

УДК 519.24.681

И. И. Деревянко

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара***ОБРАБОТКА И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Проведено порівняльний статистичний аналіз магнітометричних вимірювань зварних з'єднань чотирьох однотипних блоків при їх контролі у 2011 і 2012 роках.

Ключові слова: зварні з'єднання, статистичний аналіз, магнітометричні вимірювання, напруженість магнітного поля, кількісні оцінки.

Проведен сравнительный статистический анализ магнитометрических измерений сварных соединений четырех однотипных блоков при их контроле в 2011 и 2012 годах.

Ключевые слова: сварные соединения, статистический анализ, магнитометрические измерения, напряженность магнитного поля, количественные оценки.

The comparative statistical analysis was held for magnetometric measurements which were taken on welded joints of the four similar blocks in 2011 and 2012.

Key words: welded joints, statistical analysis, magnetometer measurements, magnetic field strength, the quantitative assessment.

Введение. В настоящее время ракетно-космическая техника представляет собой множество агрегатов, различающихся по своим конструктивным особенностям. Среди них особое место занимают металлические конструкции со сварными соединениями как самое ненадежное звено. Как следствие этого неразрушающий контроль качества и определения свойств сварных соединений является одной из важных задач оценки надежности таких агрегатов. Одним из методов контроля сварных соединений является метод магнитной памяти металла, который имеет ряд преимуществ перед другими [1].

Магнитометрические измерения на основе метода магнитной памяти металла содержат информацию о состоянии (дефектности) и качестве (напряженно-деформированности) сварных соединений, а разности магнитометрических измерений содержат информацию об аномальных измерениях и аномальных участках [2]. Полученные путем сканирования измерителя по окружности сварного соединения измерения представляют собой не совсем обычные выборки случайных величин: они ограничены по размеру, за последней точкой измерений следует первая и между измерениями имеет место статистическая связь. Измерения можно рассматривать как сумму трех составляющих: 1) детерминированной или медленно меняющейся стохастической функции $S_{0j}(k)$; 2) случайной автокоррелированной составляющей $\Delta S_j(k)$, характеризующей флуктуационные изменения напряженно-деформированного состояния сварного соединения; 3) измерительный шум, характеризующий приборные ошибки и неконтролируемое влияние внешней среды. Математическую модель измерений можно представить в виде

$$x_j(k) = S_{0j}(k) + \Delta S_j(k) + A_j(k) + n_j(k),$$

где k – номер измерения (характеризующий координату точки измерений на сварном соединении); j – номер соединения в проконтролированном блоке; $A_j(k)$ – аномальные измерения или аномальные участки.

Сравнительному статистическому анализу подвергаются измерения сварных соединений, полученных в 2011 и 2012 годах на четырех однотипных блоках. Каждый из блоков содержит 45–50 соединений и каждому ставится в соответствие магнитометрические выборки объемом 150–250 измерений. Магнитометрические измерения сварного соединения представляет собой случайные величины с неизвестными статистическими закономерностями. Их последовательность рассматривается как нестационарный дискретный процесс ограниченной длительности n_j , причем в одном и том же блоке в большинстве случаев $n_j \neq n_i, i \neq j$, неизвестны связи номеров точек с координатами их на сварных соединениях, неизвестно также – выборки замкнуты или не замкнуты. При такой априорной неопределенности возникает задача не только оценки статистических параметров, но и исследования их статистических закономерностей – законов распределения вероятностей как последовательностей автокоррелированных случайных величин.

В этих условиях для исследования магнитометрических измерений сварных соединений выбран визуально-аналитический метод формирования данных для оценки измерений каждого сварного соединения, сравнения оценок разных соединений каждого блока, сравнения измерений 2011 и 2012 годах, сравнения измерений исследуемых четырех блоков. Эти данные представляются в виде графиков и таблиц оценок статистических параметров. Сварные соединения, выполненные при одной и той же технологии, должны быть похожими друг на друга, следовательно должны иметь что-то общее и выборки магнитометрических измерений сварных соединений по крайней мере одного и того же блока.

Обработка и статистический анализ. На первом этапе анализа проведен визуально-сравнительный анализ сварных соединений каждого блока. На рис. 1 представлены графики наложения измерений сварных соединений одного блока в 2011, 2012 годах и графики наложения разностей магнитометрических измерений.

