

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСТЕПЕННЫХ ПОПЛАВКОВЫХ ГИРОСКОПОВ

Б. Л. ШАРЫГИН

*Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», 197046, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bsharyginbsharygin@outlook.com*

Представлены результаты применения корреляционного и дисперсионного анализа при исследовании проблем, возникающих при мелкосерийном производстве двухступенных поплавковых гироскопов (ДПГ). Приведены примеры использования регрессионного анализа при исследовании некоторых типов гироскопов, в том числе волоконно-оптического гироскопа. Построена линейная регрессионная модель точностной характеристики горизонтирующего ДПГ. Методом расширения входных переменных получена корректная регрессионная модель с использованием фактора FD, тока трения, динамической балансировки и дисперсии скорости ухода гироскопа на заключительных этапах термоциклирования. Проведен сравнительный анализ полученных регрессионных моделей. Продемонстрирована возможность повышения точности регрессионных оценок, при этом достаточно использования четырех независимых переменных.

Ключевые слова: *двухступенной поплавокый гироскоп, система инерциальной навигации и стабилизации, гравиметр, точность, надежность, регрессионный анализ, отказ, регрессионная модель*

Введение. Статистические методы исследований установления связей между величинами, такие как корреляционный, дисперсионный и регрессионный анализ, широко используются во многих областях науки и техники. Для указанных типов анализа, вследствие их тесной взаимосвязи, принят общий термин „регрессионный анализ“ [1].

В работах [2, 3] представлены первые результаты применения корреляционного и дисперсионного анализа при исследовании проблем, возникающих в мелкосерийном производстве двухступенных поплавковых гироскопов (ДПГ) в ЦНИИ „Электроприбор“. Корреляционный анализ позволяет сформировать количественную и качественную оценки степени неслучайности совместного изменения ряда исследуемых параметров ДПГ. Применение скользящего коэффициента корреляции при последовательной выборке гироскопов выявило изменение роли главного признака, определяющего точность прибора. Анализ множественной корреляции показал, что точность азимутальных ДПГ в первую очередь зависит от фактора FD и результатов термоциклирования поплавкового гироскопа. Метод однофакторного дисперсионного анализа использован при исследовании влияния профессионализма слесаря-сборщика гироскопов (ГМ) на фактор FD гироскопа. Результаты однофакторного дисперсионного анализа подтвердили существенное влияние плавки заготовок роторов на магнитную энергию готовых деталей. Двухфакторный дисперсионный анализ позволил установить отсутствие влияния типа компаунда и квалификации слесаря-сборщика ГМ на фактор FD гироскопа, а также отсутствие значимого взаимодействия этих двух факторов.

Совместное использование корреляционного и дисперсионного анализа однозначно подтвердило существенное влияние плавки заготовок роторов ГМ на их результирующие магнитные характеристики. Выявлено влияние плавки роторов на точностные и надежность характеристики гироскопов.

Опыт использования регрессионных моделей в гироскопии. Используя полученные в работах [2, 3] результаты, можно перейти к заключительному этапу — регрессионному анализу, активно применяемому в настоящее время в гироскопии [4, 5]. В работе [4] были решены следующие задачи:

— исследование случайных составляющих погрешности сигнала волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) и их классификация с целью дальнейшего учета в математической модели ВОГ;

— поиск оптимального метода регрессионного анализа для описания шумов ВОГ;

— оценка достоверности полученных параметров регрессионной модели.

Цель представленных в работе [4] исследований — изучение источников случайных составляющих погрешности чувствительных элементов и определение потенциальной точности ВОГ, а также методов оптимальной фильтрации измерительной информации для бесплатформенного инерциального блока на базе ВОГ.

В работе [5] представлены данные по коррекции дрейфа микромеханических гироскопов. Повышение точности их пространственной ориентации производится за счет коррекции дрейфа с помощью данных спутниковой навигационной системы. При этом по данным бортового приемника с помощью метода регрессионного анализа строится трехмерный вектор движения объекта и, при обнаружении участка прямолинейного движения, производится коррекция показаний гироскопа по углам рыскания и тангажа путем приведения их к угловым координатам текущего вектора движения.

