

8. Данилов, В. А. Анализ и реализация схем обработки некруглых поверхностей / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий // Республиканский межведомственный сб. научных трудов «Машиностроение», 2007. – Вып. 23. – С. 173–177.

9. Станок для точения профильных деталей: полез. модель ВУ4540 / В. А. Данилов, А. Н. Селицкий; УО «Полоцкий государственный университет» Заявл. 2008.01.08. № u20080004.

Поступила 14.04.2020

УДК 621.002

Кане М.М., Загорская Н.Б.

## АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЁН ПОСЛЕ ИХ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*В статье показана актуальность анализа фактических взаимосвязей показателей точности цилиндрических шестерён после различных операций обработки зубьев. В основе ГОСТ 1643–81, нормирующего требования к точности цилиндрических зубчатых передач, лежат взаимосвязи между основными показателями точности зубьев. Они учитывают некоторые закономерности зубонарезания и контроля зубьев. Однако в реальных производственных условиях эти закономерности могут изменяться с совершенствованием средств обработки и контроля зубьев, под влиянием различных факторов при обработке зубьев. Нами выполнено исследование указанных взаимосвязей в различных условиях обработки зубьев с применением корреляционного анализа. Выполнено ранжирование рассмотренных 17 показателей точности зубьев по силе связности между ними. Полученные результаты будут способствовать совершенствованию производства цилиндрических шестерён.*

**Введение.** Зависимости между допусками зубьев цилиндрических шестерён, лежащие в основе ГОСТ 1643–81[1], были впервые сформулированы в 1956 году в первой редакции данного стандарта. Затем они были уточнены во второй редакции 1972 года и сохранены в действующей редакции 1981 года. Эти зависимости [2] позволили соблюсти принципиально верные соотношения между допусками на различные показатели точности зубьев, но не дают полной картины взаимосвязей между этими показателями после различных методов обработки. Это вызвано следующими причинами.

1. Имеющиеся зависимости охватывают ограниченное число показателей точности и действуют в основном внутри отдельных норм точности.

2. Фактические значения показателей точности зубьев при их обработке формируются под влиянием большого числа факторов и являются случайными величинами. Для анализа взаимосвязей между ними следует использовать также и статистические методы.

3. Совершенствование средств производства изменяет степень проявления элементных показателей точности зубьев шестерён в их комплексных показателях. Поэтому принятые сейчас базовые взаимосвязи между показателями точности зубьев [2] должны периодически пересматриваться. Это положение нашло своё подтверждение в том, что зависимости, положенные в основу ГОСТ 1643–56 и ГОСТ 1643–72 (81), отличаются друг от друга.

4. В настоящее время отсутствует информация о степени важности тех или иных показателей в общей системе показателей точности зубьев цилиндрических шестерён. Эта система включает 34 показателя [1] и информация о роли каждого из них необходима при выборе контрольного комплекса при изготовлении различных видов шестерён.

**Задачи исследования.** Исходя из сказанного, нами были поставлены следующие задачи исследования:

1. Предложить методику изучения взаимосвязей между показателями точности цилиндрических шестерён после их зубофрезерования.

2. Выполнить данное исследование для различных условий зубофрезерования цилиндрических шестерён.

3. Оценить степень тесноты взаимосвязей между различными показателями точности шестерён, произвести ранжирование рассмотренных показателей по силе связности между ними.

**Методика, условия и результаты исследования.** В общем случае для полной характеристики системы случайных величин необходимо знать законы их распределения и структуру их взаимосвязей. Результаты выполненного нами исследования законов распределения значений различных показателей точности цилиндрических шестерён представлены в работе [3].

