

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОБЛЕМ В МЕЛКОСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ДВУХСТЕПЕННЫХ ПОПЛАВКОВЫХ ГИРОСКОПОВ

Б. Л. ШАРЫГИН

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

Представлены результаты применения дисперсионного анализа при исследовании проблем, возникающих в мелкосерийном производстве двухстепенных поплавковых гироскопов. Проанализирован первый опыт применения дисперсионного анализа при изучении качества роторов гироскопов с использованием программы MS Excel. Посредством однофакторного дисперсионного анализа исследовано влияние человеческого фактора на FD-фактор отрегулированного прибора: в результате принята гипотеза H_1 о наличии такого влияния и подтверждена нулевая гипотеза об отсутствии влияния человеческого фактора на интегральную оценку точности азимутального гироскопа. Приведены результаты однофакторного дисперсионного анализа, подтверждающие альтернативную гипотезу H_1 о существенном влиянии плавки заготовок на магнитную энергию ротора. Установлено отсутствие влияния разных плавов на время выбега гироскопа в трех ориентациях и на значения токов потребления в установившемся режиме. Приведены результаты использования двухфакторного дисперсионного анализа при исследовании влияния на итоговый FD-фактор прибора двух независимых переменных — человеческого фактора и типа компаунда статора.

Ключевые слова: дисперсионный анализ, поплавковый гироскоп, точность, фактор, гироскоп, гипотеза

Введение. Корреляционный, дисперсионный и регрессионный анализ являются основными статистическими методами установления связей между величинами. Указанные типы анализа тесно взаимосвязаны, дополняют друг друга и решают общую задачу, поэтому часто объединяются общим термином „регрессионный анализ“. Определенные попытки такого подхода отражены в некоторых работах [1, 2].

В настоящей статье представлены результаты использования дисперсионного анализа (ДА) при исследовании проблем, возникающих при мелкосерийном изготовлении двухстепенных поплавковых гироскопов (ДПГ), в частности, в гироскопическом производстве ЦНИИ „Электроприбор“.

Дисперсионный анализ сводится к изучению влияния одной или нескольких независимых переменных (факторов) на зависимую переменную [3, 4]. Последняя представлена значениями абсолютных шкал (шкала отношений); независимые переменные являются номинальными (шкала наименований), т.е. отражают групповую принадлежность, и могут иметь две или более градации (или уровня). Примерами независимой переменной применительно к рассматриваемой области исследования могут быть типы технологии, разновидности используемых материалов, исполнители технологических операций, партии заготовок и т.д. Градации, соответствующие независимым выборкам объектов, называются межгрупповыми, а градации, соответствующие зависимым выборкам, — внутригрупповыми.

Первый опыт использования дисперсионного анализа. Один из первых опытов по использованию ДА для исследования проблем в мелкосерийном производстве ДПГ был проведен в ЦНИИ „Электроприбор“ в начале 2000-х гг. В этот период началось успешное внедрение систем инерциальной навигации и стабилизации (СИНС) „Ладога-М“ на ДПГ на

кораблях ВМФ [5, 6]. Достигнутые точностные и надежностные характеристики СИНС обусловили создание их подводных комплектаций, для которых в первую очередь были необходимы более точные азимутальные гироскопы. При освоении новых модификаций ДПГ возникла проблема качества роторов гиromоторов (ГМ), связанная, в том числе, со сменой поставщика заготовок роторов.

Для исследований были отобраны пять образцов роторов, прошедших различные стадии механической и термической обработки. Для выполнения исследований было сформировано техническое задание, регламентирующее следующие требования: тип сплава — Ални Ю10Н15; химический состав сплава: Ni — 14,5...15,5 %, Al — 9,5...10 %, Cr — 0,2...0,5 %, Се — 0,05...0,1 %, V — 1,3...1,5 %; готовые детали должны обладать определенными магнитными свойствами (магнитная индукция $B=0,85\pm0,08$ Тл, коэрцитивная сила $H > 6000$ А/м).

