

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ НА ПРИМЕРЕ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДВУХСТЕПЕННЫХ ПОПЛАВКОВЫХ ГИРОСКОПОВ

Б. Л. ШАРЫГИН

*Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», 197046, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: office@eprib.ru*

С помощью корреляционного анализа исследованы проблемы, возникающие при мелкосерийном производстве двухступенных поплавковых гироскопов в ЦНИИ „Электроприбор“. Анализируется связь точностной характеристики азимутального гироскопа с промежуточными параметрами прибора, фиксируемыми в процесс его изготовления, регулировки и испытаний. На основе корреляционного анализа подтверждено влияние фактора FD прибора на интегральную оценку точности азимутального гироскопа. Продемонстрирована динамика изменения скользящего коэффициента корреляции, выявлены дополнительные факторы, влияющие на точность гироскопа (квалификация слесаря-сборщика гиromотора, тип компаунда статора). Анализ множественной корреляции большой партии приборов подтвердил, что точность азимутальных гироскопов кроме фактора FD существенно зависит от достигнутой дисперсии тока обратной связи на заключительных этапах термоциклирования. Оба этих параметра связаны с точностью гироскопа по шкале Чеддока. Корреляционный анализ магнитных характеристик роторов гиromоторов гироскопов на разных стадиях изготовления позволил подтвердить различие химического состава заготовок роторов. Показано, что использование корреляционного анализа эффективно при исследовании проблем, возникающих в мелкосерийном производстве различных типов чувствительных элементов в любом гироскопическом производстве.

Ключевые слова: корреляционный анализ, поплавокый гироскоп, точность, фактор, гиromотор

Введение. При изготовлении гироскопических чувствительных элементов необходимо обеспечить их точностные и надежностные характеристики. Производство двухступенных поплавковых гироскопов (ДПГ) в ЦНИИ „Электроприбор“ на протяжении последних 10—15 лет характеризуется освоением более точных приборов, увеличением выпуска гироскопов, заменой комплектующих, изменением качества используемых материалов, сплавов, компаундов, клеев, внедрением нового оборудования, подключением новых исполнителей и т.д.

В мелкосерийном производстве используются особенности, свойственные пятому технологическому укладу: информационные технологии, компьютерные стенды, документирование пусков гироскопов, электронный технологический паспорт [1, 2]. Конечно, учитываются результаты периодических и типовых испытаний, исследования отказов и сходов, исполнение программ обеспечения надежности, комплексных программ экспериментальной отработки и др.

Однако даже таких мер часто недостаточно для своевременного выявления причин возникшей проблемы и формирования необходимых корректирующих действий.

В настоящей статье представлены результаты использования корреляционного анализа при исследовании нестабильности технологии изготовления поплавковых гироскопов в ЦНИИ „Электроприбор“.

Корреляционный анализ для ДПГ. На рис. 1 представлены данные об относительном количестве выпущенных гироскопов G и доле p отказавших гироскопов типа ДПГ.

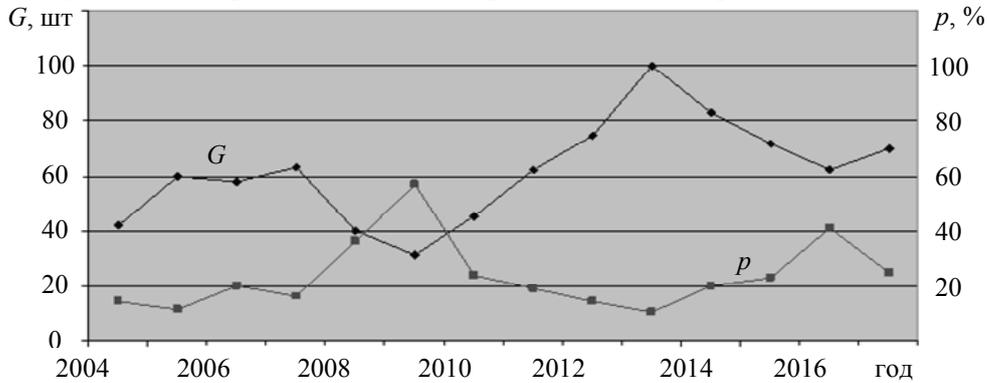


Рис. 1

Анализ представленных кривых позволяет сделать следующие выводы:

- ежегодный выпуск ДПГ имел два максимума: 2005—2007 и 2013 г.;
- количество отказов также имело два максимума: 2009 и 2016 гг.;
- значения p_{\max} регистрируются через 2—3 года после G_{\max} .

