

## Раздел I. Системы управления и моделирование

УДК 681.325:621.317.743

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-6-18

**В.Г. Галалу, С.А. Киракосян, Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер,  
И.И. Турулин**

### **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ УСРЕДНЕНИЙ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ**

*Для повышения качества производимой продукции приходится совершенствовать все технологические процессы, что требует повышения точности всего измерительного тракта в целом. Для этого приходится тщательно анализировать систематические, случайные и флуктуационные погрешности в измерительном канале и принимать все меры для их уменьшения. Радикальным средством повышения точности проведенных измерений является цифровая фильтрация или усреднение промежуточных измерений (наблюдений) по определённым правилам. Целью работы является сравнительная оценка качества подавления близкой к реальной шумовой помехи при использовании восьми наиболее известных методов усреднения. Предложены модель измерительного тракта и общая структурная схема моделирования процесса измерения на ЭВМ при воздействии случайной помехи для восьми алгоритмов усреднения. В качестве критерия оценки качества метода усреднения приняты отношения дисперсий абсолютных погрешностей и средних квадратических отклонений до вычислительного устройства и после применения заданного алгоритма усреднения. По результатам моделирования сделаны следующие выводы. 1. Все алгоритмы усреднения обеспечивают подавление случайных составляющих погрешности сложной помехи до уровня 40–60 дБ. Лучшими являются три алгоритма: среднее арифметическое AP, а-усечённое среднее AV5 и а-винзоризированное среднее AB5, которые предусматривают отбрасывание 5 % аномальных результатов. При увеличении числа наблюдений коэффициенты подавления пропорционально растут. 2. Время выборки должно быть кратно длительности периода сети переменного тока 50 Гц (20 мс). Оптимальное количество наблюдений (измерений) – 100–128, при 128 измерениях операция деления сводится к простому сдвигу, и результат усреднения может быть выдан через 1–2 мкс. 3. При экспериментальном применении метода усреднения AP для фильтрации сильно зашумленного измерительного сигнала в линии связи длиной 800 м наблюдалось снижение разброса выходных кодов АЦП с  $\pm 3,5\%$  до  $\pm 0,1\%$  после фильтрации (AP, 64 измерения за 40 мс).*

*Шумы; помехи; дисперсия; усреднение; моделирование; коэффициент подавления; а-усечённое среднее.*

**V.G. Galalu, S.A. Kirkosyan, Al-Karawi Hussein Sh. Mogheer, I.I. Turulin**

### **COMPARATIVE EVALUATION OF AVERAGING METHODS FOR FILTERING MEASUREMENT SIGNALS**

*To improve the quality of manufactured products, it is necessary to improve all technological processes, which requires increasing the accuracy of the entire measuring path as a whole. For this it is necessary to carefully analyze systematic, random and fluctuating errors in the measurement channel and take all measures to reduce them. Digital filtering or averaging of intermediate measurements (observations) according to certain rules is a radical means of improving the accuracy of measurements performed. The aim of this work is to compare the quality of suppression of near-real noise interference using the eight most well-known averaging methods. A model*

of the measurement path and a general block diagram for modeling the measurement process on a computer under the influence of random interference are proposed for eight averaging algorithms. As a criterion for evaluating the quality of averaging methods, the ratios of absolute error variances and mean square deviations before the computing device and after applying the specified averaging algorithm are taken. Based on the simulation results, the following conclusions are made. 1. All averaging algorithms provide suppression of random error components of complex interference to the level of 40–60 dB. Three algorithms are the best: arithmetic mean AR, a-truncated mean AU5 and a-tenderized mean AB5, which provide for the suppression of 5 % of anomalous results. With an increase in the number of observations, the suppression coefficients increase proportionally. 2. The sampling time must be a multiple of the duration of the 50 Hz AC mains period (20 ms). The optimal number of observations (measurements) is 100–128; with 128 measurements, the division operation is reduced to a simple shift, and the averaging result can be obtained in 1–2  $\mu$ s. 3. When experimentally applying the AR averaging method for filtering a highly noisy measurement signal in a communication line with a length of 800 m, a decrease in the spread of ADC output codes was observed from  $\pm 3.5$  % to  $\pm 0.1$  % after filtering (AR, 64 measurements in 40 ms).