При механообработке деталей происходит увеличение микротрещин и значительно возрастает число сколов, что не допускается требованиями конструкторской документации. Возможно, в результате термообработки происходит выгорание легкоплавких элементов, изменение микроструктуры, что приводит к появлению указанных дефектов.

В ходе исследований требовалось выполнить металлографический и химический анализ деталей, прошедших разные стадии изготовления, и по возможности дать рекомендации по улучшению свойств роторов и повышению стойкости деталей при механической обработке.

По результатам исследования были представлены детальные данные о химическом составе Ални-сплава, из которого изготовлены роторы, установлена гомогенность образцов по основным элементам и приведены результаты электронно-микроскопического анализа. Химический состав представленных образцов не соответствовал техническим условиям по содержанию легирующих элементов: ни в одном из образцов роторов не обнаружено присутствие церия и ванадия, а в большинстве образцов содержание хрома ниже допустимого. Так как сплавы типа Ални относятся к прецизионным, их качество в значительной степени определяется выполнением технологии. Даже небольшие отклонения в составе шихты, организации процесса литья и режима термической обработки приводят к непоправимому браку [7, 8]. Таким образом, необходимы дополнительные исследования по влиянию отклонений химического состава от номинального на магнитные свойства, а также усиление входного контроля состава заготовок.

Повторные исследования, проведенные через семь лет, показали, что химический состав пяти образцов не соответствует техническим условиям, образцы гомогенны, но хрупкие и при механической обработке склонны к образованию трещин. Несмотря на очередную смену поставщика заготовок роторов, прежние проблемы остались.

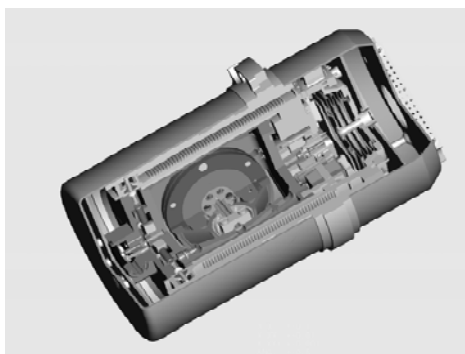


Рис. 1

На рис. 1 представлен ДПГ в разрезе. Зазор между внутренней поверхностью ротора и внешней образующей статора не превышает 100 мкм. Осевой зазор в газодинамической опоре составляет от 5 до 6 мкм. При каждом включении гироскопа основные детали ГМ испытывают термоудар с повышением температуры на 50—60 °С. Скорость вращения ротора, равная 12 000 об/мин, ограничена, в первую очередь, пределом прочности его материала из-за действия центробежных сил [9]. Линейная скорость ротора, измеренная в точках на его внешней цилиндрической поверхности (радиусом 21,4 мм), достигает

27 м/с, в этих точках ротор испытывает „перегрузку“ порядка 3500 g.

Для обеспечения указанных условий эксплуатации ротор должен быть изготовлен идеально.

Однофакторный дисперсионный анализ. В зависимости от типа и количества переменных различают следующие типы ДА [4]:

- однофакторный и многофакторный (одна или несколько независимых переменных);
- одномерный и многомерный (одна или несколько зависимых переменных);
- ДА, проводимый с повторными измерениями (для зависимых выборок);
- ДА, проводимый при наличии постоянных и случайных факторов.

В соответствии с математической моделью ДА его процедура состоит в определении соотношения систематической (межгрупповой) дисперсии к случайной (внутригрупповой) дисперсии измеряемых данных. В качестве показателя изменчивости используется сумма квадратов отклонения значений параметра от среднего.

Проведем однофакторный ДА двух групп ДПГ, сборка гироскопов которых производилась двумя исполнителями. Функцию независимой переменной будет выполнять слесарь-сборщик ГМ, от профессионализма которого зависит качество сборки (человеческий фактор); в качестве зависимой переменной выбираем результирующий угол поворота балансировочных винтов поплавковой камеры (ПК) при ее окончательной балансировке по крену — обозначим эту переменную как FD-фактор.