Наиболее полную картину взаимосвязей внутри  $n$ -мерной системы случайных величин можно получить с помощью квадратных матриц  $\|r_{x_i x_j}\|^n$  и  $\|r'_{x_i x_j}\|^n$   $n$ -го порядка парных  $r_{x_i x_j}$  и частных  $r'_{x_i x_j}$  коэффициентов корреляции. Каждый элемент матрицы представляет собой коэффициент корреляции  $r_{x_i x_j}$  или  $r'_{x_i x_j}$  между фактическими значениями показателей точности зубьев  $x_i$  и  $x_j$  в партии колёс, причём  $i \neq j$ .

Коэффициент парной корреляции  $r_{x_i x_j}$  характеризует, как известно, тесноту линейной связи между двумя случайными величинами в данных условиях. Частный коэффициент парной корреляции  $r'_{x_i x_j}$  представляет собой меру тесноты линейной связи двух случайных величин при условии постоянства остальных случайных величин, т. е. он оценивает истинную тесноту связи двух величин в данной совокупности, очищенную от влияния других переменных.

Для сбора экспериментального статистического материала, необходимого для расчёта указанных показателей, нами было обработано и измерено 15 партий цилиндрических зубчатых колёс в производственных условиях Минского завода шестерён и Минского тракторного завода и 5 партий цилиндрических зубчатых колёс в лабораторных условиях завода «Вистан». В лабораторных условиях использовались новые зубофрезерные станки, изготовленные на заводе «Вистан». Объектами исследования являлись зубчатые колёса  $m = 3-5$  мм, с наружным диаметром 70–200 мм, изготовленные из сталей 25ХГТ, 18ХГТ. Обработка выполнялась чаще всего на полуавтоматах мод.5В312. Объём партии составлял обычно 50 шт. Обработка каждой партии производилась на одном станке в одинаковых условиях, при постоянных режимах резания, одним инструментом при постоянной его настройке за период его стойкости. Анализ подверглись взаимосвязи между 14 показателями точности зубьев согласно ГОСТ 1643–81 ( $F'_i, F_p, F''_i, F_r, F_{vw}, f'_i, f_{pt}, f''_i, f_f, +f_{pb}, -f_{pb}, F_{\beta}, +E_{\alpha''s}, -E_{\alpha''i}$ ), а также тремя показателями точности базовых поверхностей шестерён ( $E_T, \Delta D, E_r$ ). Здесь  $E_T$  – биение базового при зубонарезании торца шестерни;  $\Delta D$  – зазор при зубонарезании в сопряжении

отверстие колеса – оправка приспособления, характеризует точность посадочного отверстия колеса;  $E_r$  – радиальное биение наружной поверхности заготовки колеса.

Для оценки значимости выборочных коэффициентов корреляции мы воспользовались таблицей квантилей распределения выборочного коэффициента корреляции  $r_{1-p/2}$  [4]. Если найденный коэффициент корреляции удовлетворяет неравенству

$$|r_{x_i x_j}| > r_{1-p/2},$$

то он является значимым, т.е. нужно признать, что между изучаемыми параметрами  $x_i$  и  $x_j$  существует корреляционная связь. При  $n = 50$ ,  $p = 0,05$  (здесь  $n$  – число деталей в партии,  $p$  – уровень значимости)  $r_{1-p/2} = 0,273$ . Т.е. при соблюдении неравенства  $|r_{x_i x_j}| > 0,273$  мы с достоверностью 95 % можем утверждать, что между факторами  $x_i$  и  $x_j$  имеется корреляционная связь, а  $r_{x_i x_j}$  или  $r'_{x_i x_j}$  значимо характеризуют её тесноту.

В табл.1 в верхней правой части приведена полуматрица значений  $\overline{r_{x_i x_j}}$ , а в нижней левой части – значений  $\overline{r'_{x_i x_j}}$  для рассмотренных показателей точности цилиндрических зубчатых колёс после их зубофрезерования в производственных условиях. Причём каждое значение  $\overline{r_{x_i x_j}}$  и  $\overline{r'_{x_i x_j}}$  представляет собой среднее арифметическое для всех рассчитанных для данных показателей точности значений  $r_{x_i x_j}$  и  $r'_{x_i x_j}$  по всем обработанным и измеренным партиям шестерён.