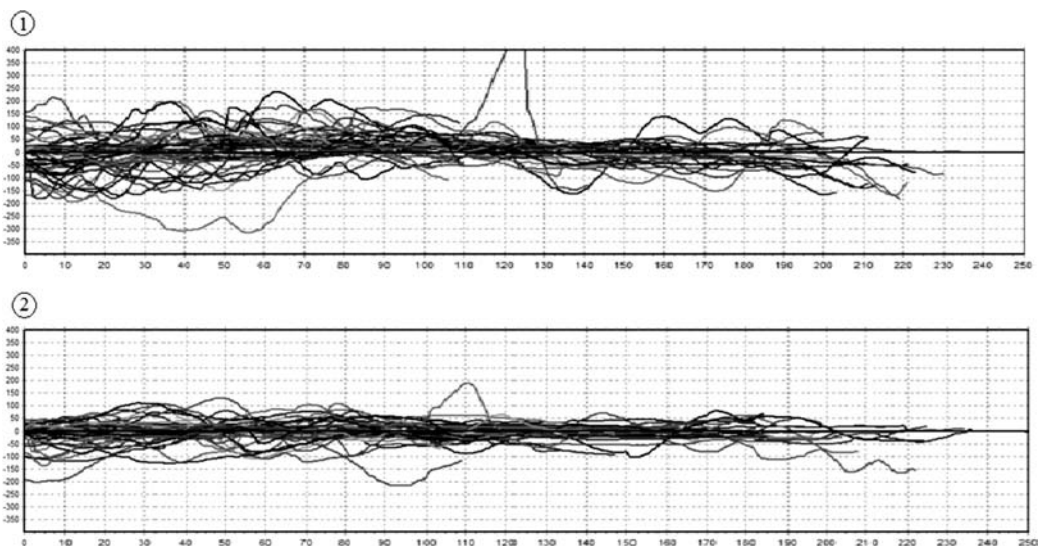


Рис. 1. Наложения кривых магнитометрических измерений в 2011 г. – (1), 2012 г. – (2)

В результате анализа выделены отдельные сварные соединения 3–5 штук в каждом блоке, измерения которых явно отличаются от основной массы (табл. 1). Таблица содержит номера сварных соединений, общее количество сварных соединений, выделенных при визуальном наложении, количество сварных соединений, выделенных в 2011 и 2012 годах (аномальности измерений повторяются при по-

вторном контроле). Выделенные сварные соединения исследованы отдельно, построены их графики и определены отличительные признаки и особенности.

Таблица 1

Сварные соединения выделенные при визуальном наложении
(СС – сварные соединения)

№ блока – год	№ сварных соединений, выделенных при визуальном наложении					Общее кол-во СС, выделенных при визуальном наложении в блоке	Кол-во СС, выделенных при визуальном наложении в 2011 и 2012 годах (повторно аномальные)
	135	140	141	116	136		
БЗОК 1 – 2011	135	140	141	116	136	5	3
БЗОК 1 – 2012	135	140	141	143	—	4	3
БЗОК 2 – 2011	242	224	236	—	—	3	1
БЗОК 2 – 2012	242	207	223	247	—	4	1
БЗОК 3 – 2011	323	315	319	322	327	5	2
БЗОК 3 – 2012	323	315	336	344	345	5	2
БЗОК 4 – 2011	434	455	438	444	—	4	2
БЗОК 4 – 2012	434	455	435	440	—	4	2

Для объективного анализа измерений агрегата все сварные соединения, выделенные при наложении, исключены. При этом измерения данных сварных соединений необходимо перепроверить (провести повторный контроль), а при повторении результатов обратить повышенное внимание и выяснить причину их аномального отличия.

На втором этапе анализа исследованы характеристики всех измерений агрегата (4 блока) как единого целого (агрегат как объект контроля). После исключения измерений сварных соединений, выделенных визуально, проанализирована остальная совокупность измерений. Для измерений агрегата построены две гистограммы магнитометрических измерений 2011 и 2012 годов и получены оценки средних значений и выборочных стандартных отклонений (разбросы измерений) (рис. 2).

