

УДК 004.896:681.5.017

А.В. Белкин, А.Г. Борисов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КАНАЛА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассматриваются вопросы экспериментального исследования статической функции преобразования каналов многоканальной измерительной системы со связанными каналами, предназначенной для определения величины индукции магнитного поля, формируемого постоянными магнитами. Предлагается проводить определение параметров линейной модели статической функции преобразования на основе подхода, принятого при планировании активного эксперимента. Проводится исследование 4-канальной измерительной системы и определение параметров статической функции преобразования каждого из каналов измерительной системы.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы, статическая функция преобразования, планирование экспериментальных исследований, взаимовлияние каналов.

Введение. Одной из важнейших метрологических характеристик средства измерения является его статическая функция преобразования (СФП). При разработке средства измерений принимаются специальные меры по достижению максимальной линейности и стабильности СФП. Разработка многоканальных измерительных систем, в свою очередь, предусматривает отдельное нормирование метрологических характеристик каналов [1 - 4]. Тем не менее, в связи с постоянным расширением областей применения измерительных устройств и систем возникают ситуации, требующие учета взаимного влияния как каналов измерительной системы друг на друга, так и взаимного влияния объектов, параметры которых подлежат измерению. Особо важно учитывать подобное влияние в ситуациях, когда результаты измерений в каналах используются в дальнейшем для допускового контроля и принятия решения о годности или негодности контролируемого объекта.

Цель работы – повышение достоверности допускового контроля по результатам многоканальных измерений за счет индивидуальной калибровки измерительной системы.

Модель взаимосвязанных измерительных каналов. Объектом исследования в данной работе является многоканальная система автоматического контроля параметров магнитных меток с постоянными магнитами. Подобные метки находят применение в системах автоматической обработки документов (САОД) [5, 6] для кодирования

номеров шкафов или ящиков. Пример кассеты для хранения документов приведен на рисунке 1.

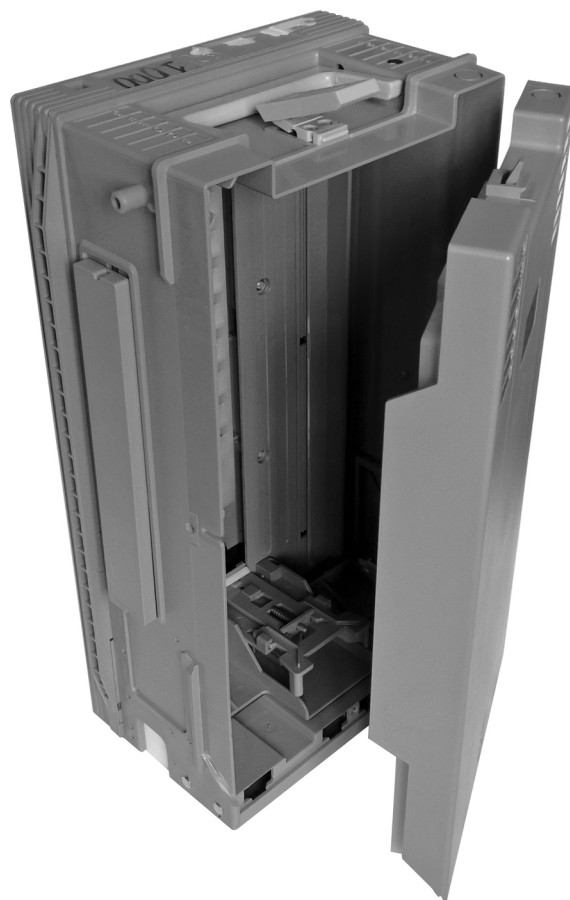


Рисунок 1 – Кассета, используемая с системе автоматической обработки документов

На левой боковой поверхности кассеты закреплена прямоугольная идентификационная метка.

Идентификационная метка с установленными в ней постоянными магнитами изображена на рисунке 2. Цилиндрические магниты устанавливаются в специальные слоты ИМ, где удерживаются за счет упругости конструктивных элементов – язычков. На кассету для хранения документов ИМ устанавливается таким образом, чтобы исключить случайное или преднамеренное смещение или выпадение постоянных магнитов, размещенных в метке.



Рисунок 2 – Постоянные магниты, размещенные в корпусе идентификационной метки

Бесконтактный считыватель метки позволяет определить содержимое контейнера без непосредственного доступа к документам. Достоинствами таких идентификационных меток (ИМ) являются:

- возможность бесконтактного считывания идентификационного кода;
- удобство обслуживания – для смены кода не требуется специального оборудования, постоянные магниты распределяются по слотам метки вручную;
- низкая стоимость устройства – ИМ не содержит электронных или микросэлектронных компонентов.

