где N – количество измеренных точек (рис. 7). Если измерены точки, расположенные дальше вдоль оси X от точки с координатой $Y[N]$ (рис. 7), то они в расчете не учитываются. Поэтому их можно отбросить.

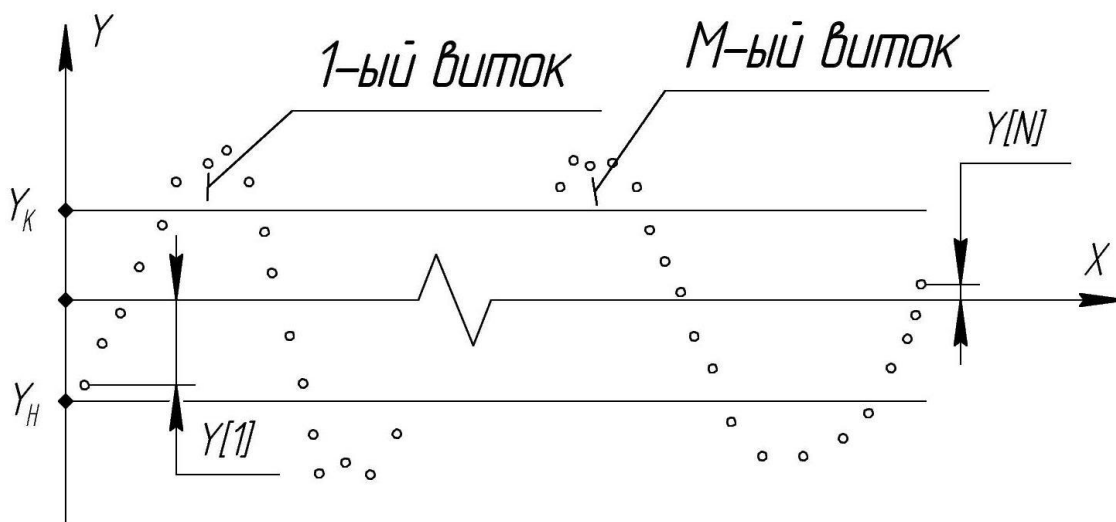


Рис. 7. Крайние витки измеряемой детали

5.3. Определение важнейших параметров для резьбы с симметричными треугольными или трапецидальными витками

Для левой и правой стороны каждого витка в локальной системе координат, связанной с этим витком определяются важнейшие параметры витка и измеряемой детали в целом. Для этого, например, для левой стороны J -го витка (рис. 6) в пределах рабочего профиля (между координатами Y_H и Y_K) выбирают измеренные точки, которые аппроксимируют методом наименьших квадратов прямой линией. Отрезок этой линии для рабочего профиля витка имеет большую толщину, чем вся линия (рис. 6). Назовем его теоретическим профилем соответственно левой или правой стороны витка. Для J -го витка в локальной системе координат прямая, аппроксимирующая точки левой стороны витка, будет иметь вид

$$y[J] = a_{л}[J] \cdot x[J] + b_{л}[J],$$

а прямая, аппроксимирующая точки правой стороны витка, будет иметь вид

$$y[J] = a_{п}[J] \cdot x[J] + b_{п}[J],$$

где $a_{л}[J]$, $b_{л}[J]$, $a_{п}[J]$ и $b_{п}[J]$ – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

Используя аналитическую геометрию на плоскости, найдем углы $\beta_L[J]$ и $\beta_P[J]$ наклона теоретических профилей соответственно левой и правой сторон J -го витка (рис. 6). Если сложить модули указанных углов, то получается угол $\alpha[J]$ профиля J -го витка.

В глобальной системе координат OXY сначала для теоретических профилей левых сторон витков, а затем для их правых сторон определим продольные координаты точек пересечения оси X и прямой линии аппроксимирующей соответствующий теоретический профиль витка. Расстояние от точки пересечения оси X и прямой линии, аппроксимирующей левый теоретический профиль J -го витка, до точки пересечения оси X и прямой линии, аппроксимирующей левый теоретический профиль $(J+1)$ -го витка будет теоретическим шагом $P_{TL}[J]$ для левых сторон указанных витков (рис. 6). Аналогично определяются теоретические шаги $P_{TP}[J]$ для правых сторон витков.