По результатам исследования отказов подтверждено, что максимум отказов 2009 г. явился следствием освоения облегченной поплавковой камеры, замены типа демпфирующей жидкости, внедрения цифровой электроники. Исследования показали, что в 2016 г. в основном отказы возникали из-за заклинивания гиросмоторов (функциональные отказы) [3]. Несколько зарегистрированных параметрических отказов ДПГ по точности перешли в функциональные на этапе исследования. Были также выявлены и устранены основные причины заклинивания: излишки клея внутри поплавковой камеры (ПК) и некачественная, а следовательно, неправильная динамическая балансировка гиросмотора (ГМ), применение нового компаунда при изготовлении статоров ГМ.

В различных областях науки и техники для решения аналогичных проблем широко используются статистические методы исследований. Корреляционный, дисперсионный и регрессионный анализ относятся к основным статистическим методам установления связей между величинами. Указанные типы анализа тесно взаимосвязаны, дополняют друг друга и позволяют решать общую задачу. Пример использования такого подхода в гироскопии отражен в работах [3—5]. Корреляционный анализ устанавливает зависимости между случайными величинами с одновременной оценкой степени не случайности их совместного изменения.

На базе исходных данных для рис. 1 представим результаты расчетов коэффициента корреляции r_{xy} годового выпуска ДПГ с числом зафиксированных отказов. Здесь и далее будем пользоваться коэффициентом корреляции (КК) Пирсона, который применяется для изучения взаимосвязи двух переменных, измеренных на одной и той же выборке. Все расчеты выполнены с использованием программы MS Excel, предназначенной для работы с электронными таблицами [6]. Для расчета КК двух случайных величин x и y используется следующее выражение:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x}) \sum (y_i - \bar{y})}}, \quad (1)$$

где x_i — значения, принимаемые переменной x , y_i — значения, принимаемые переменной y , \bar{x} — среднее значение x , \bar{y} — среднее значение y .

Для временного сдвига в 1 год $r_{xy} = 0,38$; 2 года — 0,63; 3 года — 0,51.

Значение r_{xy} при временном сдвиге два года соответствует примерно средней наработке на отказ гироскопов. А вот КК количества эксплуатируемых на конец текущего года ДПГ с количеством отказов в текущем году равен 0,71. Здесь и далее для качественной оценки силы связи будем пользоваться шкалой Чеддока [7]: при $r_{xy} = 0,1—0,3$ связь слабая, при $0,3—0,5$ — умеренная, при $0,5—0,7$ — заметная, при $0,7—0,9$ — сильная, при $0,9—0,99$ — весьма сильная.

Таким образом, между числом ДПГ, находящихся в эксплуатации, и регистрируемым количеством отказов связь сильная ($r_{xy} > 0,7$). Такой результат корреляционного анализа подтверждает физические закономерности, объективно существующие в жизненном цикле ДПГ.

Один из первых примеров исследования надежности с использованием статистического анализа данных, полученных в ходе изготовления и эксплуатации гироскопических устройств, представлен в [3]. Рассматривалось построение регрессионных зависимостей между параметрами входа и характеристиками выхода обращенного гироскопа со сферическим газодинамическим неконтактным подвесом. Предложенная методика статистической обработки данных, полученных в ходе изготовления и эксплуатации приборов, позволила определить влияние особенностей технологических процессов различных гироскопических производств на функциональные отказы обращенных гироскопов с неконтактным газодинамическим подвесом и выработать рекомендации по устранению их причин без существенного увеличения вероятности параметрического отказа.

Классический корреляционный анализ предполагает нормальное распределение рассматриваемых случайных величин. Очевидно, что распределение исследуемых случайных величин очень часто далеко от нормального. В [3] применен один из критериев проверки близости закона распределения случайной величины к нормальному из [8]:

$$\left| \frac{\sum [X_k(n) - X_{k0}]}{ND_{X_k}} - 0,7979 \right| < 0,4\sqrt{N}, \quad (2)$$

где X_{k0} , $D_{X_k}^2$ — соответственно математическое ожидание и дисперсия случайной величины $X_k(n)$, $k = 1, 2, \dots, K$, $n = 1, 2, \dots, N$.