Регрессионная модель точностных характеристик горизонтирующих ДПГ. Горизонтирующий гироскоп (ДПГ-06) совместно с азимутальным гироскопом Е32-148 является информационной основой системы инерциальной навигации и стабилизации (СИНС) „Ладога-М“ [6, 7]. С использованием таких же гироскопов строится и гировертикаль мобильных гравиметров типа „Чекан-АМ“ [8, 9]. Начальное требование по нестабильности скорости ухода для ДПГ-06 — не более 0,002 °/час. Для подводных комплектаций СИНС и мобильных гравиметров в дальнейшем появились соответственно приборы 1-го и 3-го классов. На сегодня изготовлено более 200 СИНС и более 60 гравиметров.

Реальная эксплуатация СИНС и гравиметров подтверждает заложенные в них характеристики, в том числе точностные и надежные. Однако, наряду с положительными результатами эксплуатации, периодически выявляются проблемы, связанные с фактической надежностью некоторых изготовленных образцов гироскопов. Несмотря на, как правило, безотказную непрерывную работу ДПГ в составе различных СИНС имеются случаи отказов на более ранних этапах эксплуатации. Именно это обстоятельство приводит к необходимости проводить тщательный анализ нестандартных ситуаций и искать пути их предотвращения в будущем. При этом установлено, что основные причины отказов ДПГ — производственные, а также отказы покупных комплектующих изделий (вызванные, например, сменой поставщиков, качеством комплектующих и материалов, нестабильностью технологических процессов, старением оборудования и т.д.).

В соответствии с конструкторской документацией основной точностной характеристикой горизонтирующего ДПГ-06 является нестабильность скорости ухода гироскопа в пуске (НСУ), которая определяется как максимальное отклонение скорости ухода от ее среднего значения. Для каждого изготовленного прибора проводится три зачетных пуска в рамках предъявительских и приемосдаточных испытаний. Результаты пусков заносятся в соответствующие таблицы с сохранением файлов в электронном виде. В настоящей статье точность гироскопа будем оценивать с помощью среднего значения НСУ ($\delta\omega$) в трех зачетных пусках.

Горизонтирующий ДПГ-06 и азимутальный гироскоп Е32-148 имеют унифицированную поплавковую камеру (ПК), одинаковые датчики угла и датчики момента, но отличаются диаметром прецизионных камневых опор и наличием электростатического подвеса у азимутального гироскопа. Естественно, эти гироскопы имеют разную рабочую ориентацию при установке в центральный гироскопический прибор. Учитывая вышеизложенное, сократим количество независимых переменных для корреляционного анализа по сравнению с принятыми в работе [2] и оставим только следующие параметры:

- динамический дисбаланс ротора (A);
- фактор FD;
- дисперсия тока обратной связи на заключительных этапах термоциклирования $D_{I_{oc}}$;
- максимальный ток трения в ориентациях 1 и 2 ($I_{тр\ max}$).

Дополним перечень независимых переменных, включив основные магнитные характеристики готового ротора :

- коэрцитивная сила (H_c);
- остаточная магнитная индукция (B_r);
- магнитная энергия.

Очевидно, что все перечисленные параметры являются метрическими переменными. Параметр „фактор FD“ представляет собой суммарный угол поворота балансировочных грузов поплавковой камеры при ее окончательной балансировке по крену в составе гироскопа. Токи трения характеризуют зоны невозврата тока обратной связи из-за гистерезиса контактного момента трения на оси прецессии ПК гироскопа.