Noise; interference; variance; averaging; modeling; suppression coefficient; a-truncated mean.

**Введение.** Для обеспечения высокого качества производимой продукции требуется существенное повышение точности измеряемых процессов. Для уменьшения погрешностей измерения приходится детально анализировать весь канал измерения и принимать меры к снижению уровня систематических и случайных погрешностей. Структурная схема одного канала измерения представлена на рис. 1. Измеряемая физическая величина ФВ поступает на датчик Д и преобразуется в электрический сигнал. Полученный измерительный сигнал усиливается унифицирующим преобразователем УП и поступает в линию связи ЛС длиной 10–50 м. Далее сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП и преобразуется в цифровое значение. Вычислительное устройство ВУ обеспечивает требуемые вычислительные операции (фильтрацию, масштабирование, усреднение и т.д.).



Рис. 1. Структурная схема одного измерительного тракта

Все измерительные блоки являются в той или иной степени и генераторами, и приёмниками аддитивных шумов и помех. Как правило, сама измеряемая физическая величина имеет вполне определённый уровень шумов и флуктуаций амплитудой 0,1–0,5% [1, 2]. Например, давление в магистральном газопроводе подвержено влиянию следующих факторов: изменение давления на входе и выходе газокomppressorной станции, изменение температуры и атмосферного давления окружающей среды, включение и выключение потребителей, сейсмические колебания почвы и т.д. Детальный анализ выходного давления показывает, что уровень шумов физического процесса в течение 100 с составляет 0,1–0,25% от номинального. Аналогичный пример можно представить для напряжения сети переменного тока, которое сильно зависит от количества подключённых потребителей, состояния атмосферы (дождь, снег, туман), атмосферных явлений, солнечной активности и т.д. Нестабильность напряжения в течение 100 с также составляет 0,1–0,25% от номинального [2, 3]. Датчик может обеспечить измерение физической величины с точностью, не превышающей пределов допустимой погрешности (например, 0,05–0,20%), что объясняется несовершенством механических элементов (нелинейность, гистерезис и старение элементов). Следует отметить, что все датчики

имеют вполне определённый уровень шумов, который составляет от 10% до 30% в классе точности датчика. Например, это явление характерно для термодпар, термометров сопротивления, тензорезисторов и т.д., где уровень собственных шумов измеряется десятками мкВ при выходном сигнале в 1–10 мВ [1, 3]. Основным приёмником электромагнитных помех является линия связи, амплитуда помех в которой может составлять 0,1–5% от диапазона измерения АЦП. Детальный анализ помех на входах АЦП показал, что в измеряемом сигнале преобладают периодические помехи с частотой питающей сети (50 Гц, 60 Гц, 400 Гц), нормальный шум и импульсные помехи с нормальным (или близким к нормальному) законом распределения амплитуд. При увеличении времени наблюдения закон распределения импульсных помех приближается к логарифмически-нормальному [2, 3]. Причём, в течение суток, в зависимости от типа применяемого оборудования, может наблюдаться от 100 до 1000 импульсных помех, амплитуда которых превышает 10 В. Это приводит, в лучшем случае к появлению аномальных результатов в полученных данных, а в худшем случае к выходу из строя входных каскадов АЦП [3].

Класс точности каждого датчика определяется предельным значением допускаемой приведённой погрешности (например,  $\pm 0,1\%$ ,  $\pm 0,2\%$ ,  $\pm 0,5\%$ ). Эти пределы определяются в основном систематическими погрешностями, но всегда имеется зона случайных погрешностей, которая может составлять 10–20% от класса точности. Таким образом, измеряемая величина может быть представлена в следующем виде:

$$a(t) = A(t) + \xi_1(t) + \xi_2(t),$$

где  $a(t)$  – измеренное значение физической величины,

$A(t)$  – действительное значение,

$\xi_1(t)$  – суммарное значение флуктуационных шумов,

$\xi_2(t)$  – суммарное значение помех, наводимых в линии связи в момент измерения.