Выбираем из последовательно собранных экземпляров две группы приборов: первая группа 28 гироскопов, вторая — 19. Для каждого прибора из соответствующих таблиц электронного технологического паспорта [10] и конструкторской документации выбираем значение FD. Полученная информация вводится в электронные таблицы, содержащиеся в программе Microsoft Excel. Активизируется пакет анализа с опцией „однофакторный ДА“; здесь же формируются результаты. На рис. 2 показан скриншот сформированной программой электронной таблицы, где (как и на других рисунках) приняты следующие обозначения: SS — полная дисперсия; df — степени свободы; MS — внутригрупповая дисперсия; F — критерий, определяющий соотношение оценок межгрупповой и внутригрупповой дисперсий; P-значение — уровень значимости (обычно и в данном случае 0,05); $F_{кр}$ — пороговое значение F для решения о нулевой гипотезе (далее по тексту для упрощения принято P).

Группы	Сист	Сумма	Среднее	Дисперсия
Столбец 1	28	20256	723.4	138170
Столбец 2	19	6636	349.3	46883

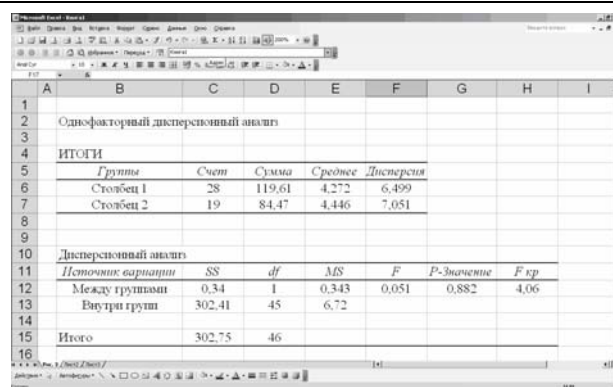
Источник вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	Fкр
Между группами	1584678	1	1584678	15.58	0.0003	4.06
Внутри групп	4574508	45	11,71			
Итого	6159186	46				

Рис. 2

Анализ электронной таблицы показывает, что среднее значение и дисперсия FD-фактора, полученные при работе первого сборщика, в два и три раза соответственно больше, чем при работе второго сборщика.

Так как $F > F_{кр}$, а $P < 0,05$, то принимается гипотеза H_1 о наличии влияния исследуемого фактора (слесарь-сборщик гироскопа) на FD-фактор прибора.

Проведем однофакторный ДА для тех же приборов, используя в качестве фактора интегральную оценку точности (ИОТ). Результаты, представленные на рис. 3 в виде скриншота электронной таблицы, показывают близость параметров гироскопов обеих групп по средним значениям и дисперсии ИОТ. Так как $F = 0,051 << F_{кр} = 4,057$, а $P = 0,882 >> 0,05$, то справедлива нулевая гипотеза об отсутствии влияния сборщика гироскопа на интегральную оценку точности азимутального гироскопа.

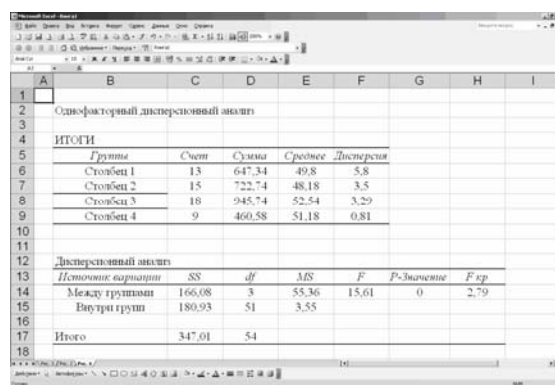


Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Столбец 1	28	119,61	4,272	6,499
Столбец 2	19	84,47	4,446	7,051

Источники вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F _{кр}
Между группами	0,34	1	0,343	0,051	0,882	4,06
Внутри групп	302,41	45	6,72			
Итого	302,75	46				

Рис. 3

Далее используем однофакторный ДА для исследования влияния процесса плавки заготовок роторов на магнитную энергию готовой детали. Рассмотрим исходные данные для роторов, полученных из четырех разных плавов с объемом выборок 13, 15, 18 и 9. Сокращение объема выборок (от 18) обусловлено, прежде всего, забракованием некоторых деталей из плавки на стадии их обработки (сколы, трещины и т.д.). Скриншот электронной таблицы с результатами ДА представлен на рис. 4.



Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Столбец 1	13	647,34	49,8	5,8
Столбец 2	15	722,74	48,18	3,5
Столбец 3	18	945,74	52,54	3,29
Столбец 4	9	460,58	51,18	0,81

Источники вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F _{кр}
Между группами	166,08	3	55,36	15,61	0	2,79
Внутри групп	180,93	51	3,55			
Итого	347,01	54				

Рис. 4

Соотношение средних и дисперсий при разных плавках качественно подтверждает влияние плавки на магнитную энергию ротора. Так как $F \gg F_{кр}$ ($15,61 \gg 2,79$), а $P < 0,05$ ($0 < 0,05$), то принимается гипотеза H_1 о существенном влиянии плавки на магнитную энергию ротора.

Аналогично исследовано влияние разных плавов на время выбега ГМ в трех ориентациях, на суммарные токи потребления в установившемся режиме и магнитную энергию готового ротора. Для первых четырех зависимостей однозначно установлено отсутствие влияния исследуемых плавов на время выбега ГМ в любой ориентации и на значения установившихся токов. При этом магнитная энергия зависит от плавки, хотя влияние весьма незначительное, так как $F = 4,69 > F_{кр} = 4,67$, а $P = 0,049 < 0,05$.

В 2014 г. была зарегистрирована серия отказов ДПГ, обусловленная заклиниванием ГМ. При исследовании отказов удалось выявить основную причину заклинивания газодинамической опоры — попадание в рабочий зазор опоры микрочастиц, в элементном составе которых преобладает титан. Необходимо отметить, что титан входит в состав клея (используется для склейки оси со статором, опоры с осью и корпуса с цилиндром, для законтривания гайки на оси), заливочного компаунда и тонкопленочного износостойкого покрытия опор и фланцев (нитрид титана). Основные источники титановых микрочастиц — излишки клея внутри поплавковой камеры и загрязнение заливочного компаунда. Эти выводы основывались на результатах разборки отказавших приборов и применении нового типа заливочного компаунда. Выработанный комплекс мер технологического характера позволил обеспечить, по крайней мере на порядок, уменьшение количества выпускаемых приборов с отказами по заклиниванию. Однако последующая статистика отказов изменила первичные представления об основ-

ных источниках заклинивания. В этой ситуации было проведено исследование причин заклинивания посредством однофакторного ДА. Основной фактор — наработка гироскопа на отказ. Из общего количества отказавших по заклиниванию приборов сформированы две выборки: приборы с ГМ и ПК, изготовленные двумя сборщиками. Результаты представлены на рис. 5.

Группы	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Сборщик 1	23	40843	1776	347980
Сборщик 2	11	39940	3631	333117

Источники вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F крит
Между группами	4,44E+08	1	444020	1,407	0,244	4,13
Внутри групп	1,08E+08	32	335281			
Итого	1,18E+08	33				

Рис. 5

Так как $F < F_{кр}$ ($1,407 < 4,149$), а $P = 0,244 > 0,05$, то принимается гипотеза об отсутствии влияния типа компаунда статора ГМ на наработку гироскопа до отказа с заклиниванием ГМ.

Двухфакторный дисперсионный анализ. В выборках, обработанных посредством однофакторного ДА, представлены приборы, в гироскопах которых установлены статоры с прежним и новым компаундом. Для определения влияния на итоговый FD-фактор двух взаимодействующих факторов — человеческого и типа компаунда статора — из генеральной совокупности изготовленных приборов были сформированы четыре выборки по семь гироскопов с разным сочетанием указанных факторов. Сформированные данные были обработаны с помощью опции „двухфакторный ДА“ из пакета анализа программы Microsoft Excel (рис. 6).