Для формирования регрессионной модели выберем приборы ДПГ-06, в которые были установлены роторы 2017 г. изготовления из трех партий заготовок. Такой выбор связан с тем, что поставка этих первых партий заготовок сопровождалась протоколами химического состава, анализ которого проводился заводской лабораторией поставщика. Для всех забракованных роторов из этих партий на электронном микроскопе определялся элементный состав сплава и исследовались выявленные дефекты и сульфидные включения на поверхности детали. Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе MIRA (Tescan) с детекторами трех типов: SE-детектор, BSE-детектор и детектор характеристического рентгеновского излучения Silicon Drift Detector (SDD). Детектор последнего типа обеспечивал локальность от 0,5 до 4 мкм с пределом обнаружения от 0,1 мас. % при толщине анализируемой области порядка 1,5 мкм [10, 11]. Перечисленные факторы позволяют считать выборку гироскопов репрезентативной.

Для создания линейной регрессионной модели используем шаговый регрессионный метод [1], при котором переменные вводятся в уравнение по очереди до тех пор, пока уравнение не станет удовлетворительным, а модель корректной. Порядок введения переменных определяется с помощью частных коэффициентов корреляции (r_{xy}) как меры значимости переменных. Для 17 приборов был проведен корреляционный анализ точностной характеристики гироскопов с параметрами, перечисленными выше. Упорядоченные по значению коэффициента r_{xy} результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Независимый параметр	r_{xy}	Степень связи
FD	0,611	Заметная
$I_{тр\ max}$	0,429	Умеренная
A	0,292	Слабая
$D_{I_{oc}}$	0,197	Слабая
B_r	0,164	Слабая
H_c	0,151	Слабая

Степень связи назначена в соответствии со шкалой Чеддока [12].

Для построения первой линейной регрессионной модели выбираем переменную FD, которая имеет максимальное значение коэффициента корреляции $r_{xy} = 0,611$ относительно НСУ. Исходные данные для регрессионного анализа представлены в табл. 2

Таблица 2

Номер прибора	$\delta\omega$	FD	$I_{\text{тр max}}$	A	$D_{I_{\text{ос}}}$
1	0,0018	559	0,48	0,01	90
2	0,0018	384	0,53	0,008	712
3	0,0017	280	0,26	0,004	76
4	0,00173	370	0,63	0,002	133
5	0,00173	500	0,11	0,008	44
6	0,00157	242	0,14	0,004	550
7	0,00177	982	0,16	0,004	589
8	0,00187	529	0,81	0,002	97
9	0,00173	703	0,31	0,006	41,3
10	0,0015	0	0,35	0,002	28
11	0,0019	730	0,18	0,004	40,3
12	0,00163	114	0,28	0,002	336
13	0,00173	121	0,64	0,006	296,3
14	0,00167	647	0,71	0	105,3
15	0,0019	540	1,3	0,004	853
16	0,00173	370	0,62	0,002	133
17	0,00173	280	0,7	0,004	76

Примечание. Здесь и далее используемые параметры безразмерные, так как размерность не влияет на значение коэффициента корреляции.

Дальнейшие расчеты выполнялись в программе Microsoft Excel, в состав которой входят средства анализа данных, используемые для решения сложных статистических и инженерных задач [13—15]. Применим макрофункцию „регрессия“ этой программы с использованием первого фактора FD. Скриншот результатов представлен на рис. 1.

The screenshot shows the 'Data Analysis' toolpak results in Excel. The 'Regression Statistics' section includes: Multiple R (0,609), R-squared (0,371), Adjusted R-squared (0,329), Standard Error (0,0001), and Observations (17). The 'ANOVA' table is as follows:

	df	SS	MS	F	Significance F
Регрессия	1	6,73E-08	6,73E-08	8,855	0,00943
Остаток	15	1,14E-07	7,61E-09		
Итого	16	1,81E-07			

The 'Coefficients' section shows the following values:

	Коэф-ты	Стан. ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%
Y-пересечение	0,00162	4,28E-05	3,80E+01	2,52E-16	0,00153
FD	2,6E-07	8,59E-08	2,98E+00	9,43E-03	0,0000001

Рис. 1

Оценим полученную регрессионную модель, используя соответствующие показатели. Коэффициент детерминации R-квадрат (мера определенности) характеризует качество построения регрессионной прямой, которое выражается степенью соответствия исходных дан-