Одним из методов повышения точности полученных оценок значений физической величины является усреднение результатов, позволяющее существенно снизить влияние случайных и систематических составляющих погрешности. Для этого необходимо производить достаточно большое количество измерений (от 20 до 200) и проводить усреднение по определённым правилам. В связи с тем, что аналитические методы анализа эффективности таких алгоритмов усреднения достаточно сложны, было решено провести моделирование процессов усреднения на ЭВМ. Из всего многообразия методов усреднений из теории вероятностей и математической статистики были выбраны 8 методов, которые представлены в табл. 1. Здесь  $A$  – действительное значение измеряемой величины,  $a$  – результат одного измерения,  $N$  – количество измерений за период накопления данных,  $\bar{a}$  – оценка меры центральной тенденции результатов измерений,  $k$  – параметр усечения для  $M$ -оценок (%) [4–6].

Три вида усреднений (арифметическое, геометрическое и гармоническое) известны ещё со времен Древней Греции. Остальные методы пришли к нам из мира теории вероятностей и математической статистики [7–9]. В табл. 1 представлены математические выражения, описывающие методы усреднения. Следует отметить, что 4 метода требуют выполнения операции предварительной сортировки полученных результатов для последующего отбрасывания аномальных результатов [10, 11]. Отбрасывание этих результатов относится к нелинейной фильтрации, сглаживание – к линейной [12–14]. Большой вклад в развитие математической статистики и соответствующих методов внесли Х. Крамер (H. Cramer) [14–16], Р. Фишер (R. Fisher) [17], Дж. Нейман (J. Neuman) [18], К. Пирсон (K. Pearson) [19].

Таблица 1

Методы усреднений

Метод	Описание
AP – Среднее арифметическое	$\bar{a}_{AP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i$
ГЕ – Среднее геометрическое	$\bar{a}_{ГЕ} = \left( \prod_{i=1}^N a_i \right)^{1/N}$
ГА – Среднее гармоническое	$\bar{a}_{ГА} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{a_i}}$
КВ – Среднеквадратическое	$\bar{a}_{КВ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N a_i^2}{N}}$
МЕ – Медиана	1) $\text{sort}(a_i) = a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N$ 2) $\bar{a}_{МЕ} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_{\frac{N}{2}} + a_{\frac{N}{2}+1}}{2} \end{array} \right\}$
МХЛ – Медиана Ходжеса-Лемана	1) $a_1^* = \frac{a_1 + a_2}{2}, a_2^* = \frac{a_3 + a_4}{2}, \dots, a_M^* = \frac{a_{N-1} + a_N}{2}$ 2) $\text{sort}(a_i^*)$ 3) $\bar{a}_{МХЛ} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{a_M^* + a_{M+1}^*}{2} \end{array} \right\}$
AY5 – $\alpha$ -усечённое среднее (5 %)	1) $\text{sort}(a_i) = a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N$ 2) $\bar{a}_{AYk} = \frac{1}{N - 2 \cdot k \cdot N} \cdot \sum_{i=k \cdot N+1}^{N-k \cdot N} a_i$
AY10 – $\alpha$ -усечённое среднее (10 %)	
AY15 – $\alpha$ -усечённое среднее (15 %)	
AB5 – $\alpha$ -винзорированное среднее (5 %)	1) $\text{sort}(a_i) = a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N$ 2) $\bar{a}_{ABk} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=k \cdot N+1}^{N-k \cdot N} a_i + k \cdot N \cdot (a_{k \cdot N+1} + a_{N-k \cdot N-1})$
AB10 – $\alpha$ -винзорированное среднее (10 %)	
AB15 – $\alpha$ -винзорированное среднее (15 %)	

**Схема моделирования.** Для сравнения методов усреднений проведено моделирование на ЭВМ с использованием программ LabVIEW и Atmel Studio. На рис. 2 представлена структурная схема моделирования; цель моделирования – оценка подавления шумов, периодических и импульсных помех в измерительных линиях связи от датчиков до АЦП при использовании 8 методов усреднения. Основными элементами модели являются:

