

УДК 681.5.042

К.Я. Охрименко, к.т.н., почесн. проф. ЧДТУ
К. Eichhorn (К.К. Охрименко), к.т.н., доц.
А.В. Манзюра

ТОЧНОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ КОНЕЧНЫХ ЗВЕНЬЕВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ ПЛАНЕТАРНЫЙ РОЛИКОВИНТОВОЙ МЕХАНИЗМ

Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, fktm-email@ukr.net

В работе рассмотрена методика имитационного моделирования на основании статистического закона распределения равной вероятности для определения приведенной ошибки кинематической цепи привода механизмов при использовании планетарной передачи винт-гайка качения с резьбовыми роликами

Ключевые слова: планетарный роликвинтовой механизм, погрешность, имитационное моделирование, закон равной вероятности, шаг винта, имитационное моделирование.

Вступление

В работе предлагается методика расчёта точности перемещений исполнительных элементов кинематических цепей промышленных роботов, различных механизмов и, в частности, приводов подач металлорежущих станков, с использованием новых перспективных планетарных передач винт-гайка качения с резьбовыми роликами при нарезания винтовых поверхностей. Преимущества и достоинства планетарных роликвинтовых передач, преобразующих вращательное движение в поступательное, против шариковинтовых механизмов и винт гайка скольжения в приводе подач отличаются компактностью конструктивного исполнения, высокой точностью позиционирования, высокими нагрузочными, динамическими и статическими характеристиками, возможностью работы при больших скоростях до 3000 мин⁻¹. Для оценки точности позиционирования выходных звеньев исполнительных механизмов промышленных роботов, аналогично точности формообразования нарезаемой винтовой поверхности от влияния погрешностей каждого из элементов кинематической цепи привода подач, использован метод статистических испытаний с применением закона распределения равной вероятности при имитационном моделировании.

Анализ исследований и публикаций. Существуют различные методы исследования накопленной погрешности кинематических цепей и, в частности, нарезаемой винтовой поверхности винторезной кинематической цепи станка, которые определяют выходную погрешность в виде среднеквадратической приведенной ошибки всех её звеньев [1,2]. При оценке погрешностей среднеарифметическими значениями, среднеквадратическое значение учитывает векторный характер погрешностей, определяющих направление их действия. В отличии от исследования А.В. Левашова при сочетании квадратического и арифметического суммирования комбинированным методом [2] и исследования точности кинематической цепи станка при нарезании винтовых поверхностей постоянного шага с механизмом винт-гайка скольжения в приводе подач [3,4], в настоящем исследовании при использовании планетарного роликвинтового механизма, применён статистический метод имитационного моделирования на основании закона равномерного распределения плотности вероятности случайных величин.

Постановка задачи. По аналогии с зубчатыми колёсами полная кинематическая погрешность пары винт-гайка скольжения ΔL_{Σ} равна сумме накопленной погрешности Δp_{Σ} шага и циклической погрешности $\Delta \ell$, многократно повторяющейся за полное перемещение гайки при поступательном перемещении ведомого элемента:

$$\Delta L_{\Sigma} = \Delta p_{\Sigma} + \Delta \ell . \quad (1)$$

Определяющую роль в кинематической погрешности шага нарезаемой винтовой линии составляет накопленная погрешность промежуточных зубчатых передач кинематической цепи и планетарного роликвинтового механизма.

Углы поворотов элементов планетарного роликвинтового механизма, конструкция которого изображена на рис. 1, определяются из условия равенства длин сопряжённых дуг.

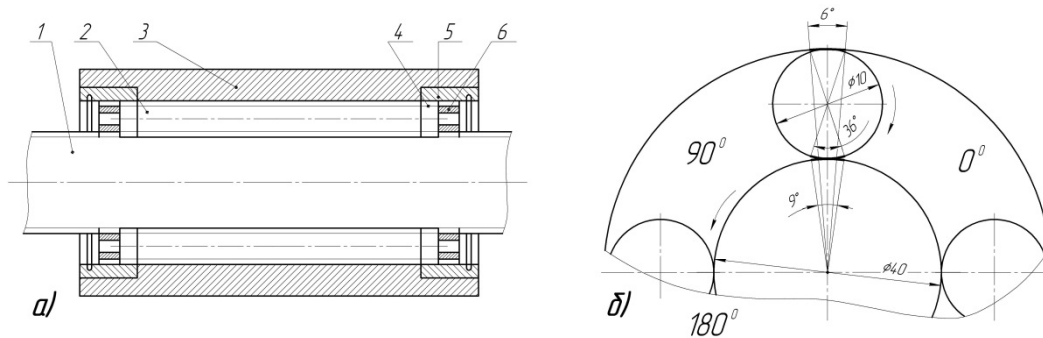


Рис. 1. Планетарная роликвинтовая передача: а) конструкция (1– винт; 2– резьбовые ролики; 3– гайка; 4– зубчатые венцы ролика; 5– зубчатые венцы гайки; 6– сепаратор); б) геометрическая схема соотношения углов поворота элементов передачи.