Считывающие устройства для подобных меток выпускаются серийно и широко распространены в современных системах автоматической обработки документов. Подобные устройства для считывания данных ИМ на сегодняшний день выполняются в основном на основе герконов, что позволяет определять наличие постоян-

ных магнитов в слотах ИМ без непосредственного контакта ИМ и считывателя. Применению герконов способствуют их относительная дешевизна и хорошая отлаженность схемы считывающего устройства.

Наряду с указанными выше достоинствами ИМ на основе постоянных магнитов обладают и рядом недостатков:

- магниты, расположенные в слотах ИМ, влияют друг на друга, поэтому для формирования корректной кодовой комбинации требуется соблюдать ряд правил. Следует отметить, что в связи с проблемами технической реализации правила являются сугубо организационными, что приводит к эпизодическому их нарушению. Метки, сформированные с нарушением правил установки кодирующих магнитов, не распознаются считывающими устройствами;
- магниты, используемые в ИМ, со временем теряют свои магнитные свойства, что также приводит к сбоям в распознавании контейнеров.

Попыткой повышения эффективности работы персонала, обслуживающего устройства хранения САОД, является создание автоматического контрольного устройства, выполняющего функции распознавания корректности задания кодов в ИМ, а также функции допускового контроля кодирующих магнитов, используемых в ИМ. Разработанное устройство (рисунок 3), представляющее собой систему автоматического контроля (САК), как любое средство измерений требует перед своим использованием калибровки.



Рисунок 3 – Система автоматизированного контроля идентификационных меток

Работы по калибровке САК ИМ были проведены СКБ РГРТУ осенью 2014 года.

Модель измерительных каналов.

В качестве модели СФП канала преобразования системы автоматического контроля пред-

лагается использовать модель вида:

$$N_i = a_{i0} + \sum_{j=1}^K a_{ij} B_j, \quad (1)$$

где N_i – результат измерения в i -м канале, i – номер измерительного канала, j – номер слота контролируемой метки, B_j – индукция МП, формируемого магнитом в j -м слоте метки, a_{ij} – коэффициент влияния МП магнита в j -м слоте метки на результат преобразования в i -м канале. Поскольку результат измерения представляет собой код аналого-цифрового преобразования, коэффициенты a_{ij} рассматриваемой модели являются размерными с размерностью 1/Тл.

Линейная модель хорошо согласуется с априорной информацией о линейности преобразования в измерительном канале САК, а также со свойствами магнитного поля (МП), в частности, со справедливостью принципа суперпозиции для магнитных полей [7].

Проведение традиционного многофакторного эксперимента и определение коэффициентов модели СФП на основе линейной регрессии не представляется возможным из-за отсутствия средств, позволяющих формировать постоянное магнитное поле произвольной величины и направления в ячейке идентификационной метки. Доступны лишь стандартные для используемых ИМ постоянные магниты, которые могут быть установлены в слоты метки. Причем каждый из доступных магнитов относится к одной из категорий: годный (магнит с параметрами, пригодными для использования в составе метки в САОД) и негодный (магнит, параметры которого вышли из допустимого диапазона и его наличие в идентификационной метке нарушает работу САОД)

Для получения параметров модели вида (1), однако, не требуется перебор всех возможных уровней, достаточно лишь получения двух точек, определяющих положение модели [8, 9]. Поэтому для экспериментального получения параметров модели предлагается подход, приближенный по условиям к активному многофакторному эксперименту.

Основу подхода составляет использование в ходе эксперимента группы магнитов из категории годных. Группа формируется таким образом, чтобы разброс характеристик входящих в нее магнитов был минимальным. Индукция МП, формируемого каждым из магнитов, включенных в группу, принимается в дальнейшем равной 1. Так как магниты могут быть установлены в слоты метки только двумя различными способами (различие заключается в ориентации полюсов магни-

та), одному из способов установки приписывается условная индукция +1, другому – -1.

Разброс значений реальной индукции МП, формируемого магнитами, при этом подходе может быть отнесен к погрешности воспроизводимости.