Выборка	Счет	Сумма	Среднее	Дисперсия
Выборка 1	7	4723	675	268030
Выборка 2	7	1854	265	50692
Выборка 3	7	4228	604	119060
Выборка 4	7	3142	449	37681
Выборка 5	14	8951	639	180003
Выборка 6	14	4996	357	49902
Столбец 1	14	6577	469	192328
Столбец 2	14	8541	610	57826

Источники вариации	SS	df	MS	F	P-Значение	F крит
Выборка	22459	1	22459	0,189	0,668	4,26
Столбец	558644	1	558644	4,7	0,04	4,26
Взаимодействие	113539	1	113539	0,955	0,338	4,26

Рис. 6

Программой выработаны единое значение $F_{кр} = 4,26$ и три пары значений F_i и P_i . Так как $F_1 \ll F_{кр}$, а $P_1 = 0,667 > 0,05$, то тип компаунда не влияет на FD-фактор прибора, а поскольку $F_2 > F_{кр}$, а $P_2 = 0,04 < 0,05$, то человеческий фактор (сборщик ГМ) все-таки влияет на FD-фактор прибора. Среднее значение FD в приборах, изготовленных первым сборщиком, в 2,5 (компаунд) — 1,35 (новый компаунд) раз больше, чем в приборах, изготовленных вторым сборщиком; такая же картина наблюдается и по дисперсиям FD. И последнее: так как $F_3 < F_{кр}$, а $P_3 = 0,34 > 0,05$, то значимого взаимодействия типа компаунда и сборщика ГМ относительно FD-фактора прибора не выявлено.

Закключение. Продемонстрированы возможности использования дисперсионного анализа при исследовании проблем, возникающих в мелкосерийном производстве ДПГ. Посредством однофакторного ДА подтверждено влияние человеческого фактора на FD-фактор гироскопа и выявлено отсутствие связи человеческого фактора и интегральной оценки точности

азимутального гироскопа. Однофакторный ДА подтвердил существенное влияние плавки заготовок роторов на магнитную энергию готовых деталей.

Двухфакторный ДА позволил установить:

— отсутствие влияния типа компаунда на FD-фактор прибора;

— влияние человеческого фактора на FD-фактор гироскопа;

— отсутствие значимого взаимодействия типа компаунда и сборщика ГМ относительно FD-фактора.

Таким образом, внедрение дисперсионного анализа целесообразно и эффективно при исследовании проблем, возникающих в мелкосерийном производстве различных типов чувствительных элементов в любом гироскопическом производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сипенков И. Е., Филлипов А. Ю., Болдырев Ю. Я., Григорьев Б. С., Заблоцкий Н. Д., Лучин Г. А., Панич Т. В. Прецизионные газовые подшипники. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2007. 504 с.
2. Евстифеева О. М., Игнатьев С. В. Сравнительный анализ различных методов обработки экспериментальных данных для оценки характеристик точности волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2006. № 2(53). С. 96
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1987. 351 с.
4. Шеффе Г. Дисперсионный анализ: Пер. с англ. М.: Наука, 1980. 512 с.
5. Пешехонов В. Г., Миронов Ю. В., Шарыгин Б. Л. Единая система инерциальной навигации и стабилизации „Ладога-М“ // Морская радиоэлектроника. 2003. № 1(4).
6. Алексеев С. П., Захаров И. Г., Пешехонов В. Г., Миронов Ю. В., Шарыгин Б. Л., Яценко С. В. Единая система навигации и стабилизации для кораблей ВМФ РФ и ВМС инозаказчика // Тр. конф. „НО-2004“. СПб: ГНИНГИ МО РФ, 2004. Т. 1. С. 24—28.
7. Февралева Н. Е. Магнитно-твердые материалы и постоянные магниты. Киев: Наукова думка, 1969. 232 с.
8. Лившиц Б. Г., Львов В. С. Высококоэрцитивные сплавы на железоникельалюминиевой основе. М.: ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1960. 156 с.
9. Мартыненко Ю. Г. Тенденции развития современной гироскопии // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 11. С. 120—127.
10. Бузык А. Я., Донецкая Ю. В., Шарыгин Б. Л. Электронный технологический паспорт // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 3. С. 280—286. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-280-286.