ных и регрессионной модели. В рассматриваемом случае мера определенности равна 0,371, что говорит о неудовлетворительной „доводке“ регрессионной прямой относительно исходных данных. Расчетные параметры модели всего на 37,1 % отражают зависимость между исследуемыми величинами (НСУ и FD). Коэффициент множественной корреляции R равен 0,609 и выражает степень зависимости между независимыми (X) и зависимой (Y) переменными. Критерий, определяющий соотношение оценок межгрупповой (SS) и внутригрупповой (MS) дисперсий, выражается параметром F , равным 8,855. „Значимость F^c — это пороговое значение критерия F для принятия решения о нулевой гипотезе. Так как $F = 8,855 > „значимости $F^c = 0,00943$, то подтверждается гипотеза H_1 о существенном влиянии исследуемого фактора (фактор FD) на точностную характеристику горизонтирующего гироскопа.$

Линейное регрессионное уравнение имеет вид

$$\delta\omega(\text{FD}) = 0,00162 + 0,00000026 \cdot \text{FD}. \quad (1)$$

Коэффициент 0,00162 равен полученному значению НСУ в исследуемой выборке гироскопов при нулевом значении предиктора. Подчеркнем, что это значение $\delta\omega$ формируется за счет влияния других предикторов, отсутствующих в модели (1). Коэффициент 0,00000026 отражает влияние предиктора FD на точностную характеристику: степень влияния очень низкая и даже при $\text{FD} = 1000$ итоговое значение $\delta\omega$ возрастет всего на 0,0001.

Далее, вводим в модель второй предиктор $I_{\text{тр max}}$ с частным коэффициентом $r_{xy} = 0,429$. Применив аналогичную первой модели процедуру, получим результат, отображенный на рис. 2.

Регрессионная статистика						
Множественный R	0,756					
R-квадрат	0,571					
Норм. R-квадрат	0,510					
Стан. ошибка	0,0001					
Наблюдения	17					
Дисперсионный анализ						
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>	
Регрессия	2	1,04E-07	5,18E-08	9,33E+00	2,66E-03	
Остаток	14	7,78E-08	5,56E-09			
Итого	16	1,81E-07				
	<i>Коэф-ты</i>	<i>Стан. ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	
Y-пересечение	0,00155	0,0000476	32,510	0,0000000	0,00144	
FD	0,0000003	0,0000001	3,585	0,00299	0,0000001	
I _{тр max}	0,000154	0,0000603	2,556	0,0229	0,0000248	

Рис. 2

Новое линейное регрессионное уравнение имеет следующий вид:

$$\delta\omega(\text{FD}, I_{\text{тр max}}) = 0,00155 + 0,0000003 \cdot \text{FD} + 0,000154 \cdot I_{\text{тр max}}. \quad (2)$$

Значение коэффициента R-квадрат возросло до 0,571. Регрессионная модель приближена к удовлетворительной. С учетом в модели второго предиктора значение коэффициента Y-пересечения снизилось, по сравнению с первой моделью, до 0,00155. Влияние первого предиктора практически не изменилось.

Делаем очередной шаг и добавляем третью переменную A (рис. 3).

Вывод итогов						
Регрессионная статистика						
Множественный R	0,817					
R-квадрат	0,668					
Норм. R-квадрат	0,591					
Стан. ошибка	0,0001					
Наблюдения	17					
Дисперсионный анализ						
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>	
Регрессия	3	1,21E-07	4,04E-08	8,71E+00	1,98E-03	
Остаток	13	6,03E-08	4,63E-09			
Итого	16	1,81E-07				
	<i>Козф-ты</i>	<i>Стан. ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	
Y-пересечение	0,00149	0,0000529	28,110	0,0000000	0,00137	
FD	0,0000002	0,0000001	3,639	0,00300	0,000000	
Iтрm	0,000177	0,0000563	3,147	0,00772	0,000056	
ДБm	0,0130	0,00667	1,945	0,07374	-0,00144	

Рис. 3

Очередное регрессионное уравнение имеет вид

$$\delta\omega(FD, I_{тр \max}, A) = 0,00149 + 0,000000246 \cdot FD + 0,000177 \cdot I_{тр \max} + 0,013 \cdot A. \quad (3)$$

Значение коэффициента R-квадрат возросло с 0,571 до 0,668. Модель становится удовлетворительной.