В глобальной системе координат X и Y определяются реальные шаги для левых сторон $P_L[J]$ и правых сторон $P_P[J]$ витков. Для этого, например, для правой стороны $(J+1)$ -го витка (рис.6) определялись две соседние измеренные точки, одна из которых находится над осью X , а вторая – под осью X . По координатам этих точек определялся отрезок прямой, а затем определялась точка пересечения этого отрезка и оси X . От найденной точки пересечения до следующей аналогичной точки пересечения будет реальный шаг $P_P[J+1]$, а до предыдущей – реальный шаг $P_P[J]$ (рис. 6).

Для каждой стороны каждого витка определялись отклонения измеренных точек (реального профиля) от теоретического профиля $u[I]$, где $I = 1; 2; \dots k$ (k – количество измеренных точек профиля витка). Например, для левой стороны $(J+1)$ -го витка отклонение ее произвольной I -ой точки равно $u[I]$ (рис. 6). Выбиралось наибольшее отклонение u_{MAX} , и определялось среднее по модулю отклонение u_{CP} для каждой стороны каждого витка резбовой детали.

На всей длине измерения по левым сторонам витков и по правым сторонам витков определялась накопленная погрешность по шагу резьбы, которая оказывает существенное влияние на кинематическую погрешность передачи.

5.4. Определение важнейших параметров для резьбы с симметричными витками, боковые стороны которых очерчены дугой различных окружностей

Как отмечалось выше, такие витки (рис. 2,б) выполняют на роликах РВП для исключения кромочного контакта. В результате измерений профиля для левой и правой сторон J -го витка ролика получены по k точек.

В качестве примера рассмотрим в локальной системе координат $x[J] - y[J]$ указанные k точек для левой стороны J -го витка ролика (рис. 8). Ставилась задача по аппроксимации методом наименьших квадратов указанных k точек дугой окружности, для которой не известны радиус и координаты центра. Известных математических решений по такой аппроксимации найдено не было, поэтому был предложен следующий численный метод решения, состоящий из двух укрупненных этапов.

Первый этап посвящен определению области S , в которой расположен центр искомой окружности. Для нечетного количества точек k первая и последняя k -ая точки соединялись со средней точкой отрезками. В рассматриваемом примере величина k

Второй этап – поиск радиуса и координат центра окружности, которая лучшим образом (с оценкой методом наименьших квадратов) аппроксимирует измеренные точки. Для этого на область S наносят двухкоординатную сетку, в узлах которой последовательно назначают центр окружности. В левом нижнем углу области S (рис. 8) показана часть двухкоординатной сетки. Пусть точка «С» – произвольный текущий центр окружности. Для выбранного центра окружности определяют значение начального радиуса, в качестве которого можно принять $R_{нач} = (CD+CE)/2$, где «СД» и «СЕ» – отрезки (рис. 8). Пусть номер точки $I = 1; 2; \dots k$ (k – количество измеренных точек). Соединяя последовательно точку «С» с измеренными точками, определяем длины получившихся отрезков, вычитая из этих длин величину $R_{нач}$, получаем отклонения $u[I]$ (рис. 8). Затем для радиуса $R_{нач}$ определяем сумму

$$SUMMA = \sum_{I=1}^k u[I] \cdot u[I]. \quad (6)$$

Для того же центра окружности переходим от начального радиуса к текущему радиусу $R = R_{нач} + \Delta R$, где ΔR – приращение радиуса. Рассчитываем новые отклонения $u[I]$ и определяем по формуле (6) новую сумму. Если она меньше предыдущей, то продолжаем наращивать радиус до тех пор, пока очередная сумма не будет больше предыдущей. В этом случае предыдущая сумма была наименьшей, а соответствующей ей радиус является найденным для центра в точке «С».