Планетарная передача с короткими роликами 2 включает винт с гайкой и резьбовые ролики сателлитов, длина которых соответствует длине гайки, цапфы роликов вставлены в сепараторы 6. При перемещении роликов, совершающих планетарное движение, они перемещаются с гайкой вдоль оси винта, преобразуя вращательное движение в поступательное.

Принимая для диаметра винта $d_g = \varnothing 40$ мм длину окружности 120 мм и длину окружности ролика 30 мм при $d_p = \varnothing 10$ мм, углу поворота винта на 9° будет соответствовать 36° угла поворота ролика согласно соотношения: $\varphi_p = L_{окр.в} \cdot \varphi_g / L_{окр.р} = 120 \cdot 9^\circ / 30 = 36^\circ$, а перемещение гайки $d_z = \varnothing 180$ мм, относительно нулевого положения винта соответствует углу поворота $\varphi_z = L_{окр.р} \cdot \varphi_p / L_{окр.г} = 30 \cdot 36^\circ / 180 = 6^\circ$. Таким образом, для каждого полного поворота ходового винта с дискретностью значений поворота на 9° , поворот 1-го ролика совершается в пределах $36^\circ, \dots, 1140^\circ$, 2-го ролика $126^\circ, \dots, 1530^\circ$, 3-го ролика $216^\circ, \dots, 1620^\circ$ и поворот 4-го ролика $306^\circ, \dots, 1710^\circ$. Использование планетарного роликвого механизма в кинематической цепи привода подач позволило в настоящем исследовании разработать методику определения наибольшей накопленной ошибки нарезания винтовой поверхности по длине рабочего хода суппорта для каждого прохода и исследовать закон распределения значений накопленной ошибки из выборки многократных проходов методами математической статистики, определяя действительное влияние каждого звена кинематической цепи на выходную точность.

Решение поставленной задачи. Суммарная накопленная ошибка шага нарезаемой резьбы при повороте ходового винта на заданный угол с учётом всех звеньев кинематической цепи станка рис. 2 (в данном случае 14 звеньев зубчатых колёс, четырёх роликов и гайки), определяется зависимостью:

$$\Delta p_\Sigma = \sum_{i=1}^{14} \Delta p_{\Sigma_i} + \sum_{j=1}^4 \Delta p_{\Sigma_{j_p}} + \Delta p_{\Sigma_z} + \delta T_{\Sigma_j}. \quad (2)$$

Для определения накопленной погрешности каждого звена кинематической цепи принимается гармоническая зависимость:

$$\Delta p_\Sigma = \sum_{i=1}^{14} [A_i \sin(k_i \varphi_j + \psi_i)] + \sum_{j=1}^4 [A_{j_p} \sin(k_{j_p} \varphi_{j_p} + \varphi_{j_p})] + \Delta p_{\Sigma_z} + \delta T_{\Sigma_j}, \quad (3)$$

где i – номер зубчатого колеса; A_i, A_{j_p} – соответственно амплитуды накопленной кинематической погрешности шага зубчатого колеса и ошибка перемещения роликов; φ_j, φ_{j_p} – углы поворота ходового винта и роликов; k_i, k_{j_p} – число оборотов шестерни i -ой шестерни и роликов; ψ_i, ψ_{j_p} – смещение фаз погрешностей i -го и j_p -го звеньев кинематической цепи; δT_{Σ_i} – допуск на накопленную погрешность шага ходового винта за угол поворота φ_j ;

$\Delta p_{\Sigma i}, \Delta p_{\Sigma j}, \Delta p_{\Sigma z}$ – накопленні погрешності шага нарезаної винтової поверхності на заданий кут і накопленна погрешність шага винтової поверхності гайки.