Используя методику решения задачи о «лидере», предложенную в теории графов [5,6], с помощью полученных данных нами было выполнено ранжирование рассмотренных показателей точности цилиндрических шестерён по силе связности каждого показателя с другими показателями. Заменяя значимые коэффициенты корреляции в корреляционной матрице единицами, а незначимые – нулями, преобразованную таким образом  $r$  – матрицу, состоящую из нулей и единиц, можно рассматривать как матрицу смежности. Сила взаимодействия данного параметра с остальными, его роль в изучаемой системе показателей оцениваются этим методом по величине итерированной силы, равной сумме коэффициентов корреляции всех остальных параметров с данным.

Для решения указанной задачи нами были рассчитаны по матрицам парных  $\overline{r_{x_i x_j}}$  и частных  $\overline{r'_{x_i x_j}}$  коэффициентов корреляции рассмотренных показателей точности цилиндрических зубчатых колёс после зубофрезерования в производственных и лабораторных условиях итерированные силы до третьего порядка (табл. 2). Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие основные выводы.

**Выводы.** 1. Большинство исследованных показателей точности зубчатых колёс для рассмотренных условий зубофрезерования в той или иной степени взаимосвязаны. Однако существенными являются, как правило, взаимосвязи либо внутри одной нормы точности, либо между показателями из разных норм точности, но связанных методикой измерения (например,  $F'_i$  и  $f'_i$ ,  $F''_i$  и  $f''_i$ ,  $F_p$  и  $f_{pt}$  и др.), либо между показателями, связанными косвенно вследствие зависимости от какого-то общего для них показателя точности. Так, взаимосвязи между  $F'_i$  и  $f_{pt}$ ,  $f_f$  можно объяснить зависимостью указанных показателей точности от  $f'_i$ . Последний вид взаимосвязи между показателями

точности выявляется при сопоставлении соответствующих значений парных  $r_{x_i x_j}$  и частных  $r'_{x_i x_j}$  коэффициентов корреляции. При наличии такой косвенной взаимосвязи существенному значению  $r_{x_i x_j}$  соответствует несущественное значение  $r'_{x_i x_j}$ .

2. В производственных условиях степень тесноты взаимосвязи между показателями точности в основном меньше, чем в лабораторных условиях. Однако число существенных взаимосвязей больше, чем в лабораторных условиях. Это объясняется тем, что в производственных условиях вследствие меньшей жёсткости и точности технологических систем зубофрезерных станков по сравнению с лабораторными условиями на взаимосвязи между показателями точности влияет большее число факторов и между большим числом показателей точности имеются косвенные связи.

3. Показатели точности базовых поверхностей шестерён ( $E_T$ ,  $\Delta D$ ,  $E_r$ ) не взаимосвязаны между собой и в то же время достаточно тесно связаны (за исключением  $E_r$ ) с показателями кинематической точности, точности контакта зубьев и бокового зазора. Это создаёт предпосылки для управления значениями указанных показателей точности зубьев путём оптимизации требований к  $E_T$  и  $\Delta D$  перед зубонарезанием. Значения  $E_r$  практически не влияют на показатели точности зубьев при зубофрезеровании на настроенных станках. Поэтому этот показатель не нуждается в контроле перед зубонарезанием в указанных условиях.

4. Анализ результатов ранжирования показателей точности цилиндрических зубчатых колёс после их зубофрезерования позволяет выявить показатели, наиболее тесно связанные с остальными. Контроль этих показателей позволяет получить больше информации о точности колеса в целом. Среди показателей кинематической точности наиболее информативными являются  $F_i$ ,  $F_i''$ ,  $F_p$ , среди показателей плавности –  $f_i'$ ,  $f_{pi}$ ,  $f_i''$ ,  $f_{pb}$ , среди показателей контакта зубьев –  $F_\beta$ .