Добавляем четвертый предиктор $D_{I_{oc}}$ и повторяем процедуру формирования показателей регрессионной модели (рис. 4).

Вывод итогов						
Регрессионная статистика						
Множественный R	0,819					
R-квадрат	0,670					
Норм. R-квадрат	0,560					
Стан. ошибка	0,000					
Наблюдения	17					
Дисперсионный анализ						
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>	
Регрессия	4	1,22E-07	3,04E-08	6,10E+00	6,46E-03	
Остаток	12	5,98E-08	4,99E-09			
Итого	16	1,81E-07				
	<i>Козф-ты</i>	<i>Стан. ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	
Y-пересечение	0,00149	5,49E-05	2,71E+01	3,92E-12	0,00137	
FD	2,48E-07	7,05E-08	3,52E+00	4,22E-03	0,0000001	
Iтрm	0,000183	6,19E-05	2,96E+00	1,19E-02	0,0000484	
ДБm	0,0134	7,05E-03	1,90E+00	8,22E-02	-0,00199	
D5-7	-2,07E-08	7,11E-08	-2,91E-01	7,76E-01	-0,0000002	

Рис. 4

В результате линейная регрессионная модель (PM) с четырьмя предикторами описывается выражением

$$PM(FD, I_{тр \max}, A, D_{I_{oc}}) = 0,00149 + 2,48 \cdot 10^{-7} \cdot FD + 0,000183 \cdot I_{тр \max} + 0,0134 \cdot A - 2,07 \cdot 10^{-8} \cdot D_{I_{oc}}. \quad (4)$$

Сравнение регрессионных моделей. Для сравнения полученных регрессионных моделей составим табл. 3, в которую включен ряд показателей для четырех вариантов РМ.

Таблица 3

Показатель	Вариант РМ			
	1	2	3	4
R -квадрат	0,371	0,571	0,668	0,67
F и „значимость F^c “	8,85 >> 0,00943	9,33 >> 0,00266	8,71 >> 0,00198	6,10 >> 0,00646
Y -пересечение	0,00162	0,00155	0,00149	0,00149
FD	$2,56 \cdot 10^{-7}$	$2,64 \cdot 10^{-7}$	$2,46 \cdot 10^{-7}$	$2,48 \cdot 10^{-7}$
$I_{\text{тр max}}$	—	0,000154	0,000177	0,000183
A	—	—	0,0130	0,0134
$D_{I_{\text{oc}}}$	—	—	—	$-2,07 \cdot 10^{-8}$

Анализ таблицы позволяет сделать следующие выводы:

— введение четвертого предиктора обеспечило корректность линейной регрессионной модели;

— увеличение числа предикторов практически не влияет на соотношение критерия F и „значимости F^c “;

— введение четвертого предиктора привело к предельному значению Y -пересечения — 0,00149: повышение точности ДПП по реализуемой технологии исследуемых приборов невозможно;

— введение новых предикторов практически не влияет на значения коэффициентов при уже использованных предикторах;

— все коэффициенты модели положительные, за исключением коэффициента при $D_{I_{\text{oc}}}$.

Этими же данными подтверждаются известные особенности регрессионного анализа:

— коэффициент корреляции определяет степень вариативности показателя точности, которая связана с изменением факторов (предикторов);

— корреляцию показателя точности и факторов (предикторов) нельзя трактовать как связь их уровней;

— регрессионное уравнение не обеспечивает оценку раздельного влияния каждого фактора на точностную характеристику, такая оценка возможна лишь в случае, когда все другие факторы не связаны с исследуемым;

— если анализируемый фактор связан с другими факторами, влияющими на точность, то вырабатывается смешанная характеристика влияния факторов.