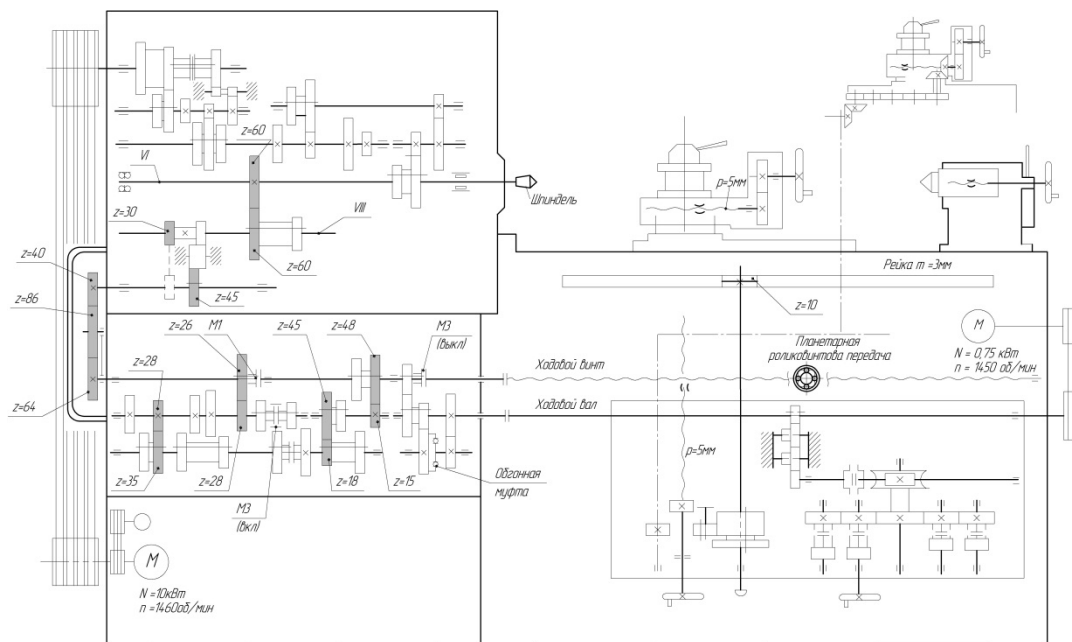


Рис. 2. Кинематическая цепь токарно-винторезного станка

Полагая ошибку перемещения роликов одинаковой, характер погрешности от их влияния можно учесть по перемещению одного ролика при его повороте на каждые девять градусов ходового винта. Методика определения накопленной погрешности аналогична определению погрешности нарезания винтовой поверхности постоянного шага при наличии механизма винт-гайка скольжения в приводе подач токарно-винторезного станка, рассмотренная в работе [3].

Для каждого прохода в настоящем исследовании накопленная погрешность определяется через девять градусов поворота ходового винта $\varphi_j = 9^\circ$ (где число выборок $j = 40$). Каждому углу φ_j соответствует определённая часть допуска на накопленную погрешность шага ходового винта $\delta T_{\Sigma j}$. Сдвиг фаз ψ_i, ψ_j является случайными величинами которые принимают разные значения для каждого i -го, j -го звена, и каждого g -го прохода. В этом случае кинематическая цепь состоит из числа звеньев зубчатых колёс $i = 14$, число роликов $j = 4$ и расчёт выполнен для пятиста проходов $r = 500$. Сдвиг фаз ψ_i, ψ_{jr} лежит в пределах $0 \div 360^\circ$ и определяется как ψ_{ir} , где C – число равномерного распределения $0 \div 1$, которые генерируются программно в виде псевдослучайных чисел ($\psi_{ir, jr} = 360^\circ \cdot C$). Так как винтовая поверхность образуется при перемещении резца на величину шага за один оборот шпинделя, то уравнение кинематического баланса винторезной цепи, включающий семь пар зубчатых колёс, для одного из допустимых вариантов включения зубчатых колёс имеет вид:

$$1_{\text{об.шп.}} \cdot \frac{60 \ 30 \ 40 \ 86 \ 28 \ 28 \ 18 \ 15 \ 40 \ 10}{60 \ 45 \ 86 \ 64 \ 28 \ 35 \ 45 \ 48 \ 10 \ 60} \cdot 12 = p_p,$$

где $p_{x.v.}$ – шаг ходового винта, $p_{x.v.} = 12$ мм; d_g, d_p, d_z – диаметры винта, ролика и гайки, $d_g = 40$ мм, $d_p = 10$ мм, $d_z = 60$ мм.