При корреляционном анализе ДПГ в качестве зависимой переменной (переменной отклика) в первую очередь используем точностную характеристику ДПГ, например, интегральную оценку точности (ИОТ). К независимым (объясняющим) переменным отнесем:

- радиальный зазор в газодинамической опоре гироскотора,
- напряжение трогания ГМ,
- динамический дисбаланс ротора ГМ,
- момент дифферента ПК,
- температуру нулевой плавучести ПК ($T_{нп}$),
- фактор FD,
- коэффициенты сборки A_i и C_i ,
- изменения модуля тока обратной связи на заключительных этапах термоциклирования,
- дисперсию тока обратной связи на заключительных этапах термоциклирования ($D_{I_{oc}}$),
- токи трения в ориентациях 1 и 2 ($I_{тр1}$, $I_{тр2}$),
- время выбега (ВВ) ротора ГМ,
- установившиеся значения токов фаз ГМ.

FD представляет собой суммарный угол поворота балансировочных грузов ПК при ее окончательной балансировке по крену в составе гироскопа, A_i и C_i описывают кривую диаграммы моментов на оси прецессии прибора форму кривой в момент проверки качества сборки в разных ориентациях гироскопа. Токи трения характеризуют зоны невозврата тока обратной связи из-за гистерезиса контактного момента трения на оси прецессии ПК гироскопа.

Все эти параметры указаны в конструкторской (КД) и технологической документации (ТД). Для этих переменных в КД установлены допуски, которые не менялись практически с момента создания ДПГ с газодинамической опорой. При дальнейшем повышении требований по точности к ДПГ эти допуски не пересматривались, а выпуск приборов повышенных классов точности обеспечивался отбором по результатам испытаний.

Для последовательной выборки из 40 азимутальных гироскопов, изготовленных в 2011—2014 гг., были рассчитаны КК оценки интегральной точности с $FD = 0,243$ и $T_{\text{нп}} = 0,092$. Проверка распределения всех трех случайных величин, участвующих в корреляционном анализе, подтвердила близость к нормальному закону распределения: для максимального неравенства по (2) имеем: $0,7979 < 2,52$.

Минимальное значение КК для $T_{\text{нп}}$ объяснимо: в каждом приборе при регулировке подбирается своя температура нулевой плавучести и ее отличие от номинального значения ($55\text{ }^\circ\text{C}$) практически не влияет на точность гироскопа. Параметр FD является суммой углов поворотов балансировочных винтов гироскопа при окончательной балансировке ПК по двум осям крена и регулировке гироскопа после завершения основных циклов термостабилизации. В разобранных гироскопах всегда обнаруживаются микрочастицы (микростружка) из материала балансировочных винтов, образующиеся при вращении винтов в процессе балансировки ПК. На точность гироскопа влияют не только перемещения этих микрочастиц, но и микродвижения (или микродеформации) нарезанных, но еще не оторвавшихся частиц. Чем больше микрочастиц, тем грубее прибор (больше значение ИОТ). Но в большой анализируемой выборке гироскопов связь слабая ($r_{xy} = 0,243$).

Корреляционный анализ на основе скользящего среднего. Полученное значение r_{xy} ИОТ и FD характеризует сравнительно большую выборку гироскопов, изготовленных в течение 3—4 лет. Эти приборы выполнены разными слесарями-сборщиками ГМ, многие комплектующие попали из разных партий, претерпел изменения компаунд статора и т.д. Анализируемые данные представляют собой временные ряды. Для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения основных тенденций используем скользящее среднее [9]. Начнем с простого скользящего среднего (*simple moving average, SMA*), численно равного среднему арифметическому значений исходной функции за установленный период. Первоначально был рассчитан скользящий r_{xy} ИОТ и FD по десяти приборам (рис. 2, а).