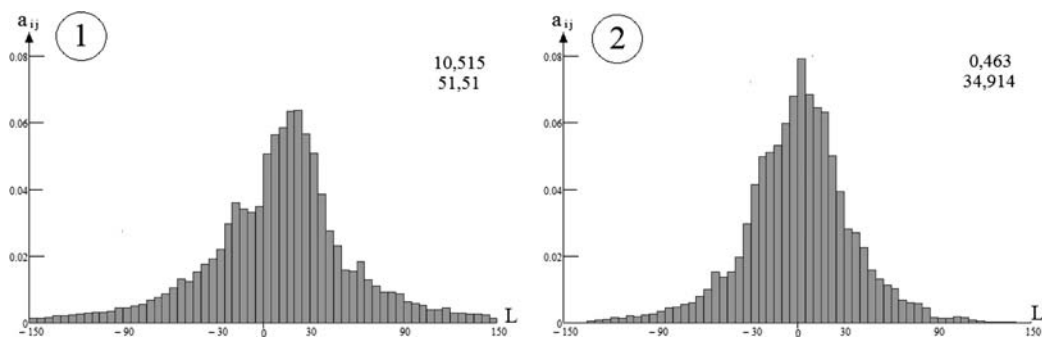


Рис. 2. Гистограммы магнитометрических измерений агрегата как единого целого в 2011 г. – (1), в 2012 г. – (2)

Гистограммы построены как отклонения измерений от среднего значения, при этом в правом верхнем углу гистограмм фиксируются их среднее значение и разброс. Количество измерений для каждого из годов, по которым строятся гистограммы, составляет приблизительно 30 тыс. Гистограммный интеграл Δx_L выбран равным 5.

Проведен анализ измерений агрегата по средним значениям сварных соединений и выборочным разбросам. Построены гистограммы средних значений магнитометрических измерений каждого сварного соединения (рис. 3). При этом количество измерений 165–170 значений, первое значения в правом углу – это среднее агрегата средних значений сварных соединений, второе значение – разброс средних значений в агрегате.

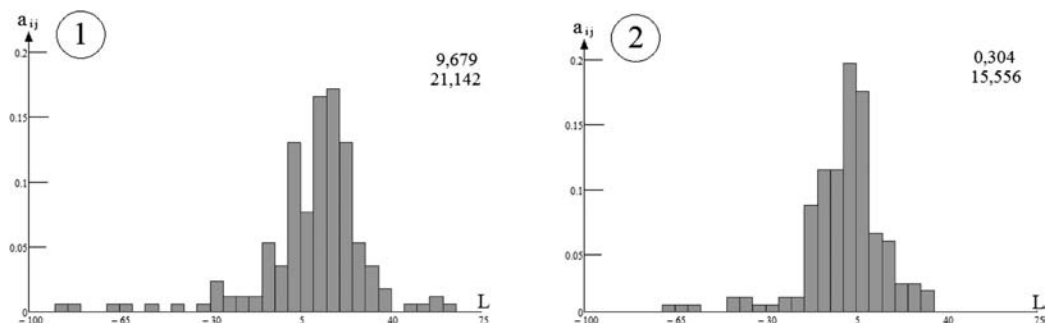


Рис. 3. Гистограммы средних значений магнитометрических измерений агрегата как единого целого в 2011 г. – (1), в 2012 г. – (2)

Аналогично средним значениям исследованы разбросы в сварных соединениях. Построены гистограммы (рис. 4), где первое значения в правом углу – это среднее значений разбросов сварных соединений агрегата, второе значение – разброс разбросов в агрегате.

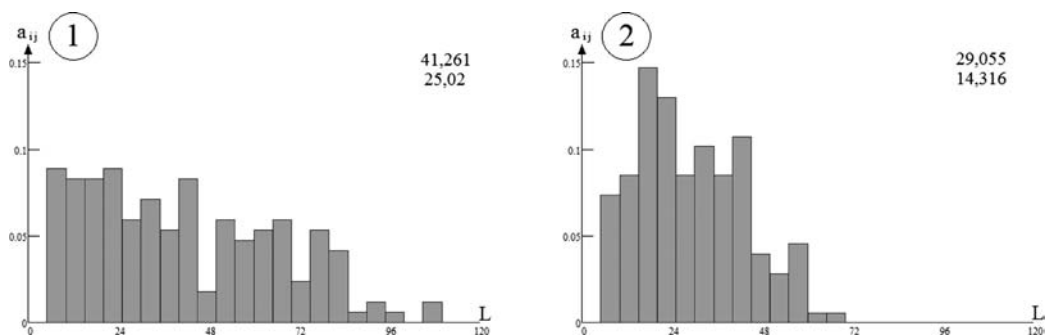


Рис. 4. Гистограммы разбросов значений магнитометрических измерений каждого сварного соединения агрегата как единого целого в 2011 г. – (1), в 2012 г. – (2)