Нормы кинематической точности всех звеньев цепи принимаем в зависимости от суммы делительных диаметров каждой из пар зубчатых колёс по ГОСТ 1643-81, при этом приняты шестая степень точности при модуле зубчатых колёс в пределах $m = 1 \div 3,5$ мм. Допуск на циклическое отклонение ходовых винтов $\delta \Delta t_B$ принимаем как для червяков по ГОСТ 3675-56. Шаг ходового винта равен $p_{x.v.} = 12$ мм и соответствует пятой степени точности изготовления. По этим данным допустимое циклическое отклонение винтовой линии ходового винта равно

$\Delta t_B = 13$ мкм. При проведенні расчётов согласно предлагаемой методике предварительно определяется число оборотов каждого i -го звена за оборот ходового винта. Из условия расчёта режимов резания при нарезании метрической резьбы на конкретном примере: шаг резьбы $p_p = 2$ мм, диаметр заготовки $d = \varnothing 20$, принимаем частоту вращения шпинделя $n_{\text{шп}} = 1500$ мин⁻¹.

При заданной частоте вращения шпинделя через передаточные отношения пар зубчатых колёс находим частоты вращения каждого из звеньев зубчатой цепи. Оценка погрешности нарезания винтовой поверхности выполняется в пределах одного оборота ходового винта через каждые $\varphi_{i,j} = 9^\circ$ и составляет 40 выборок имитационного моделирования процесса. Для получения статистических данных при имитационном моделировании информационная база накопленной погрешности обработки винтовой поверхности оценивается при многократных проходах.

Последовательный расчёт накопленной погрешностей шага нарезаемой резьбы при повороте ходового винта на каждые 9° в пределах 1 оборота при имитационном моделировании выполняется с использованием закона распределения случайных величин равной вероятности для начальных фаз проявления ошибки каждым элементом кинематической цепи. Например, суммарная накопленная погрешность шага нарезаемой резьбы, с учётом всех звеньев, составляющих исследуемую кинематическую цепь при повороте ходового винта на 9° по ф. (3) составляет:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\Sigma 9^\circ} = & \left(0,625 \sin(0,6 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,26674)\right) + \left(0,625 \sin(0,6 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,46679)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,6 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,079955)\right) + \left(0,625 \sin(0,4 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,34454)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,4 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,27569)\right) + \left(0,625 \sin(0,25 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,38984)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,25 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,01144)\right) + \left(0,625 \sin(0,25 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,77972)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,25 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,54174)\right) + \left(0,625 \sin(0,2 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,81722)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,2 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,05645)\right) + \left(0,625 \sin(0,08 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,32167)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,08 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,09936)\right) + \left(0,625 \sin(0,025 \cdot 9^\circ + 360 \cdot 0,59159)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,1 \cdot 36^\circ + 360 \cdot 0,63752)\right) + \left(0,625 \sin(0,1 \cdot 126^\circ + 360 \cdot 0,09227)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,1 \cdot 216^\circ + 360 \cdot 0,46999)\right) + \left(0,625 \sin(0,1 \cdot 306^\circ + 360 \cdot 0,14004)\right) + \\ & + \left(0,625 \sin(0,017 \cdot 6^\circ + 360 \cdot 0,8263)\right) + 0,325 = 1,175512 \text{ мкм}, \end{aligned}$$

где $A_i = 25/40 = 0,625$ мкм (25 мкм – норма кинематической точности каждого звена, для диаметра делительной окружности шестерён не более $d = 125$ мм; 40 – число интервалов в пределах оборота винта через 9°); 0,6, 0,4, 0,25, 0,2, 0,08, 0,025, 0,1 – числа оборотов каждого из четырнадцати зубчатых колёс кинематической цепи за поворот ходового винта на 9° ; числа



Рис. 3. Зависимость суммарной накопленной погрешности шага нарезаемой резьбы от поворота ходового винта на заданный угол.

ходового винта при повороте на 9° , согласно допустимому циклическому отклонению винтовой линии 13 мкм.

Аналогично выполняются расчёты суммарной накопленной погрешности шага винтовой поверхности для каждого из сорока интервалов в пределах одного оборота ходового винта представленные в таблице 1 и на рис.3.