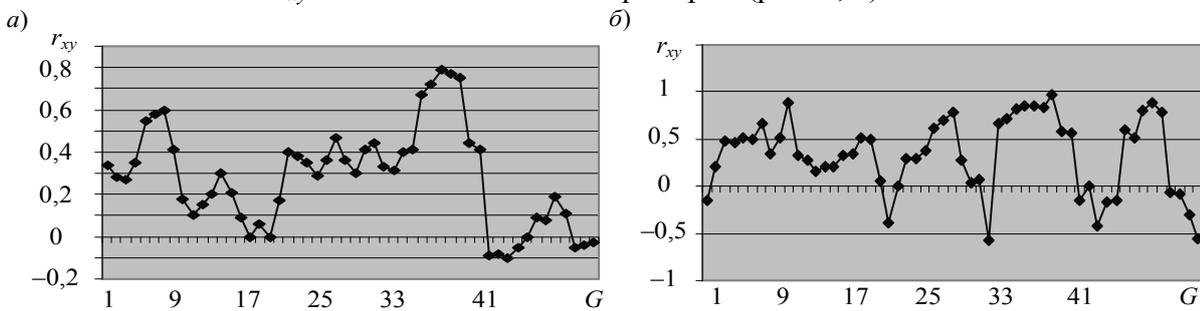


Рис. 2

Следовательно, рассчитанное значение $r_{xy} = 0,243$ подтверждает только знак корреляции (прямая связь по направлению). В зависимости от группы исследуемых приборов r_{xy} меняется в очень широких пределах (от $-0,1$ до $0,8$). Для $G = 35—39$ связь сильная ($r_{xy} > 0,70$). На рис. 2, б представлен скользящий КК для пяти приборов, видно, что диапазон изменения значений r_{xy} расширился ($-0,6$ до $0,98$). Возросло число областей с отрицательным значением КК. Но ши-

рина областей с отрицательным значением КК очень мала. Все это говорит о том, что в некоторых приборах итоговую точность прибора в основном определяет другой фактор (другая независимая переменная).

Анализ исходных данных позволил выявить несколько приборов с аномальным соотношением значений ИОТ и FD. Часть этих приборов была исключена из обработки (рис. 3).

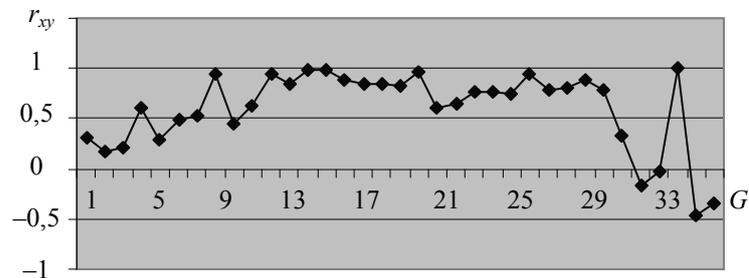


Рис. 3

Для $G = 31—35$ такие приборы не исключались. Из рис. 3 следует, что FD является одним из основных факторов, определяющих точность работы азимутальных гироскопов, на первых десяти группах приборов заметно влияние на точность гироскопа иных факторов.

На рис. 4 приведен график скользящего r_{xy} ИОТ с $T_{\text{нп}}$.

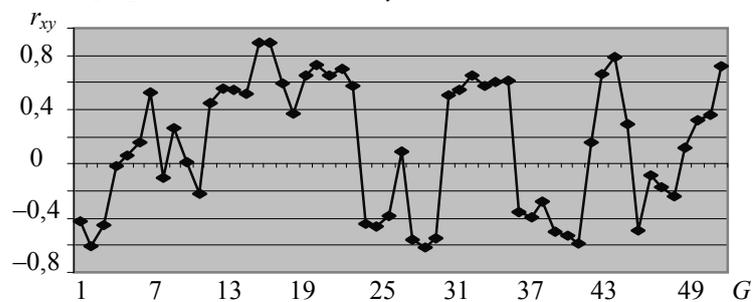


Рис. 4

Из рис. 3 и 4 видно, что даже при двух рассматриваемых независимых переменных меняется главный фактор с изменением анализируемого ансамбля приборов. Скорее всего, это является следствием изменения технологии изготовления гироскопа (слесарь-сборщик, состояние оборудования, внешние факторы, партия используемых материалов и т.д.).

На рис. 5 представлены графики скользящего r_{xy} ИОТ с FD для приборов двух разных слесарей-сборщиков ГМ и ПК.