Из рассмотрения гистограмм видно, что характеристики измерений агрегата в 2011 и 2012 годах отличаются. По всем исследуемым параметрам (измерения агрегата, средние значения сварных соединений, разбросы) прослеживается тенденция уменьшения значения разбросов каждого из параметров, среднее значение также уменьшается и стремится к нулю. Гистограммы разбросов значений магнитометрических измерений каждого сварного соединения агрегата как единого целого имеют значительные различия. По результатам анализа предполагается, что измерения проводились приборами, которые имеют различную настроечную калибровку, или характеристики измерений сварных соединений изменились за прошедшее время (произошла нормализация напряженно-деформированного состояния агрегата).

На третьем этапе анализа исследованы характеристики всех измерений блоков (4 блока в 2011 и 4 – в 2012 годах) как единого целого (блок как объект контро-

ля). Для каждого из 8 блоков построены гистограммы магнитометрических измерений (рис. 5 – как пример представлены две гистограммы блока 1 в 2011 и 2012 годах) и получены оценки средних значений и выборочных стандартных отклонений (разбросы измерений). В табл. 2 представлены оценки средних значений измерений соединений каждого блока и их разбросов.

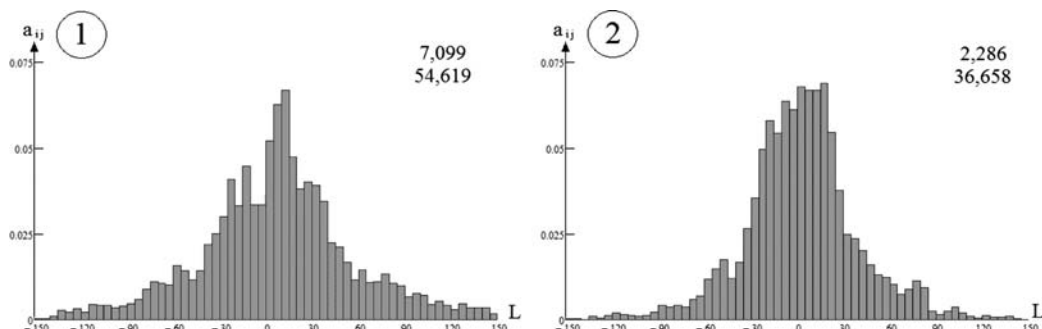


Рис. 5. Гистограммы магнитометрических измерений блока 1 как единого целого в 2011 г. – (1), в 2012 г. – (2)

Таблица 2

Таблица оценок статистических показателей магнитометрических измерений

Год	№ блока	$\bar{x}_{изм}^*$	$\sqrt{D_{изм}^*}$
2011	блок 1	7,099	54,619
	блок 2	7,468	55,765
	блок 3	6,354	51,640
	блок 4	19,755	42,690
2012	блок 1	2,286	36,658
	блок 2	-2,457	33,141
	блок 3	2,858	26,967
	блок 4	-0,749	40,206

Построены гистограммы разностей магнитометрических измерений (рис. 6 – как пример представлены две гистограммы блока 1 в 2011 и 2012 годах).

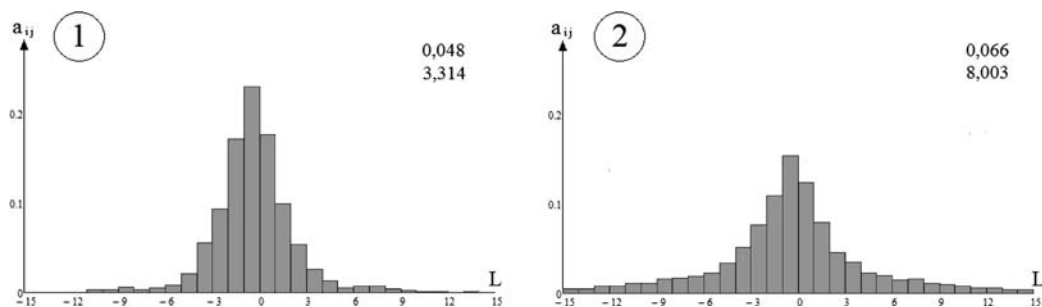


Рис. 6. Гистограммы разности магнитометрических измерений блока как единого целого в 2011 г. – (1), в 2012 г. – (2)

Далее исследованы измерения блоков агрегата по средним значениям сварных соединений и выборочным разбросам. Для каждого блока построены 8 гистограмм средних значений магнитометрических измерений каждого сварного сое-

динения. Особенностью построения гистограмм является количество измерений 44–50 значений. Также построены 8 гистограмм разбросов в сварных соединениях блоков.