36°, 126°, 216°, 306° – соответствуют углам положения четырёх роликов планетарного роликовинтового механизма; 0,1 – число оборотов ролика из условия его поворота на 36° за 9° поворота ходового винта; 0,325 – допуск на накопленную погрешность шага

Таблиця 1

Угол поворота ходового винта ϕ , град	Суммарная накопленная погрешность Δr_{Σ} , мкм	Угол поворота ходового винта ϕ , град	Суммарная накопленная погрешность Δr_{Σ} , мкм	Угол поворота ходового винта ϕ , град	Суммарная накопленная погрешность Δr_{Σ} , мкм	Угол поворота ходового винта ϕ , град	Суммарная накопленная погрешность Δr_{Σ} , мкм
9	1,17551	99	-0,1511	189	-22,285	279	77,0012
18	-4,38171	108	29,3425	198	26,6257	288	-49,969
27	-0,19487	117	15,1485	207	-4,32123	297	104,359
36	9,82308	126	49,4337	216	36,69579	306	83,6509
45	10,1476	135	2,36259	225	-13,0543	315	15,9991
54	6,03593	144	-4,0446	234	-49,5274	324	118,603
63	15,9491	153	-26,174	243	86,03169	333	208,042
72	19,9728	162	40,1959	252	40,43358	342	83,1466
81	41,9545	171	-8,6332	261	23,55229	352	84,7338
90	10,4638	180	30,3212	270	-59,2371	360	-101,26

Для получения достоверной информации оценка суммарной накопленной погрешности выполняется методами математической статистики из выборки пятиста проходов нарезания винтовой поверхности по зависимости: $\Delta r_{\Sigma r} = \sum \Delta r_i$. (4)

Диаграмма, определяющая колебания суммарной накопленной погрешности шага нарезаемой винтовой поверхности, в этом случае представлена на рис. 4.

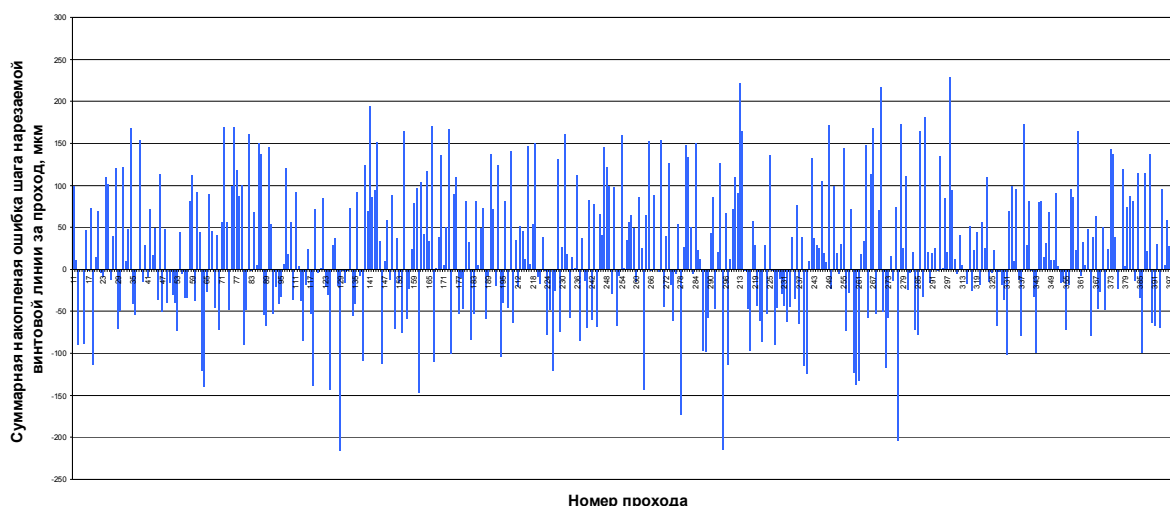


Рис. 4. Колебания суммарной накопленной погрешности шага винтовой поверхности при пятистах проходах.

Суммарная накопленная погрешность шага для 500-го прохода, рассчитанная по ф. (4), равна $\Delta r_{\Sigma 500} = \Delta r_1 + \Delta r_2 + \Delta r_3 + \dots + \Delta r_{500} = 9667,76$ мкм., откуда математическое ожидание наибольшей накопленной ошибки шага нарезаемой накопленной погрешности шага нарезаемой винтовой поверхности составляет: $M|\Delta r_{\Sigma \max}| = \sum_1^{500} (\Delta r_{\Sigma})_r / 500 = \frac{9667,76}{500} = 19,3355$, мкм.