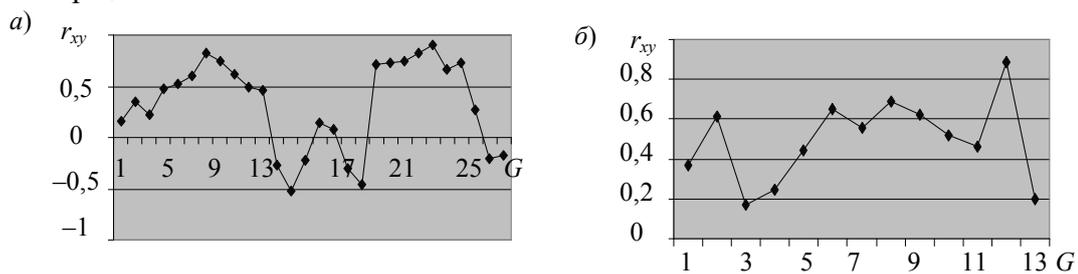


Рис. 5

Различия весьма значительные, в т.ч. у второго сборщика r_{xy} всегда положителен (рис. 5, б).

Множественный корреляционный анализ. При выборе предикторов учтем факторы, которые оказывают существенное влияние на исследуемый показатель ИОТ.

Множественную корреляцию рассчитаем для 21 азимутального прибора, изготовленного после 2014 г. по откорректированной технологии (одностороннее склеивание ПК, ужесточенная динамическая балансировка роторов, проверка деградации времени выбега). В качестве зависимой переменной (отклика) используем ИОТ, а в роли предикторов: FD, $T_{\text{нп}}$,

$D_{I_{oc}}$, $I_{тр1}$, $I_{тр2}$ и время выбега ВВ. В статистическом анализе для выбора числа наблюдений n и „независимых“ факторов m часто используется следующее эмпирическое соотношение [10]:

$$(n + m) < (n - m)^2. \quad (3)$$

В рассматриваемом случае $n = 21$, $m = 6$, следовательно, неравенство выполняется. Результаты расчета множественной корреляции представлены в табл. 1. Расчет выполнен программой MS Excel с использованием макрофункции этого пакета „Корреляционный анализ“ [6].

Таблица 1

Параметр	ИОТ	$T_{нп}$	FD	$D_{I_{oc}}$	$I_{тр1}$	$I_{тр2}$	ВВ
ИОТ	1						
$T_{нп}$	0,015	1					
FD	-0,509	-0,019	1				
$D_{I_{oc}}$	0,514	-0,084	-0,166	1			
$I_{тр1}$	-0,159	0,161	0,125	-0,258	1		
$I_{тр2}$	0,088	0,203	-0,428	-0,171	0,129	1	
ВВ	-0,080	-0,029	0,201	0,321	0,237	-0,061	1

Из табл. 1 следует, что точность азимутальных гироскопов в первую очередь определяется FD (отрицательная связь) и значением $D_{I_{oc}}$ на заключительных этапах термоциклирования (положительная связь). Для обоих параметров связь заметная ($|r_{xy}| > 0,5$). Но главное — изменился знак r_{xy} ИОТ и FD. Чем больше вращали балансировочные винты, тем точнее становился гироскоп. Следовательно, изменился определяющий механизм воздействия вращения балансировочных винтов на точность прибора. Подтверждает это и существенное снижение среднего значения FD в группах анализируемых приборов: с 589 до 432.

Для проверки устойчивости полученных выводов были проведены расчеты множественной корреляции (табл. 2).

Таблица 2

G	21	18	15	12	9
$r_{ИОТ-FD}$	-0,509	-0,545	-0,547	-0,512	-0,686
$r_{ИОТ-D_{I_{oc}}}$	0,514	0,501	0,579	0,585	0,756

Данные табл. 2 позволяют утверждать, что выявленная связь не только заметная, но и устойчивая.

Выше установлена зависимость точностных характеристик прибора от слесаря-сборщика. В связи с этим представляет интерес корреляция ИОТ с промежуточными параметрами на приборах одного и того же слесаря-сборщика. В корреляционном анализе использовано 10 гироскопов, ГМ и ПК которых изготовлены одним специалистом. Результаты расчета множественной корреляции представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	ИОТ	$T_{нп}$	FD	$D_{I_{oc}}$	$I_{тр1}$	$I_{тр2}$	ВВ
ИОТ	1						
$T_{нп}$	0,044	1					
FD	-0,754	-0,021	1				
$D_{I_{oc}}$	0,760	0,081	-0,483	1			
$I_{тр1}$	-0,370	0,072	0,719	-0,160	1		
$I_{тр2}$	0,232	0,158	-0,290	0,258	0,126	1	
ВВ	-0,113	-0,002	0,239	0,352	0,389	0,619	1

Вывод очевиден: для этого слесаря-сборщика точность прибора сильно связана с FD и $D_{I_{oc}}$ на заключительных этапах термоциклирования гироскопа. Но это не означает, что его приборы грубее. Его приборы точнее в среднем на 10 %: таково соотношение средних значений ИОТ. Для приборов других слесарей-сборщиков множественная корреляция представлена в табл. 4.