Заключение. Использование регрессионного анализа позволяет построить корректные линейные регрессионные модели точностных параметров горизонтирующих двухстепенных поплавковых гироскопов.

Подтверждена возможность повышения точности регрессионных оценок с помощью известного метода расширения входных переменных: для исследуемых приборов оказалось достаточно использования четырех независимых переменных.

Определен точностный предел ДПП, изготавливаемых по действующей групповой технологии; предел соответствует гироскопам 2-го класса.

Для повышения точности необходимо выявить и устранить реальные причины снижения точности ДПП в действующей групповой технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи / Пер. с англ.; Под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Наука, 1973. Т. 2.

2. Шарыгин Б. Л. Результаты применения корреляционного анализа при исследовании проблем в мелкосерийном производстве двухступенных поплавковых гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 6. С. 551—560. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-6-551-560.
3. Шарыгин Б. Л. Дисперсионный анализ при исследовании проблем в мелкосерийном производстве двухступенных поплавковых гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 235—241. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-235-241.
4. Щербицкий Д. С., Дружинин П. В. Определение коэффициентов модели случайной погрешности волоконно-оптического гироскопа методом регрессионного анализа // Материалы 16-й конф. молодых ученых „Навигация и управление движением“. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2014.
5. Пат. 2527132 РФ. Способ коррекции дрейфа микромеханического гироскопа, используемого в системе дополненной реальности на движущемся объекте / А. Л. Горбунов, А. Ю. Зелинский, А. И. Кауров. 2014.
6. Берман З. М. и др. Система инерциальной навигации и стабилизации „Ладога-М“: Результаты разработки и испытаний // Гироскопия и навигация. 2002. № 4(39). С. 29—38.
7. Пешехонов В. Г., Миронов Ю. В., Шарыгин Б. Л. Единая система инерциальной навигации и стабилизации „Ладога-М“ // Морская радиоэлектроника. 2003. № 1(4).
8. Краснов А. А., Одинцов А. А., Семенов И. В. Система гироскопической стабилизации гравиметра // Гироскопия и навигация. 2009. № 4. С. 54—69.
9. Краснов А. А. и др. Гравиметрический датчик нового поколения // Измерительная техника. 2014. № 9. С. 12—15
10. Старцева А. В., Шарыгин Б. Л., Литуненко Е. Г. Электронный микроскоп при исследовании проблем в мелкосерийном производстве ДПГ // Сб. докл. по материалам XX конф. молодых ученых. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2018.
11. Бузык А. Я., Ковалев А. С., Старцева А. В., Шарыгин Б. Л. Электронная сканирующая микроскопия и локальный рентгеноспектральный анализ для исследования проблем изготовления элементов двухступенных поплавковых гироскопов // Сб. докл. по материалам XXXI конф. памяти Н. Н. Острякова. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2018.
12. Бахрушин В. Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // Системные технологии. 2011. Т. 73, № 2. С. 9—94.
13. Tornado 5. Два способа корреляционного анализа в Microsoft Excel [Электронный ресурс]: <<http://lumpics.ru/correlation-analysis-in-excel>>.
14. Карлберг К. Регрессионный анализ в Microsoft Excel. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2017. 400 с.
15. Яковлев В. Б. Регрессионный анализ. Расчеты в Excel и Statistika: Учеб. пособие. М.: Изд-во „Русайнс“, 2018.

Сведения об авторе

Борис Леонидович Шарыгин — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник; Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“»; главный конструктор; E-mail: bsharyginbsharygin@outlook.com

Поступила в редакцию
12.04.19 г.

Ссылка для цитирования: Шарыгин Б. Л. Регрессионная модель точностных характеристик двухступенных поплавковых гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 7. С. 659—667.