Гистограмма области распределения значений накопленной погрешности, в соответствии с плотностью вероятности, представлена на рис. 5, где вся область рассеивания значений $\Delta r_{\Sigma \max}$ разделена на шестнадцать разрядов (a_{i-1}, a_i) длиной Δa и подсчитано количество попаданий m в i -й разряд. По характеру распределения плотности вероятности накопленной погрешности нарезаемой винтовой поверхности гистограмма распределения приближается к нормальному закону распределения Гаусса. Определение удельного влияния ошибки каждого отдельного звена на накопленную погрешность кинематической цепи определяется по формуле:

$$E_i = \frac{M|\Delta p_{\Sigma \max}| - M|\Delta p_{\Sigma \max}|_i}{M|\Delta p_{\Sigma \max}|} \cdot 100\% \quad (5)$$

Так, например, влияние погрешности первого зубчатого колеса

$$E_1 = \frac{19,3355 - 19,53156}{19,3355} \cdot 100\% = 1,02\%,$$

а четырнадцатого звена $E_{14} = 0,26\%$.

Влияние ошибки шага гайки $E_r = 0,78\%$.

Диаграмма удельного влияния каждого звена на суммарную погрешность кинематической цепи представлена на рис. 6, согласно которого наибольшее влияние на суммарную накопленную погрешность создаёт десятое звено.

Согласно проведенного исследования, влияние планетарной роликвинтовой передачи на выходную точность формообразования винтовой поверхности составило 14,49%.

Выводы. Разработанная методика позволяет рассчитывать накопленную погрешность нарезаемой винтовой поверхности в зависимости от кинематической погрешности зубчатых передач и накопленной погрешности планетарного роликвинтового механизма.

Определение накопленной погрешности механической части привода станка методом статистических испытаний при имитационном моделировании, с применением закона равной вероятности случайных величин, позволяет определить значение накопленной выходной погрешности кинематической цепи и при других законах распределения случайных величин.

С учётом закона статистического распределения погрешностей при многократных переходах, методика позволяет:

- определять накопленную погрешность $\Delta p_{\Sigma \max}$ резьбонарезной кинематической цепи на длине рабочего хода суппорта для каждого прохода;
- исследовать закон распределения значений $\Delta p_{\Sigma \max}$ при многократных проходах для вычисления значений суммарной погрешности;
- определять удельное влияние погрешности каждого из звеньев резьбонарезной цепи.

Методика рассмотрена на примере многоступенчатых зубчатых передач привода подачи токарно-винторезного станка 16К20, что позволяет, использовать её при проектировании реальных приводов. Данная методика позволяет достаточно быстро, с использованием компьютерных средств, более адекватно определить выходную погрешность на любом этапе расчётов и для любого звена и нормировать точность шага нарезаемой винтовой поверхности, принимая меры повышения точности её изготовления.

Список литературных источников

1. Плужников А.С. Расчёт точности зубо-резьбообрабатывающих станков. ЦБТИ, М.:1968, 75 с.
2. Левашов А.В. Основы расчёта точности кинематических цепей металлорежущих станков. М.: Изд. Машиностроение, 1966, 212с.
3. Охрименко К.Я., Манзюра А.В., К. Eichhorn (К.К. Охрименко). Исследование оценки точности кинематической цепи станка при нарезании винтовых поверхностей постоянного шага. К.: Вісник інженерної академії України №2, 2011, С.245-250.
4. Ohrimenko K.Y., Eichhorn K.K., Manziura O.V. Simulation modelling of accumulated error of discrete drive kinematic chain. The fourth world congress "Aviation in the XXI-st century" – 2010, C.15.1-15.4.

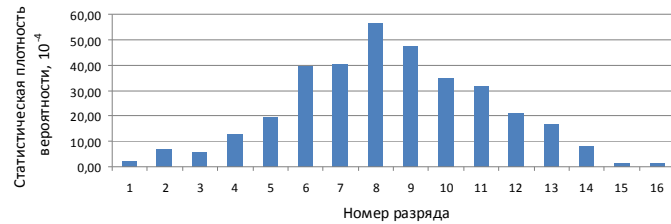


Рис. 5. Область рассеивания значений накопленной погрешности в соответствии с плотностью вероятности.

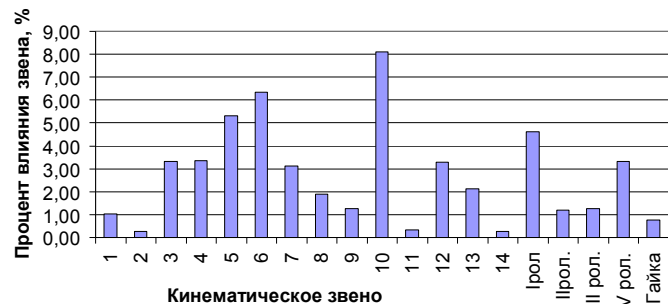


Рис. 6. Удельное влияние на суммарную погрешность каждой группы кинематической цепи.