Таблица 4

Параметр	ИОТ	$T_{нп}$	FD	$D_{I_{oc}}$	$I_{тр1}$	$I_{тр2}$	ВВ
ИОТ	1						
$T_{нп}$	0,115	1					
FD	-0,026	-0,117	1				
$D_{I_{oc}}$	0,334	-0,430	0,346	1			
$I_{тр1}$	-0,224	0,352	-0,459	-0,488	1		
$I_{тр2}$	-0,086	0,416	-0,654	-0,517	0,312	1	
ВВ	-0,031	-0,242	0,234	0,155	-0,329	-0,514	1

Эффективность корреляционного анализа продемонстрируем на примере динамики токов потребления ГМ в установившемся режиме. С середины 2015 г. отмечена тенденция увеличения токов потребления в отрегулированных гироскопах.

Это справедливо для азимутальных и горизонтирующих ДПГ, так как они используют унифицированную ПК с синхронным гистерезисным двигателем.

Возможными причинами изменения рабочих токов могли быть:

- изменение параметров стандов, в том числе модулей питания ГМ,
- изменение технологии изготовления ГДО,
- вариации состава инертного газа в поплавоквой камере,
- изменение давления в ПК,
- разное качество обработки поверхностей опор, фланцев и ротора,
- изменение параметров петли намагничивания ротора,
- увеличение токов подмагничивания,
- изменение технологии изготовления пакета статора,
- поставка материала статора с измененными характеристиками.

Увеличение токов потребления ГМ может быть обусловлено ростом потерь в стали P_c и изменением соотношений между активной и индуктивной составляющими тока $\cos\varphi$ [11—13]. Именно эти характеристики зависят от параметров роторов ГМ, в т.ч. от магнитных свойств.

Расчитаны КК токов потребления с магнитными характеристиками готовых роторов. Для этой выборки роторов заметна связь токов с магнитной энергией ротора (-0,584) и магнитной индукцией ротора (-0,644), но только умеренная связь с коэрцитивной силой (0,316). Необходимо обратить внимание и на знак КК. Недостаток магнитной индукции и/или магнитной энергии ротора приводит к увеличению токов ГМ в установившемся режиме. Возможных причин изменения магнитных характеристик готовых роторов более чем достаточно: химический состав заготовок, технология плавки, технология доведения заготовки до готовой детали и т.д. [14, 15].

Корреляционный анализ магнитных характеристик роторов показал, что в соответствии с теорией [14, 15] и практикой магнитотвердые сплавы типа АЛНИ должны иметь отрицательный коэффициент корреляции магнитных характеристик заготовок. Проведенный химический анализ забракованных роторов из первой плавки показал, что в готовом роторе содержится алюминия 10,5 % (при допуске 9—10 %) и хрома от 0,66 до 0,68 % (при допуске 0,2—0,5 %). Очевидно, что причиной положительного КК в первой партии заготовок является в основном химический состав заготовки. Последующая механическая обработка с

доведением заготовки до детали привела к дальнейшему снижению магнитных характеристик готовых роторов.

Совместный корреляционный и дисперсионный анализ [16] показал, что в партии гироскопов средние значения магнитных характеристик существенно различаются: различие достигает 19 % для заготовок и 10 % — для готовых деталей. При этом коэффициенты корреляции магнитной индукции и коэрцитивной силы различаются даже знаками. Проведенный химический анализ забракованных роторов в сертифицированной лаборатории Кировского завода подтвердил превышение по алюминию 0,5 % и по хрому 0,16 %.

Закрепленная в КД на ДПГ технология изготовления сплава для роторов отработывалась в литейном производстве завода „Азимут-Электроприбор“. Документация предусматривает не только определенный химический состав сплава, но и требования к шихтовым материалам, особенностям расчета шихты, подготовке печи к плавке, процессу плавки и разливу магнитотвердых сплавов, охлаждению залитых форм и контролю литых заготовок.