**Таблица 1 – Матрица парных  $r_{x_i, x_j}$  и частных  $r'_{x_i, x_j}$  коэффициентов корреляции между 17 показателями точности цилиндрических зубчатых колёс после зубофрезерования в производственных условиях**

№ п/п	Показат. точности	$F_i'$	$F_p$	$F_i''$	$F_r$	$F_{vw}$	$f_i'$	$f_{pt}$	$f_i''$	$ff$	$+f_{pb}$	$-f_{pb}$	$F_\beta$	$+E_a''s$	$-E_a''i$	$E_T$	$\Delta D$	$E_r$	
1	$F_i'$	1																	
2	$F_p$		0,604	0,482	0,712	0,352	0,515	0,341	0,237	0,284	0,307	0,282	0,218	0,289	0,247	0,344	0,418	0,242	
3	$F_i''$			0,532	0,482	0,295	0,282	0,618	0,234	0,215	0,178	0,118	0,186	0,410	0,180	0,370	0,462	0,286	
4	$F_r$				0,614	0,239	0,325	0,288	0,516	0,224	0,216	0,160	0,318	0,546	0,583	0,385	0,422	0,261	
5	$F_{vw}$					0,173	0,344	0,256	0,236	0,168	0,177	0,185	0,273	0,264	0,229	0,330	0,381	0,260	
6	$f_i'$				0,212			0,202	0,197	0,266	0,188	0,165	0,130	0,231	0,251	0,194	0,181	0,116	
7	$f_{pt}$				0,078	0,185	0,295		0,285	0,321	0,298	0,204	0,158	0,251	0,155	0,244	0,268	0,134	
8	$f_i''$				0,218	0,227	0,341	0,185		0,305	0,334	0,292	0,156	0,249	0,240	0,236	0,299	0,187	
9	$ff$				0,128	0,157	0,542	0,315	0,287		0,427	0,347	0,210	0,050	0,060	0,165	0,181	0,128	
10	$+f_{pb}$				0,131	0,178	0,523	0,306	0,317	0,448		0,018	0,117	0,094	0,147	0,218	0,185	0,176	
11	$-f_{pb}$				0,120	0,241	0,503	0,298	0,308	-0,30	0,528		0,104	0,085	0,263	0,173	0,107	0,078	
12	$F_\beta$				0,218	0,230	0,254	0,121	0,172	0,157	0,085	0,080		0,211	-0,25	0,541	0,322	0,236	
13	$+E_a''s$				0,215	0,167	0,121	0,154	0,268	0,071	0,125	0,068	0,102		0,631	0,299	0,315	0,243	
14	$-E_a''i$				-0,12	-0,12	0,104	0,105	0,238	-0,11	0,103	0,205	0,188	0,918		0,304	0,294	0,198	
15	$E_T$				0,297	0,220	0,184	0,251	0,252	0,143	0,203	0,124	0,511	0,286	0,190		0,194	0,170	
16	$\Delta D$				0,361	0,229	0,194	0,267	0,233	0,197	0,200	0,091	0,300	0,299	0,198	0,182		0,113	
17	$E_r$				0,154	0,145	0,121	0,114	0,185	0,112	0,127	0,080	0,116	0,167	0,200	0,188	0,146		

**Таблица 2 – Результаты расчёта итерированных сил и ранжирования показателей точности цилиндрических зубчатых колёс по-сле зубофрезерования в производственных и лабораторных условиях**