Оценки статистических показателей средних и разбросов сварных соединений каждого блока представлены в табл. 3, где \bar{x}^* – среднее блока средних значений сварных соединений; $\sqrt{D_{\bar{x}}^*}$ – разброс средних; $\sqrt{D^*}$ – средний разброс сварных соединений; $\sqrt{D_D^*}$ – разброс разбросов.

Таблица 3

Таблица оценок статистических показателей средних и разбросов сварных соединений блоков как единого целого

Измерения	\bar{x}^*	$\sqrt{D_{\bar{x}}^*}$	$\sqrt{D^*}$	$\sqrt{D_D^*}$
Блок 1				
Магнитометрические измерения в 2011	5,391	19,8	45,11	27,992
Магнитометрические измерения в 2012	0,883	17,837	29,501	17,176
Разность измерений в 2011	0,07	0,448	8,42	4,56
Разность измерений в 2012	–0,001	0,259	5,67	3,206
Блок 2				
Магнитометрические измерения в 2011	7,879	24,33	46,406	22,505
Магнитометрические измерения в 2012	–2,801	15,793	27,432	12,322
Разность измерений в 2011	–0,067	0,267	7,75	4,084
Разность измерений в 2012	0,005	0,17	4,38	1,814
Блок 3				
Магнитометрические измерения в 2011	5,049	24,557	40,379	22,711
Магнитометрические измерения в 2012	3,035	10,473	23,963	9,818
Разность измерений в 2011	–0,001	0,248	7,85	4,108
Разность измерений в 2012	0,02	0,237	3,5	1,516
Блок 4				
Магнитометрические измерения в 2011	19,055	9,934	33,74	24,522
Магнитометрические измерения в 2012	0,081	16,537	34,624	14,66
Разность измерений в 2011	–0,002	0,226	10,04	7,912
Разность измерений в 2012	0,051	0,279	5,52	2,64

Из анализа гистограмм видно, что хотя статистика по годам измерений несколько изменяется, но не на столько, чтобы она стала диагностическим признаком изменения качества контролируемых блоков в агрегате. При этом из анализа гистограмм и таблиц, рассмотренных на третьем этапе анализа, выделены следующие особенности и характеристики блоков:

1) при сравнении четырех блоков 2011 года видно, что блоки отличаются в своих характеристиках друг от друга незначительно, но статистика блока 4 отличается от блоков 1–3 значительно и характеризуется максимальным отличием среднего средних от нуля и минимальным средним разбросов. В 2012 году блок 4 также отличается от остальных и характеризуется максимальным средним разбросов. Исходя из этого, на аномальное отличие блока 4 надо обратить внимание и выяснить причину;

2) при сравнении блоков, проконтролированных в 2011 с блоками, проконтролированными в 2012, видно тенденцию уменьшения значения разбросов средних приблизительно в 1,2 раза, средних разбросов приблизительно в 1,6 раз. Данное явление подтверждает выводы, сделанные при анализе агрегата в целом (вто-

рой этап анализа). При этом блок 4 не подлежит данной тенденции уменьшения разбросов, разбросы в блоке 4 в 2012 году выше разбросов в 2011 году;

3) при анализе результатов сравнения блоков по разности магнитометрических измерений следует обратить внимание на резкое изменение разбросов разностей как свидетельство сильной автокорреляции магнитометрических измерений.

На четвертом этапе анализа проведено исследование измерений сварных соединений (44–50 сварных соединений в каждом блоке) в отдельности (сварное соединение как объект контроля). Оценены статистические параметры каждого сварного соединения: выделена детерминированная составляющая, оценена автокоррелированная составляющая. Измерения представляют собой стационарный процесс $S_0(k) = S_0$, оценены средние значения, выборочные разбросы и коэффициенты автокорреляции (табл. 5 – фрагмент).