Выводы

1. Обоснована целесообразность использования корреляционного анализа для установления связей между случайными величинами, характеризующими мелкосерийное изготовление поплавок- гироскопов. Корреляционный анализ позволяет получить количественную и качественную оценки степени неслучайности совместного изменения исследуемых параметров ДПГ.

2. В качестве зависимой переменной в основном используется точностная характеристика гироскопа, в качестве независимых: радиальный зазор в газодинамической опоре гироскопа, температура нулевой плавучести, FD, время выбега ротора ГМ и т.д.

3. Использование скользящего коэффициента корреляции позволило выявить изменение фактора, определяющего точность прибора. Исследовано влияние типа компаунда и слесаря- сборщика.

4. Множественный корреляционный анализ показал, что точность азимутальных ДПГ, в первую очередь, зависит от FD и результатов термоциклирования конкретного поплавок- гироскопа.

5. Совместное использование корреляционного и дисперсионного анализа однозначно подтверждает факт существенного влияния параметров плавки на магнитные характеристики роторов гироскопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махаев Е. А., Матвеев Ю. В. Автоматизация процессов регулирования двухступенных поплавок- гироскопов // Гироскопия и навигация. 2007. Т. 57, № 2.
2. Бузык А. Я., Донецкая Ю. В., Шарыгин Б. Л. Электронный технологический паспорт // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 280—286.
3. Прецизионные газовые подшипники / И. Е. Сипенков, А. Ю. Филлипов, Ю. Я. Болдырев, Б. С. Григорьев, Н. Д. Заблоцкий, Г. А. Лучин, Т. В. Панич. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ „Электроприбор“, 2007. 504 с.
4. Литвиненко Ю. А., Антонов С. Б., Тупышев В. А. Уточнение математической модели погрешностей двухступенного поплавок- гироскопа // Гироскопия и навигация. 2007. Т. 57, № 2.
5. Евстифеева О. М., Игнатьев С. В. Сравнительный анализ различных методов обработки экспериментальных данных для оценки характеристик точности волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2006. Т. 53, № 2.
6. Tornado 5. Два способа корреляционного анализа в Microsoft Excel [Электронный ресурс]: <<http://lumpics.ru/correlation-analysis-inexcel>>.
7. Бахрушин В. Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей // Системные технологии. 2011. Т. 73, № 2. С. 9—14.

8. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи / Пер. с англ. под ред. А. Н. Колмогорова. М.: Наука, 1973. Т. 2. 899 с.
9. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997. 112 с. ISBN5-256-01352 – 1.
10. Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Вильямс, 2007.
11. Делекторский Б. А., Мастяев Н. З., Орлов И. Н. Проектирование гироскопических электродвигателей. М.: Машиностроение, 1964.
12. Тарасов В. Н., Нагайцев В. И., Останин Н. Ю., Павлихина Е. В. Сравнительная оценка прецизионных гироскопических электроприводов на базе синхронных электродвигателей // Гироскопия и навигация. 1996. Т. 12, № 1.
13. Тарасов В. Н. Синхронно-гистерезисные двигатели прецизионных гироскопов // Гироскопия и навигация. 2006. Т. 55, № 4.
14. Февралева Н. Е. Магнитно-твердые материалы и постоянные магниты. Киев: Наукова думка, 1969.
15. Лившиц Б. Г., Львов В. С. Высококоэрцитивные сплавы на железоникельалюминиевой основе. М.: ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1960.
16. Шарыгин Б. Л. Дисперсионный анализ при исследовании проблем в мелкосерийном производстве двухступенных поплавокых гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 235—241. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-235-241.

Сведения об авторе**Борис Леонидович Шарыгин**

— канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“»; главный конструктор; E-mail: office@eprib.ru

Поступила в редакцию
31.05.18 г.

Ссылка для цитирования: Шарыгин Б. Л. Корреляционный анализ технологии на примере мелкосерийного производства двухступенных поплавокых гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 6. С. 551—560.