Переходим к следующему узлу сетки (новому центру окружности). Весь алгоритм повторяется, в конце расчета наименьшую сумму надо сравнить с наименьшей суммой, полученной для центра в точке «С», и в качестве глобальной наименьшей суммы взять меньшее значение. Обойдя все узлы сетки, для наименьшей глобальной суммы мы получим центр и радиус окружности, которая лучше других аппроксимирует измеренные точки. Если расстояния между узлами сетки и ΔR не устраивают нас по точности, то вокруг найденного центра окружности можно нанести более мелкую сетку и уменьшить значение ΔR , и выполнить уточняющий расчет.

По описанной методике определяются центры и радиусы окружностей, аппроксимирующие измеренные точки на левой и на правой стороне каждого витка ролика. При определении указанных параметров для каждой стороны каждого витка определялись отклонения измеренных точек (реального профиля) от теоретического профиля $u[I]$, где $I = 1; 2; \dots k$ (k – количество измеренных точек профиля витка). Выбиралось наибольшее отклонение u_{max} и определялось среднее по модулю отклонение u_{cp} для каждой стороны каждого витка резьбовой детали.

В пределах измеренных точек дуги найденных окружностей будут теоретическими профилями витков. Как и в п. 5.3, определяются теоретические шаги $P_{TL}[J]$ для левых

сторон витков и теоретические шаги $P_{III}[J]$ для правых сторон витков, а также – реальные шаги для левых сторон $P_L[J]$ и правых сторон $P_R[J]$ витков.

На всей длине измерения по левым сторонам витков и по правым сторонам витков определялась накопленная погрешность по шагу резьбы.

6. Программное обеспечение

Разработанное математическое обеспечение легло в основу трех программ, которые связаны между собой общей целью и унификацией информации для ввода-вывода. Программы написаны на языке Delphi.

В первой программе производится анализ информации, полученной на контурографе в виде текстового файла (рис. 4) и по желанию пользователя преобразование системы координат таким образом, чтобы положение резьбовой детали было окончательным, пригодным для математической обработки. В виде справки сообщается информация о количестве витков, минимальном и максимальном значении поперечной координаты Y для каждого витка и т.д. По запросу пользователя можно сформировать преобразованный текстовый файл, соответствующий ему файл данных с расширением *dat*, а можно сформировать два перечисленных файла. Файл данных состоит из записи с двумя компонентами (полями). Первым полем для измеренной точки является действительная переменная X , а вторым полем – действительная переменная Y . Данная программа используется для анализа резьбы деталей с симметричными витками треугольного, трапецеидального и фасонного (витки роликов) профиля.

Вторая программа осуществляет расчет важнейших параметров резьбы деталей с симметричными витками треугольного и трапецеидального профиля. Входными данными по запросу пользователя может быть текстовый файл или файл данных с расширением *dat*, содержащий координаты измеренных точек для окончательного положения резьбовой детали. В программе реализован математический аппарат, описанный в п. 5.3. При расчете можно использовать не все измеренные точки, а по запросу пропускать введенное число точек. Результаты расчета выводятся в текстовый файл, имя которого задается пользователем, а также в два вспомогательных файла. Фрагмент первой строки и конечной части текстового файла показан на рис. 9. Для каждого витка выводятся итоговые параметры, а затем – итоговые средние параметры для всех витков. В указанном фрагменте представлены итоговые параметры для последнего 50-го витка и итоговые параметры для всех витков.

Полученные результаты показывают, что измеренный винт РВП изготовлен с размерами, существенно выходящими за поля допусков. Например, реальные шаги резьбы винта отличаются от номинальных значений на величину, превышающую 10 мкм (это видно из анализа всех 50-ти витков), хотя по чертежу предельные отклонения шага резьбы равны ± 3 мкм. При этом все витки винта без исключения по левому и правому профилю имеют текущий реальный шаг больше теоретического.