Сравнивая показатели, можно выделить аномальные сварные соединения, которые отличаются от основной массы (пример: сварные соединения 120, 124, 134 блока 1 отличаются от большинства).

Таблица 5

Фрагмент таблицы оценок статистических показателей сварных соединений

Блок 1 – 2011								
№	СС	n	Магнитометрические измерения			Разность измерений		
			\bar{x}^*	\sqrt{D}^*	\bar{r}^*	\bar{y}^*	\sqrt{D}^*	\bar{r}^*
1	101	200	-1,34	10,12	0,96	0,04	2,84	0,12
2	102	218	4,05	9,90	0,96	0,02	2,27	-0,03
3	103	218	4,76	17,11	0,99	0,05	2,82	0,49
4	104	218	16,92	10,61	0,97	-0,04	2,44	0,11
5	105	202	-5,66	15,17	0,98	-0,01	2,51	0,05
6	106	222	10,23	17,84	0,97	0,00	2,98	0,48
7	107	206	8,90	28,37	0,99	-0,07	3,31	-0,02
20	120	196	20,74	106,79	0,98	-0,35	14,32	0,68
24	124	212	12,25	76,27	0,98	0,60	9,21	0,69
34	134	120	30,17	67,19	0,98	0,34	11,73	0,50

Далее выделены аномальные участки, т. е. оценены $A(k_1 + i)$ – их координаты, интенсивность и длительность. Полагая, что нормальные сварные соединения не имеют аномальных измерений, для их выделения (обнаружения) используется известный в математической статистике метод Томпсона ($P = 0,95$).

В результате получена таблица, которая содержит номер сварного соединения, каждая клеточка таблицы – это аномальный участок, который состоит из трех значений: 1) координаты аномального участка; 2) количество измерений в аномальном участке; 3) интенсивность (отношение максимального дефектного измерения к порогу). Приставка «n» означает отрицательные аномальные участки. Пример представлен в табл. 6.

Табл. 7 – это визуальное представление аномальных участков. Вертикальная ось представляет собой список сварных соединений, горизонтальная – интенсивность аномального участка. Второй столбик указывает на число аномальных участков на сварном соединении. Таким образом, проходит визуальная классификация опасности сварных соединений (величина интенсивности характеризует опасность образования дефекта). Количество аномальных участков в каждом блоке приблизительно от 200 до 260 зон. Сварное соединение может содержать различное количество аномальных участков (от 1 до 20 участков).

Таблиця 6

Фрагмент таблиці аномальних участків, виділених по різниці измерень

Блок 1 – 2011. Разность магнитометрических измерений						
№ блока. № шва	координаты / число измерений / max превышение порога					
	1	2	3	4	5	6
1.101	82/1/1,5	—	—	—	—	—
1.102	79/1/1,29	—	—	—	—	—
1.105	93/1/1,57	—	—	—	—	—
1.106	н15/1/1,071	34/1/1,07	—	—	—	—
1.107	16/1/2,00	н125/1/1,71	—	—	—	—
1.111	н2/1/2	125/1/6,5	—	—	—	—
1.114	50-53/4/1,71	58/1/1,29	н148/1/1,07	—	—	—
1.115	35/1/1,21	38/1/1,36	40/1/2,36	н42/1/1,14	45/1/1,5	48/1/1,07
1.116	17/1/1,21	20/1/1,5	23-25/3/1,36	н59/1/1,07	н65/1/1,43	76-88/13/3,29
1.117	29/1/1,07	—	—	—	—	—

Таблиця 7

Фрагмент таблиці візуального представлення аномальних участків

	1,07	1,14	1,21	1,29	1,36	1,43	1,5	1,57	1,64	1,71	1,79	1,86	1,93	2	2,07	2,14	2,21	2,29	2,36	2,5	2,57	2,64	2,79	2,86	3,29	3,43	3,5	3,57	3,71	3,93	4,21	4,71	5,64	6,21	6,43	6,5	6,64	6,79	7,79	9,79	11,1						
105								■																																							
106										■																																					
107											■			■																																	
108																																															
109																																															
110																																															
111																																															
112									■		■																																				
113			■																							■																					
114	■			■						■																																					
115	■	■	■	■	■	■	■				■	■	■						■																												
116	■	■	■	■	■	■	■																																								