**CORRELATION ANALYSIS OF TECHNOLOGY ON THE EXAMPLE
OF SMALL-SCALE PRODUCTION OF TWO-STEP FLOATED GYROSCOPE
B. L. Sharygin***Concern CSRI "Electropribor", JSC, 197046, St. Petersburg, Russia
E-mail: office@eprib.ru*

The problems arising in the small-scale production of two-stage float gyroscopes in the Central research Institute "Electropribor" are investigated with the help of correlation analysis. Relationships between accuracy characteristics of the azimuth gyroscope and the intermediate parameters of the device fixed in the process of its manufacture, adjustment and testing are considered. Based on the correlation analysis, the influence of the FD factor on the integral estimation of the accuracy of the azimuth gyroscope is confirmed. Dynamics of the sliding correlation coefficient is studied, additional factors affecting the accuracy of the gyroscope (qualification of a gyro motor fitter, type of stator compound) are revealed. Analysis of multiple correlation of a large batch of devices confirmed that the accuracy of azimuth gyroscopes except the FD factor significantly depends on the achieved dispersion of the feedback current at final stages of thermal cycling. The both parameters significantly affect the gyro accuracy on the scale of Chaddock. Correlation analysis of the magnetic characteristics of gyro motor rotors of gyroscopes at different stages of manufacture confirms the difference in chemical composition of the rotor blanks. The use of correlation analysis is shown to be an effective mean in the study of problems arising in small-scale production of various types of sensitive elements in any gyroscopic production.

Keywords: correlation analysis, floating gyro, accuracy, factor, gyro motor**REFERENCES**

1. Makhayev E.A., Matveyev Yu.V. *Gyroscope and Navigation*, 2007, no. 2(57). (in Russ.)
2. Butsyk A.Ya., Donetskaya Yu.V., Sharygin B.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 3(60), pp. 280–286. (in Russ.)

3. Sipenkov I.E., Fillipov A.Yu., Boldyrev Yu.Ya., Grigor'yev B.S., Zablotskiy N.D., Luchin G.A., Panich T.V. *Pretsizionnyye gazovyye podshipniki* (Precision Gas Bearings), St. Petersburg, 2007, 504 p. (in Russ.)
4. Litvinenko Yu.A., Antonov S.B., Tupysev V.A. *Gyroscopy and Navigation*, 2007, no. 2(57). (in Russ.)
5. Evstifeyeva O.M., Ignat'yev S.V. *Gyroscopy and Navigation*, 2006, no. 2(53). (in Russ.)
6. *Tornado 5*, <http://lumpics.ru/correlation-analysis-in-excel>. (in Russ.)
7. Bakhrushin V.E. *System technologies*, 2011, no. 2(73), pp. 9–14. (in Russ.)
8. Kendall M.G., Stuart A. *The Advanced Theory of Statistics, Vol. 2. Inference and Relationship*, 1964.
9. Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A. *Matematicheskiye metody postroyeniya prognozov* (Mathematical Methods for Forecasting), Moscow, 1997, 112 p. ISBN5-256-01352-1. (in Russ.)
10. Draper N., Smith H. *Applied Regression Analysis*, 3 ed., John Wiley & Sons, Inc., 1998, 736 p.
11. Delektorskiy B.A., Mastayev N.Z., Orlov I.N. *Proyektirovaniye giroskopicheskikh elektrodvigatelyey* (Designing Gyroscopic Electric Motors), Moscow, 1964. (in Russ.)
12. Tarasov V.N., Nagaytsev V.I., Ostanin N.Yu., Pavlikhina E.V. *Gyroscopy and Navigation*, 1996, no. 1(12). (in Russ.)
13. Tarasov V.N. *Gyroscopy and Navigation*, 2006, no. 4(55).
14. Fevraleva N.E. *Magnitno-tverdyye materialy i postoyannyye magnity* (Hard Magnetic Materials and Permanent Magnets), Kyiv, 1969. (in Russ.)
15. Livshits B.G., L'vov V.S. *Vysokokoertsitivnyye splavy na zhelezonikel'alyuminiyevoy osnove* (High Coercive Iron Nickel-Aluminum Alloys), Moscow, 1960. (in Russ.)
16. Sharygin B.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 3(62), pp. 235–241. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-235-241. (in Russ.)

Data on author**Boris L. Sharygin**

— PhD, Senior Scientist; Concern CSRI “Electropribor”, JSC; Chief Designer; E-mail: office@eprib.ru

For citation: Sharygin B. L. Correlation analysis of technology on the example of small-scale production of two-step floated gyroscope. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 6. P. 551–560 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-551-560