- ◆ генератор входных уровней (100–900 мВ); входные уровни выбраны таким образом, чтобы заданный входной уровень с наложенной помехой не выходил за диапазон измерения 0–1024 мВ, АЦП 16 двоичных разрядов, один квант 32 мкВ.
- ◆ генератор помех, в том числе генератор сетевой помехи 50 Гц (амплитуда первой гармоники  $U_{1Г}$ : 2 мВ, 5 мВ, 10 мВ), генератор нормального шума (СКО амплитуды шума,  $\sigma_{U_{ш}}$ : 0.5, 1, 2 мВ) и генератор импульсных помех (СКО амплитуды импульсной помехи,  $\sigma_{U_{имп.п}}$ : 5, 10, 20 мВ; вероятность попадания помехи в замер: 1, 10, 20%);
- ◆ сумматор входного уровня и помехи;
- ◆ блок выделения результатов измерений (АЦП);
- ◆ блок установки модели усреднений;
- ◆ блок накопления и усреднения (результатов измерений);
- ◆ блок выделения погрешностей;
- ◆ блок статистической обработки погрешностей.

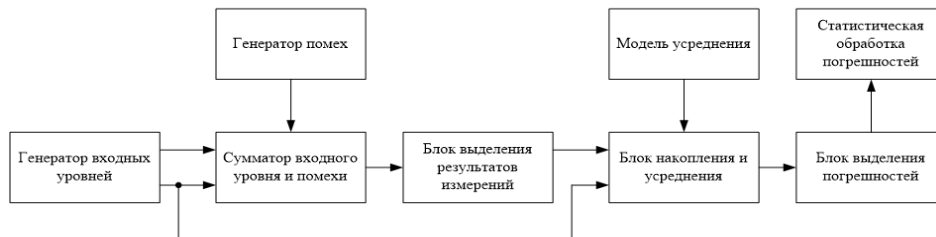


Рис. 2. Схема моделирования подавления помех алгоритмическими методами

**Результаты моделирования.** После формирования входного сигнала с наложенными помехами, имитируя работу АЦП, накапливаются результаты  $N$  измерений (выборка из 20, 40, 60, 80 или 100 измерений). При этом было принято, что импульсные помехи не влияют на работу АЦП. Определяется среднее значение сигнала и его абсолютная погрешность преобразования для каждого выбранного метода усреднения. После многократного повторения процесса измерений, усреднений и вычитаний определяется среднее значение погрешности и её СКО ( $N_{повт} = 25000$ ). В качестве критерия эффективности принята величина коэффициента подавления  $K1$ , которая определяется как отношение дисперсии входного сигнала  $D1$  перед ВУ к дисперсии абсолютной погрешности  $D2$  после ВУ при заданном  $N_{повт}$ . Кроме того, для оценки подавления наложенных помех может использоваться и коэффициент  $K2$  – отношение суммы  $\Sigma1$  взятых по модулю помех, наложенных на основной сигнал, к сумме  $\Sigma2$  полученных после фильтрации абсолютных погрешностей, также взятых по модулю [9–11].

На рис. 3 представлена гистограмма накладываемой на сигнал суммарной помехи  $U_{1Г} = 5$  мВ,  $\sigma_{U_{ш}} = 1$  мВ,  $\sigma_{U_{имп.п}} = 10$  мВ перед АЦП. Седлообразная форма гистограммы на рис. 3 объясняется преобладанием гармонической помехи 50 Гц (амплитуда 5 мВ) над шумами и импульсной помехой. Кроме того, следует обратить внимание на частоту попадания в заданный интервал (более 25000 в интервал  $\pm 10$  мВ).

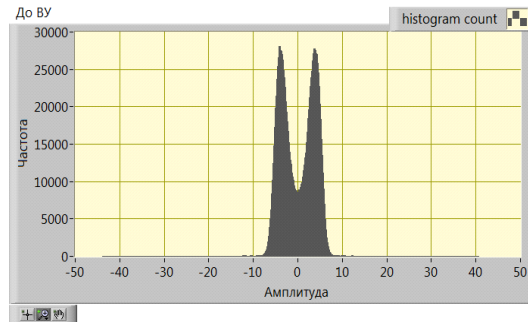


Рис. 3. Гистограмма наложенных помех

На рис. 4 представлена гистограмма абсолютной погрешности арифметического усреднения при  $N = 100$  после ( $N_{\text{повт}} = 25000$ ). Из представленной гистограммы видно, что СКО абсолютной погрешности после фильтрации (усреднения) не превышает 0,2 мВ, а частота попадания в интервал  $\pm 0,60$  мВ не превышает 150. Т.е. существенно уменьшилась и амплитуда помехи (в 20 раз), и частота сбоев (почти в 150 раз).