Средний угол профиля 50-ти измеренных витков винта составляет $90^{\circ} 48'$ минут, хотя предельные отклонения на его изготовления по чертежу были $\pm 10'$. При этом отклонения углов профиля витков от номинального значения были в диапазоне от $+45'$ до $+50'$, то есть систематические. Все витки резьбы винта оказались “завалены” в одну сторону – у них средний угол наклона от вертикали левых сторон витков равен $3'$, а средний угол наклона от вертикали правых сторон витков равен почти $45'$.

= Виток 1 == Итоговые параметры =====

...

= Виток 50 == Итоговые параметры =====

Угол профиля витка 90.7862 град = 90 град 47 мин 10 сек

----- Параметр ----- левый профиль - правый профиль

х подвижной системы коорд. мм 99.48453 1 00.47624

Шаг по реальному профилю, мм 1.99840 1.99850

Шаг по теоретич. профилю, мм 2.00094 1.99995

Угол наклона от вертик., град 44.9459 -45.8403

Отклонения от прямолинейного теоретического профиля:

- среднее, мкм 0.632 0.350

- максимальное, мкм 1.701 1.664

Коэф.линей.уравнения: - а 1.00189 -0.97109

- b -0.00157 0.00091

Число эксперимент.точек 136 125

== Итоговые средние параметры для всех витков =====

Число витков = 50

Угол профиля витка 90.8029 град = 90 град 48 мин 10 сек

----- Параметр ----- левый профиль - правый профиль

Шаг по реальному профилю, мм 1.99959 1.99995

Шаг по теоретич. профилю, мм 2.00130 2.00133

Угол наклона от вертик., град 44.9521 -45.8508

Отклонения от прямолинейного теоретического профиля:

- среднее, мкм 0.620 0.368

- максимальное, мкм 1.784 1.241

Общее число экспер.точек 6496 6563

Накопленная ошибка, мкм -19.850 -2.400

Рис. 9. Фрагмент выходной информации

В ранее выполненных измерениях [9] средний шаг всех 30-ти треугольных витков винта составил:

- для левых сторон теоретический шаг $1,60026$ мкм, а реальный – $1,60022$ мкм;
- для правых сторон теоретический шаг $1,60099$ мкм, а реальный – $1,60098$ мкм.

То есть реальные шаги практически совпали с теоретическими, при этом угол профиля витков случайным образом отклонялся от номинального угла 90° в разные стороны на несколько минут.

Максимальные отклонения реального профиля витка с правой и левой стороны от прямолинейного теоретического профиля достигают соответственно 1,24 и 1,78 мкм.

В первом вспомогательном файле представлена информация по отклонениям всех измеренных точек левых сторон всех витков от теоретического профиля (аппроксимирующей прямой), а во втором вспомогательном файле – аналогичная информация, но для правых сторон всех витков. Эта информация полезна для обоснованного выбора координат Y_H и Y_K (п. 5.2), и для контроля профиля витков резьбы.

Третья программа посвящена расчету важнейших параметров резьбы деталей с симметричными витками, имеющими фасонный профиль. Входными данными по запросу пользователя может быть текстовый файл или файл данных с расширением `dat`, содержащий координаты измеренных точек для окончательного положения резьбовой детали. В программе реализован математический аппарат, описанный в п. 5.4. При расчете можно использовать не все измеренные точки, а по запросу пропускать введенное число точек. Результаты расчета выводятся в текстовый файл, имя которого задается пользователем, а также в два вспомогательных файла.

Заключение

1) В настоящее время наиболее перспективными преобразователями вращательного движения в поступательное движение являются роликовинтовые передачи (РВП), которые превосходят другие аналогичные преобразователи по большинству эксплуатационных параметров, а по остальным параметрам не уступают этим преобразователям. Важнейшими деталями РВП, участвующих в преобразовании движения и в передаче нагрузки, являются резьбовые детали (винт, комплект роликов и гайка) со специальной резьбой.