Модель (1) при данном подходе принимает вид

$$N_i = \tilde{a}_{i0} + \sum_{j=1}^K \tilde{a}_{ij} \tilde{B}_j, \quad (2)$$

в которой используются нормированные факторы $\tilde{B}_j = \frac{B_j}{B_v}$ (B_v – модуль средней индукции

входящих в группу годных магнитов) и, соответственно, нормированные коэффициенты влияния \tilde{a}_{ij} . Нормированные факторы и нормированные коэффициенты влияния безразмерны. Использование двух различных полярностей магнитов приводит к плану эксперимента, симметричному относительно начала координат в естественных единицах B_j , а поскольку система нормированных факторов также симметрична относительно начала координат, то нормированные и естественные коэффициенты влияния совпадают друг с другом по размеру [8]. Отличие заключается только в размерности: естественные коэффициенты имеют размерность, в то время как нормированные – безразмерны.

В результате план эксперимента формируется как план активного многофакторного эксперимента. Небольшое количество слотов для кодирующих магнитов (от 4 до 6) позволяет использовать ненасыщенный план и, в частности, провести полный факторный эксперимент. План эксперимента для определения параметров модели СФП для метки с 4-мя слотами приведен в таблице 1. Столбец, использующийся для определения свободного члена, в плане не показан. Строка плана №17 используется только для проверки адекватности модели.

Таблица 1 – План эксперимента

№	\tilde{B}_1	\tilde{B}_2	\tilde{B}_3	\tilde{B}_4
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	+1
3	-1	-1	+1	+1
4	-1	-1	+1	-1
5	-1	+1	+1	-1
6	-1	+1	+1	+1

Таблица 1 (продолжение)

№	\tilde{B}_1	\tilde{B}_2	\tilde{B}_3	\tilde{B}_4
7	-1	+1	-1	+1
8	-1	+1	-1	-1
9	+1	+1	-1	-1
10	+1	+1	-1	+1
11	+1	+1	+1	+1
12	+1	+1	+1	-1
13	+1	-1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1
15	+1	-1	-1	+1
16	+1	-1	-1	-1
17	0	0	0	0

Определение коэффициентов линейной модели. Особенностью плана является способ формирования строк: комбинация значений факторов представляет собой код Грея для номера строки, уменьшенного на единицу. Подобная взаимосвязь усложняет процедуру формирования плана эксперимента по сравнению с традиционным способом, но взамен предоставляет возможность переходить от эксперимента к эксперименту путем изменения положения всего лишь одного магнита в идентификационной метке. Это приводит к значительному снижению затрат времени на подготовку очередного эксперимента, а также сокращает риск повреждения метки, связанный с извлечением магнита из слота и повторной его установкой на место. Конструкция идентификационной метки не предполагает частой смены магнитов, поэтому указанный выше фактор механического износа является существенным.

Еще одной особенностью эксперимента, на этот раз связанной с режимом работы САК, является крайне низкая трудоемкость получения результатов эксперимента. Это связано с полной автоматизацией измерений и использованием современного арсенала электрических измерений неэлектрических величин. Корректировкой работы САК была достигнута возможность реализации многократных измерений по каждому из каналов. Итогом является возможность оценки дисперсии воспроизводимости с высокой точностью. Результаты одной из серий эксперимента представлены в таблице 2.

Результаты каждой серии представляют собой 32 измерения по каждому из 4-х каналов при фиксированной комбинации факторов (располо-

жении магнитов в ИМ), в таблице 2 приведена серия, соответствующая строке №1 плана эксперимента.

Серии объединялись по следующему принципу: из каждой серии выбирались соответствующие друг другу по номеру эксперимента в серии строки; из отобранных таким образом строк формировалась таблица откликов. Всего было получено 32 таблицы с откликами. Каждая из таблиц откликов обрабатывалась для получения коэффициентов влияния методом наименьших квадратов. Полученные коэффициенты дополнительно усреднялись по множеству.

Таблица 2 – Результаты серии экспериментов по 4 каналам САК

№	План	N_1	N_2	N_3	N_4
1	1	443	439	404	406
2	1	443	438	404	408
3	1	444	438	402	412
4	1	443	438	403	410
5	1	444	437	403	409
6	1	446	440	403	410
7	1	443	438	403	408
8	1	443	440	403	412
9	1	443	438	403	410
10	1	444	440	403	409
11	1	441	438	400	412
12	1	444	438	401	412
13	1	444	437	402	409
14	1	443	438	404	409
15	1	445	437	403	410
16	1	445	440	402	409
17	1	444	439	404	411
18	1	446	439	401	410
19	1	440	438	401	408
20	1	445	438	403	408
21	1	446	440	404	410
22	1	443	439	404	410
23	1	442	437	403	411
24	1	444	438	402	410
25	1	446	441	404	408
26	1	444	439	399	411
27	1	445	438	403	411
28	1	443	437	401	411
29	1	445	439	402	411
30	1	445	438	405	410
31	1	444	439	402	411
32	1	442	438	403	410

Итоговые коэффициенты сведены в таблицу 3, в которую добавлен также столбец свободных членов, определяющий постоянную составляющую

щую по каждому каналу преобразования.