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
06.07.18 г.

Ссылка для цитирования: Шарыгин Б. Л. Дисперсионный анализ при исследовании проблем в мелкосерийном производстве двухступенных поплавковых гироскопов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 235—241.

ANALYSIS OF VARIANCE IN THE STUDY OF PROBLEMS IN SMALL SCALE PRODUCTION OF TWO-STEP FLOATED GYROSCOPES

B. L. Sharygin

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

Problems arising in the small-scale production of two-stage float gyroscopes, are considered. Results of a study of variances as applied to these problems are presented. The experience in the use of dispersion analysis in the study of gyromotor rotors quality using MS Excel program is discussed. The influence of the human factor on the FD-factor of the adjusted device was investigated by means of one-

factor analysis of variance. As a result, the hypothesis H1 about the presence of such influence is accepted, and the null hypothesis about the absence of the human factor influence on the integral estimation of the accuracy of the azimuthal gyroscope is confirmed. Results of the single-factor analysis of variance confirming the alternative hypothesis H1 on the significant effect of melting on the magnetic energy of the rotor blanks, are presented. The absence of the influence of difference in melting on the run-out time of the gyromotor in three orientations and on the values of consumption currents in the steady state mode is established. Two-factor analysis of variance is used in the study of the final FD-factor of the device. Results related to the effect on two independent variables — the human factor and the type of stator compound — are presented.

Keywords: analysis of variance, float gyroscope, precision, factor, gyromotor, hypothesis

REFERENCES

1. Sipenkov I.E., Fillipov A.Yu., Boldyrev Yu.Ya., Grigor'yev B.S., Zablotkiy N.D., Luchin G.A., Panich T.V. *Pret-sizionnyye gazovyye podshipniki* (Precision Gas Bearings), St. Petersburg, 2007, 504 p. (in Russ.)
2. Evstifeyeva O.M., Ignat'yev S.V. *GYROSCOPY AND NAVIGATION*, 2006, no. 2(53), pp. 96. (in Russ.)
3. Draper N., Smith H. *Applied Regression Analysis*, 3 Edition, John Wiley & sons, Inc., 1998 736 p.
4. Scheffe H. *Analysis of Variance*, Wiley, 1959, 477 p.
5. Peshekhonov V.G., Mironov Yu.V., Sharygin B.L. *Marine Radio-electronics*, 2003, no. 1(4). (in Russ.)
6. Alekseyev S.P., Zakharov I.G., Peshekhonov V.G., Mironov Yu.V., Sharygin B.L., Yatsenko S.V. *Sovremennoye sostoyaniye i problemy navigatsii i okeanografii "NO-2004"* (Current State and Problems of Navigation and Oceanography "NO-2004"), Proceedings of the conference, St. Petersburg, 2004, vol. 1, pp. 24–28. (in Russ.)
7. Fevraleva N.E. *Magnitno-tverdyye materialy i postoyannyye magnity* (Magnetic Hard Materials and Permanent Magnets), Kiev, 1969, 232 p. (in Russ.)
8. Livshits B.G., L'vov V.S. *Vysokokoertsitivnyye splavy na zhelezonikel'alyuminiyevoy osnove* (High Coercive Iron Nickel-Aluminum Alloys), Moscow, 1960, 156 p. (in Russ.)
9. Martynenko Yu.G. *International Soros Science Education Program*, 1997, no. 11, pp. 120–127. (in Russ.)
10. Butsyk A.Ya., Donetskaya Yu.V., Sharygin B.L. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 3(60), pp. 280–286. DOI 10.17586/0021-3454-2017-60-3-280-286. (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. Analysis of variance in the study of problems in small scale production of two-step floated gyroscopes. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 3. P. 235–241 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-235-241