2) РВП является многопоточным механизмом (входная нагрузка распределяется между роликами), в котором нагрузка с входного звена на выходное передается через несколько сотен пар сопрягаемых витков винта, роликов и гайки. Высокие эксплуатационные параметры РВП достигаются, в первую очередь, за счет прецизионной точности изготовления резьбы ее деталей. Отсюда актуальным и высокоответственным мероприятием становится полный метрологический контроль резьбы винта, роликов и гайки.

3) На неравномерность распределения нагрузки в РВП, ее жесткость и кинематическую точность наибольшее влияние оказывает погрешность изготовления резьбовых деталей по шагу, разноразмерность всех роликов одной передачи по среднему диаметру резьбы и отклонения реальных профилей витков резьбы от номинальных. Статья посвящена высокоточным измерениям профиля витков резьбовых деталей в осевой плоскости на приборах контурограф и обработке полученных результатов, позволяющих оценить точность изготовления резьбы по шагу, профилю витков и другим параметрам.

4) Для обработки результатов измерения, полученных на приборах контурограф, разработано математическое и программное обеспечение, которое может быть использовано для анализа и преобразований входной информации и определения важнейших параметров резьбы с симметричными витками треугольного или

трапецеидального профиля, а также для резьбы с фасонными симметричными витками, боковые стороны которых очерчены дугой различных окружностей. Разработаны три программы, которые направлены в Федеральный институт промышленной собственности РФ для регистрации.

5) Разработанное программное обеспечение является универсальным для резьбы с симметричными витками треугольного и трапецеидального профиля, а также для резьбы с фасонными симметричными витками, боковые стороны которых очерчены дугой различных окружностей. Поэтому может применяться для обработки результатов контроля резьбовых деталей РВП и высокоточных винтов, гаек с метрической, дюймовой и трапецеидальной резьбой.

Список литературы

1. Блинов Д.С. Планетарные роликовинтовые механизмы. Конструкции, методы расчетов / Под ред. О.А. Ряховского. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 222 с.
2. EXLAR. Электроцилиндры серии GSX: каталог продукции. М.: ООО «Прогрессивные технологии», 2009. 36 с.
3. Блинов Д.С., Морозов М.И. Перспективные конструкции планетарных роликовинтовых механизмов // Известия вузов. Машиностроение. 2013. № 3. С. 62-72.
4. Крайнев А.Ф. Детали машин: Словарь-справочник. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.
5. SKF roller screws. SKF, 2008. 88 s. (Printed in France).
6. Роликовинтовые передачи, изготавливаемые фирмой La Technique Integrale под торговой маркой Transrol: каталог. France, La Technique Integrale, 2000. 165 с.
7. Козырев В.В. Анализ и синтез роликовинтовых передач как исполнительных механизмов электромеханических приводов: дис. ... докт. техн. наук. Владимир, ВГТУ, 1995. 408 с.
8. Козырев В.В. Конструкции роликовинтовых передач и методика их проектирования: учеб. пособие. Владимир: Владим. гос. ун-т, 2004. 100 с.
9. Блинов Д.С., Ряховский О.А., Соколов П.А., Костеев В.А., Фетисов В.И. Способ измерения рабочих поверхностей ходовых резьб и обработка полученных результатов // Вестник машиностроения. 1997. № 2. С. 7-9.
10. Блинов Д.С., Ряховский О.А., Соколов П.А. и др. Способ измерения профилей резьб роликов планетарных ролико-винтовых передач и обработка результатов // Вестник машиностроения. 1998. № 7. С. 26-29.
11. Блинов Д.С., Морозов М.И. Особенности контроля средних диаметров наружной резьбы деталей роликовинтовой передачи // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 10. С. 19-43. DOI: [10.7463/1014.0727137](https://doi.org/10.7463/1014.0727137)

Mathematical Support and Software for Processing Results of Metrological Roller Screw Detail Measurements

D.S. Blinov^{1,*}, M.I. Morozov¹, P.D. Anisimov¹

[*dmitriyblinov@mail.ru](mailto:dmitriyblinov@mail.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: fear, screw, roller, thread profile, pitch of thread