На пятом этапе анализа рассмотрены автокорреляционные функции измерений. Учитывая их замкнутость, определены две частные функции: одна по половине измерений $k = 1, 2, \dots, n/2$, вторая по второй половине $i = n - k$. Примеры представлены на рис. 7. Большинство сварных соединений имеет автокорреляционную функцию, представленную на первом графике. Но имеют место сварные соединения, которые отличаются (в каждом блоке выделено 5–10 сварных соединений, функции автокорреляции которых отличаются от большинства), их автокорреляционная функция представлена на втором графике. Над графиком автокорреляционной функции отображены оценки статистических показателей сварного соединения.

Статистические закономерности коэффициентов автокорреляции сварных соединений каждого блока представлены в табл. 8, где $\sqrt{r^*}$ – среднее коэффициентов автокорреляции; $\sqrt{D_r^*}$ – разброс коэффициентов автокорреляции.

Из анализа таблицы видно, что магнитометрические измерения всех без исключения сварных соединений четырех блоков, проконтролированных в 2011 и 2012 году, сильно коррелированы. Средний коэффициент автокорреляции двух

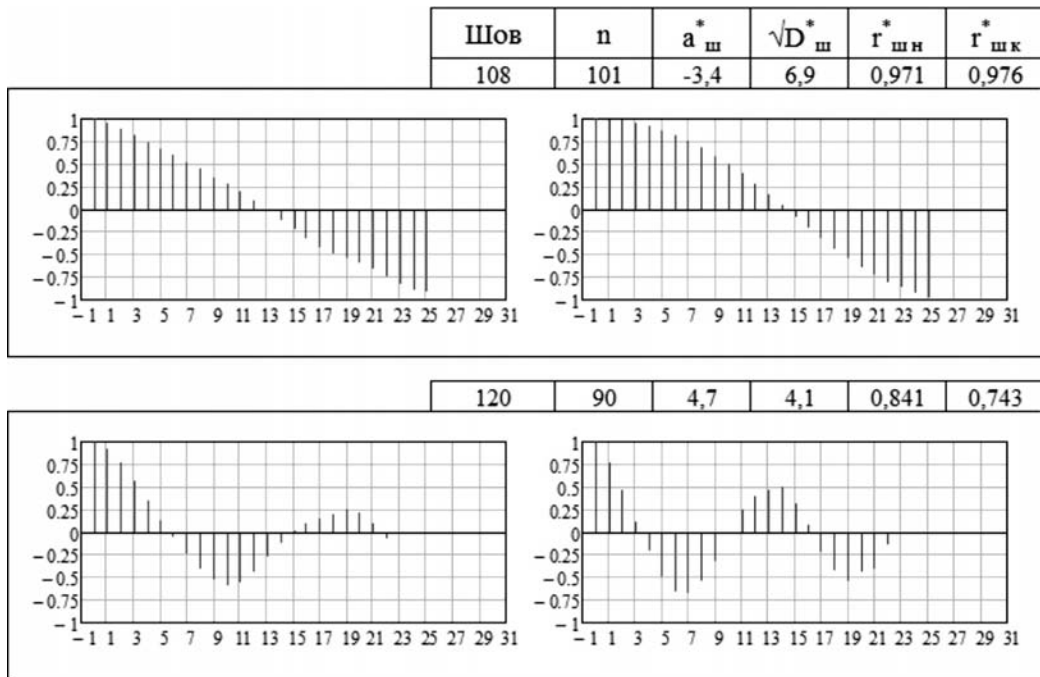


Рис. 7. Функции автокорреляции сварных соединений

Таблица 8

Таблица оценок статистических показателей коэффициентов автокорреляции

Измерения	$\sqrt{r^*}$	$\sqrt{D_r^*}$	Измерения	$\sqrt{r^*}$	$\sqrt{D_r^*}$
Блок 1			Блок 3		
Магнитометрические измерения в 2011	0,98	0,011	Магнитометрические измерения в 2011	0,981	0,012
Магнитометрические измерения в 2012	0,981	0,014	Магнитометрические измерения в 2012	0,98	0,013
Разность измерений в 2011	0,411	0,256	Разность измерений в 2011	0,414	0,288
Разность измерений в 2012	0,453	0,314	Разность измерений в 2012	0,439	0,25
Блок 2			Блок 4		
Магнитометрические измерения в 2011	0,98	0,01	Магнитометрические измерения в 2011	0,977	0,016
Магнитометрические измерения в 2012	0,962	0,145	Магнитометрические измерения в 2012	0,984	0,013
Разность измерений в 2011	0,457	0,234	Разность измерений в 2011	0,379	0,311
Разность измерений в 2012	0,528	0,228	Разность измерений в 2012	0,574	0,206