№ п/п	Характеристики взаимосвязи между показателями точности зубчатых колёс	Условия зубо-обработки	Характеристики ранжирова-ния показателей точности зубчатых колёс	Показатели точности цилиндрических зубчатых колёс								
				$F_i'$	$F_p$	$F_i''$	$F_r$	$F_{\text{нв}}$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9				
1	Ранжирование по коэффициентам парной корреляции	Производ-ственные	Итерированная сила третьего порядка Р3	974	802	919	676	227				
2			Распределение показателей точности по величине Р3	1	4	2	6	16				
3		Лабораторные	Итерированная сила третьего порядка Р3	-	598	569	572	91				
4			Распределение показателей точности по величине Р3	-	1	4	3	14				
5	Ранжирование по коэффициентам частной корреляции	Производ-ственные	Итерированная сила третьего порядка Р3	420	391	390	301	73				
6			Распределение показателей точности по величине Р3	1	2	3	8	16				
7		Лабораторные	Итерированная сила третьего порядка Р3	-	254	310	310	1				
99998			Распределение показателей точности по величине Р	-	4	1	2	15				
Показатели точности цилиндрических зубчатых колёс												
№ п/п	$f_i'$	$f_{pt}$	$f_i''$	$ff$	$+f_{pb}$	$-f_{pb}$	$F_{\beta}$	$+E_a's$	$-E_a't$	$E_T$	$\Delta D$	$E_r$
1	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	889	671	611	529	529	452	375	553	291	550	779	103
2	3	7	8	11	12	13	14	9	15	10	5	17
3	-	535	567	246	254	254	241	539	322	530	576	91
4	-	7	5	12	10	11	13	6	9	8	2	15
5	329	276	285	267	380	329	100	190	106	238	310	1
6	6	10	9	11	4	5	15	13	14	12	7	17
7	-	205	263	163	163	163	82	193	156	187	224	51
8	-	6	3	9	10	11	13	7	12	8	5	14

5. Результаты ранжирования показателей точности цилиндрических зубчатых колёс после зубофрезерования в производственных и лабораторных условиях по матрицам парных и частных коэффициентов корреляции имеют некоторые особенности, часть которых описана выше, однако существенно не отличаются друг от друга.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1643–81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Госстандарт СССР. М. 1981.
2. Тайц, Б. А. Точность и контроль зубчатых колёс. / Б. А. Тайц. М., «Машиностроение», 1972.
3. Кане, М. М. Характеристики процессов зубонарезания цилиндрических шестерён как случайных. / М. М. Кане//Машиностроение. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск, БНТУ, 2019. С. 54–62
4. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений/ Е. И. Пустыльник. М., Изд-во «Наука», 1968.
5. Берж, К. Теория графов и её применения. / К. Берж. Пер. с французск.. М.: Издат. иностран. литературы. 1962
6. Основы исследований и изобретательства в машиностроении: практикум: учебное пособие / М. М. Кане [и др.]; под ред. М.М. Кане.-Минск: Вышэйшая школа, 2020.

*Поступила 15.06.2020*

**УДК 621.793**

**Леванцевич М.А.<sup>1</sup>, Сокоров И.О.<sup>2</sup>, Ванюк Э.А.<sup>3</sup>**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ГАЗОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОУГЛЕРОДАМИ НА ОСНОВЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ ЧЕРНИ**

**1. ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»**

**2. УО «Республиканский институт профессионального образования»**

**3. Белорусский национальный технический университет**

**Минск, Беларусь**

*В статье приведены результаты исследований коэффициента трения композиционных газотермических покрытий, модифицированных добавками фуллереновой черни до 10 % от объема порошкового материала. Технология формирования покрытий: газопламенное напыление с последующим оплавлением и финишная механическая обработка образцов для испытаний*

**Введение.** Проблема кардинального повышения ресурса узлов трения машин и механизмов предопределяет необходимость изыскания все более эффективных путей ее решения. Перспективным в этом направлении является применение упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование поверхностей трения с заданным комплексом эксплуатационных свойств различными технологическими методами, в том числе и путем нанесения антифрикционных покрытий [1].

В последние годы, в связи с бурным развитием нанотехнологий, наибольший интерес стали представлять композиционные покрытия, содержащие в матричном мате-