Roller screws (RS) featuring very high operational parameters are the most promising transformers of rotational motion into translational motion. The original gear design with a number of peculiarities and precision accuracy in manufacturing its essential details, first of all, thread ones allow us to have high operating parameters of RS. Errors of manufacturing special thread of such details greatly affect the load carrying capacity, precision, reliability, and endurance of RS. That is why the challenge is highly accurate metrological control of errors, which have the greatest influence on specified parameters, and processing of measurement results. Major errors include deviations of real pitch of thread from nominal ones and deviations of real thread profiles from nominal ones. The aim of this paper is to determine abovementioned errors, which were measured by high-precision computerized devices, namely: MITUTOYO CV-2000 contour measurement instrument; Form Talysurf PGI 420 contour measurement instrument. Both have a measurement range of 100 mm and resolution of 0.2 μm . As far as a rental cost of the contour measurement instrument was rather high and a software of this device did not allow us to obtain all required information on the thread profile errors of interest, a thread profile was measured using a contour measuring device on the sampling length. Measurement results were copied to the USB flash drive, and then conversion of obtained results and calculation of all errors of interest were carried out on ECM by means of specially designed software. For example, when using a contour measurement instrument MITUTOYO CV-2000, to make measurement of RS screw on the sampling length of 100 mm along one path, the longitudinal and transverse coordinates of 57411 points of thread profile were obtained. Specially developed mathematical support was used as the basis for software. Programs written in Delphi language have been sent to the Federal Institute for Industrial Property of the RF for registration. Calculation results represent information on the left and right side of each turn of measured detail and final parameters for all measured turns. Developed software may be applied to process results of control of RS thread details as well as high-precision screws and nuts with metrical, inch and trapezium thread.

Reference

1. Blinov D.S. *Planetarnye rolikovintovye mekhanizmy. Konstruktsii, metody raschetov* [Planetary roller screw mechanisms. Designs, calculation methods]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 222 p. (in Russian).
2. Exlar. Elektrotsilindry serii GSX: katalog produktsii [Exlar. Electric cylinder series GSX: product catalogue]. Moscow, Publ. of "Progressivnye tekhnologii", 2009. 36 p. (in Russian).
3. Blinov D.S., Morozov M.I. Advanced Structural Designs of Planetary Roller Screws Gears. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 3, pp. 62-72. (in Russian).
4. Kraynev A.F. *Detali mashin: Slovar'-spravochnik* [Machine parts: Dictionary-handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 480 p. (in Russian).
5. SKF roller screws. SKF, 2008. 88 p. (Printed in France).
6. Transrol rollers screws: catalogue. France, La Technique Integrale, 2000. 165 p.
7. Kozyrev V.V. *Analiz i sintez rolikovintovykh peredach kak ispolnitel'nykh mekhanizmov elektromekhanicheskikh privodov. Dokt. diss.* [Analysis and synthesis of roller screw gears as actuators of electromechanical drives. Dr. diss.]. Vladimir, VSTU, 1995. 408 p. (in Russian).
8. Kozyrev V.V. *Konstruktsii rolikovintovykh peredach i metodika ikh proektirovaniia* [Rollerscrew gear design and methodic of their designing]. Vladimir, VGU Publ., 2004. 100 p. (in Russian).
9. Blinov D.S., Riakhovskii O.A., Sokolov P.A., Kosteev V.A., Fetisov V.I. Method for measuring the working surfaces of running threads and processing of the results obtained. *Vestnik mashinostroeniia*, 1997, no. 2, pp. 7-9. (in Russian).
10. Blinov D.S., Riakhovskii O.A., Sokolov P.A., et al. Method of measuring profiles of threads of rollers of planetary roller-screw transmission and processing of results. *Vestnik mashinostroeniia*, 1998, no. 7, pp. 26-29. (in Russian).
11. Blinov D.S., Morozov M.I. Special Aspects of the Roller Screws Pieces Male Thread Pitch Diameters Control. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 10, pp. 19-43. DOI: [10.7463/1014.0727137](https://doi.org/10.7463/1014.0727137)