Проверка адекватности полученной модели производилась в центре плана эксперимента (строка №17 плана, таблица 1), что является достаточным для линейной модели.

Таблица 3 – Коэффициенты модели СФП каналов преобразования САК

i	\tilde{a}_{i0}	\tilde{a}_{i1}	\tilde{a}_{i2}	\tilde{a}_{i3}	\tilde{a}_{i4}
1	506,4	59,1	3,5	0,3	0,0
2	502,6	3,6	58,7	3,1	-0,1
3	505,7	1,2	12,3	83,7	7,8
4	503,3	-0,4	-1,2	8,2	88,0

Проведение серии экспериментов по описанной выше методике привело к результатам, представленным в таблице 4. Второй столбец таблицы содержит результаты усреднения серии из 32 экспериментов с меткой без магнитов (эксперимент, соответствующий строке плана №17), третий столбец – оценку дисперсии воспроизводимости полученного результата. Четвертый столбец таблицы 4 содержит оценки остаточной дисперсии, а пятый – отношение остаточной дисперсии к дисперсии воспроизводимости, позволяющее оценить адекватность полученной модели.

Таблица 4 – Проверка адекватности модели

i	N_{im}	S_d	S_o	S_o/S_d
1	506,8	2,29	3,74	1,64
2	501,8	2,29	2,76	1,20
3	506,6	2,04	2,70	1,33
4	500,7	2,13	3,46	1,68

Поскольку значение критерия Фишера для уровня значимости 0,95 составляет 1,85 (при степени свободы числителя 27 и знаменателя – 31), то оснований отвергать гипотезу об адекватности модели нет. Коэффициенты, представленные в таблице 3, позволяют сформировать аналитическое описание СФП для каждого канала САК.

Заключение. Применение подхода, основанного на технике активного эксперимента, для определения параметров линейной модели СФП канала измерительной системы показало свою работоспособность, несмотря на допущения, сделанные в фазе планирования эксперимента. Относительно большой разброс отношений остаточной дисперсии и дисперсии воспроизводимости, а также близость некоторых отношений к пороговому значению связаны, в первую оче-

редь, с упрощением модели объекта измерения – постоянного магнита. Полученные модели измерительных каналов позволят увеличить достоверность допускового контроля магнитов, используемых в ИМ САОД, что, в свою очередь, снизит вероятность применения кассет с нераспознаваемыми метками в процессе эксплуатации систем обработки документов. Разработанная процедура калибровки измерительных каналов рекомендована для индивидуальной настройки САК в процессе производства.

Библиографический список

- ГОСТ 8.009–84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики. Средств измерений. – М.: Изд.-во стандартов, 1986. – 27 с
- О калибровке измерительных каналов измерительных систем / А.А. Данилов, Ю.В. Кучеренко, Т.А. Федосеева // Измерительная техника. – 2011. – № 5. – С. 61-63.
- Абрамов О.К., Клочков А.Я., Сафонов П.В. Погрешности цифровых средств измерений и интеллектуальных измерительных систем при наличии шумов и помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2011. № 35. С. 47-54.
- Тулутова В.В. Аппроксимация градуировочных характеристик измерительных каналов в условиях малой чувствительности к измеряемым параметрам // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика [Электронный ресурс] / Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г., Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2011, № гос. регистрации – 0321101160, Режим доступа: http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/39138/44382/stat_Shlychkov.pdf, свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 12.07.2015).
- High capacity, high volume cash dispenser [Electronic resource]. ARCA. [Official website] URL: http://arca.com/sites/default/files/products/resources/ARCA_Brochure_NCR_5636_0.pdf (accessed: 10.06.2015).
- Multi-denomination bill and coin changers operation manual [Electronic resource]. American changer corp. [Official website] URL: <http://www.americanchanger.com/pdfs/AC7500.1> (accessed: 10.12.2014).
- Сивухин Д.В. Общий курс физики. — Изд. 4-е, стереотипное. — М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2004. — Т. III. Электричество. — 656 с.
- Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л. Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
- Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. М. Высшая школа, 2002. 348 с.