соседних измерений равен 0,96–0,99, а средний коэффициент автокорреляции двух соседних значений разностей измерений в большинстве случаев примерно в 2 раза меньше (0,3–0,5). Средние коэффициенты автокорреляции в 2011 году ниже аналогичных коэффициентов в 2012 году.

Выводы. Проведен статистический анализ выборок магнитометрических измерений и их разностей четырех блоков, проконтролированных в 2011 и 2012 годах, и выделены следующие особенности.

1. Установлено, что визуальный анализ графического представления магнитометрических измерений и их первых разностей позволяет выявлять 3–5 свар-

ных соединения в каждом блоке, которые существенно отличаются от основной массы. Для объективного анализа измерений агрегата эти сварные соединения необходимо исключить. Очевидно, что такие соединения подлежат вторичному (повторному) контролю, а при повторении результатов необходимо обратить повышенное внимание и выяснить причину их аномального отличия.

2. Получены интегральные показатели магнитометрических измерений агрегата и блоков как объектов контроля. Это их гистограммы, среднее значение и разброс средних, среднеквадратичные оценки разброса измерений.

2.1. При анализе агрегата как объекта контроля видно, что характеристики измерений агрегата в 2011 и 2012 годах отличаются. Прослеживается тенденция уменьшения значения разбросов, среднее значение также уменьшается и стремится к нулю. По результатам анализа предполагается, что измерения проводились приборами, которые имеют различную настроечную калибровку, или характеристики измерений сварных соединений изменились за прошедшее время (произошла нормализация напряженно-деформированного состояния агрегата).

2.2. При анализе блоков как объектов контроля видно, что при сравнении четырех блоков одного года они отличаются в своих характеристиках друг от друга. Характеристики блоков 1–3 отличаются незначительно, в то время как характеристика блока 4 значительно отличается от остальных. Исходя из этого, на аномальное отличие блока 4 надо обратить внимание и выяснить причину.

При сравнении блоков, проконтролированных в 2011 году, с блоками, проконтролированными в 2012 году, видно тенденцию уменьшения значения разбросов средних приблизительно в 1,2 раза, средних разбросов приблизительно в 1,6 раз. Данное явление подтверждает выводы, сделанные при анализе агрегата в целом (выводы п. 2.1). При этом блок 4 не подлежит данной тенденции уменьшения разбросов, разбросы в блоке 4 в 2012 году выше разбросов в 2011 году.

При анализе результатов сравнения блоков по разности магнитометрических измерений следует обратить внимание на резкое изменение разбросов разностей как свидетельство сильной автокорреляции магнитометрических измерений.

3. При анализе сварных соединений как объектов контроля проведено сравнение их информативных параметров (среднее значение, среднеквадратичский разброс измерений, среднее разностей измерений и разброс разностей). При этом выделены аномальные сварные соединения, которые значительно (на порядок) отличаются от основной массы (на них необходимо обратить внимание).

Проанализированы аномальные измерения или участки сварных соединений, определено количество аномальных участков с определением их координат, количества и интенсивности.

4. Измерения всех без исключения соединений четырех блоков, проконтролированных в 2011 и 2012 годах, сильно коррелированы. Коэффициент корреляции двух соседних измерений равен 0,98–0,99, а коэффициент корреляции двух соседних разностей в большинстве случаев примерно в 2 раза меньше (0,3–0,5), редко 0,1–0,25. Рассмотрены автокорреляционные функции измерений, выделены функции автокорреляции, которые отличаются от большинства.

Библиографические ссылки

1. Дубов А. А. Физические основы метода магнитной памяти металла / А. А. Дубов, В. Т. Власов. – М. : ТИССО, 2004.
2. Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов / А. А. Дубов, Е. А. Демин, А. М. Миляев, О. М. Смелов // Газовая промышленность. – 2002. – № 2.

Надійшла до редколегії 05.10.2013.