REGRESSION MODEL OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF TWO-STAGE FLOAT GYROSCOPE

B. L. Sharygin

JSC Concern CSRI “Electropribor”, 197046, St. Petersburg, Russia
E-mail: bsharyginbsharygin@outlook.com

Results of correlation and dispersion analysis applied to the study of problems arising in the small-scale production of two-stage float gyroscopes are presented. Examples of the use of regression analysis for some types of gyroscopes, including fiber-optic gyroscope, are given. A linear regression model of accu-

racy characteristic of two-stage float gyroscope is built. A correct regression model is derived by the method of input variables extension with the use of the FD-factor, friction current, dynamic balancing and dispersion of the gyro exit rate at the final stages of thermal cycling. A comparative analysis of the obtained regression models is carried out. A possibility to improve the accuracy of regression estimates is demonstrated; to realize the possibility, it is sufficient to use four independent variables.

Keywords: two-stage float gyroscope, inertial navigation and stabilization system, gravimeter, accuracy, reliability, regression analysis, failure, regression model

REFERENCES

1. Kendall M.G., Stuart A. *The Advanced Theory of Statistics, Vol. 2. Inference and Relationship*, 1964.
2. Sharygin B.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 6(62), pp. 551–560. (in Russ.)
3. Sharygin B.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 3(62), pp. 235–241. (in Russ.)
4. Shcherbitskiy D.S., Druzhinin P.V. *Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem* (Navigation and Motion Control), Proceedings of the 16th Conference of Young Scientists, St. Petersburg, 2014. (in Russ.)
5. Patent 2527132 RU, *Sposob korrektsii dreyfa mikromekhanicheskogo giroskopa, ispol'zuyemogo v sisteme dopolnennoy real'nosti na dvizhushchemsya ob'yekte* (Method for Correcting the Drift of a Micro-mechanical Gyroscope Used in the Augmented Reality System on a Moving Object), Gorbunov A.L., Zelinskiy A.Yu., Kaurov A.I., Published 2014. (in Russ.)
6. Berman Z.M. *Gyroscopy and Navigation*, 2002, no. 4(39), pp. 29–38. (in Russ.)
7. Peshekhonov V.G., Mironov Yu.V., Sharygin B.L. *Marine Radio-electronics*, 2003, no. 1(4). (in Russ.)
8. Krasnov A.A., Odintsov A.A., Semenov I.V. *Gyroscopy and Navigation*, 2009, no. 4, pp. 54–69. (in Russ.)
9. Krasnov A.A., Sokolov A.V., Starosel'tseva I.M., Elinson L.S., Evstifeev M.I., Zheleznyak L.K., Koneshov V.N. *Measurement Techniques*, 2014, no. 9(57), pp. 967–972.
10. Startseva A.V., Sharygin B.L., Litunenkov E.G. *Elektronnyy mikroskop pri issledovanii problem v melkoseriynom proizvodstve DPG* (Electron Microscope in the Study of Problems in Small-Scale Production of DPG), XX Conference of Young Scientists. St. Petersburg, 2018. (in Russ.)
11. Butsyk A.Ya., Kovalev A.S., Startseva A.V., Sharygin B.L. *XXXI konferentsiya pamyati N.N. Ostryakova* (XXXI Conference in Memory of N.N. Ostryakov), St. Petersburg, 2018. (in Russ.)
12. Bakhrushin V.E. *Journal of System technologies*, 2011, no. 2(73), pp. 9–14. (in Russ.)
13. *Tomado 5*, <http://lumpics.ru/correlation-analysis-in-excel>.
14. Carlberg C. *Regression Analysis Microsoft Excel*, 2016, 368 p. ISBN 9780789756558,
15. Yakovlev V.B. *Regressiionnyy analiz. Raschety v Excel i Statistika* (Regression Analysis. Calculations in Excel and Statistika), Moscow, 2018. (in Russ.)

Data on author

Boris L. Sharygin

— PhD, Senior Scientist; Concern CSRI “Electropribor”, JSC; Chief Designer; E-mail: bsharyginbsharygin@outlook.com

For citation: Sharygin B. L. Regression model of accuracy characteristics of two-stage float gyroscope. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 7. P. 659–667 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-7-659-667