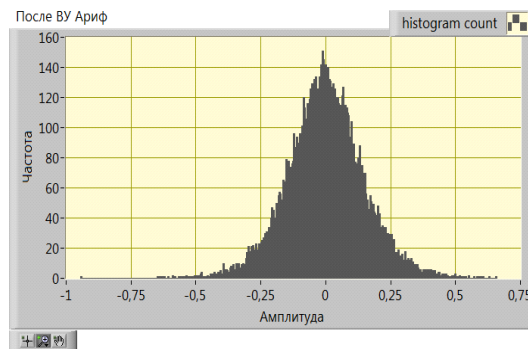


Рис. 4. Гистограмма абсолютной погрешности арифметического усреднения

В табл. 2 [20] представлены результаты моделирования в среде LabVIEW при разном заданном количестве измерений (от 20 до 100). Можно утверждать, что при увеличении количества наблюдений (измерений) коэффициенты подавления пропорционально растут для всех алгоритмов усреднения, и лучшими оказываются два алгоритма – АУ5 и АВ5, которые позволяют отбросить 5 % аномальных наблюдений и тем самым улучшить процесс усреднения при наличии импульсных помех. Коэффициенты подавления шумовой помехи достигают 60 дБ при количестве наблюдений  $N = 100$ . Медианные методы усреднений – МЕ и МХЛ оказались на порядок хуже по подавлению шумовой помехи. На рис. 5 и рис. 6 представлены полученные коэффициенты подавления для 8 методов усреднения графически, очевидны преимущества алгоритмов усреднения АУ5 и АВ5.

В табл. 3 [20] представлены средние абсолютные погрешности  $\Delta$  и средние квадратические отклонения  $\sigma$  абсолютных погрешностей при разном количестве наблюдений. Очевидно, что величина  $\Delta$  не очень информативна, так как представляет собой разность между суммами положительных и отрицательных погрешностей, то есть демонстрирует качество алгоритма усреднения. Тем не менее, можно утверждать, что все представленные алгоритмы при увеличении количества на-

блюдений показывают почти пропорциональное уменьшение средней абсолютной погрешности  $\Delta$ . Лучшими алгоритмами оказались AP, AY5, AB5, которые имеют абсолютную погрешность 1–2 мкВ.

Таблица 2

Коэффициенты подавления при разных  $N$ 

Метод	K1(D1/D2)					K2( $\Sigma 1/\Sigma 2$ )				
	$N$					$N$				
	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
AP	144	292	442	588	727	298	814	1481	2262	3096
ГА	143	290	439	583	721	292	784	1402	2099	2847
ГЕ	144	291	441	586	725	296	806	1461	2216	3029
КВ	144	292	441	587	726	296	806	1459	2221	3028
МЕ	32	50	69	90	106	127	319	558	847	1155
МХЛ	40	46	55	68	76	152	316	511	745	985
AY5	216	433	653	884	1075	336	944	1738	2697	3689
AY10	203	403	609	821	1001	326	911	1680	2596	3562
AY15	184	362	550	742	907	310	864	1598	2466	3393
AB5	218	442	666	904	1099	335	945	1734	2689	3678
AB10	217	435	652	880	1074	335	945	1734	2689	3678
AB15	205	413	621	839	1016	325	918	1687	2615	3584

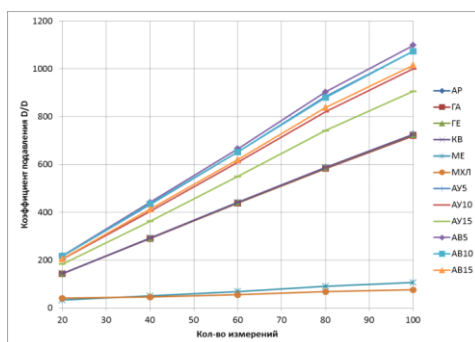
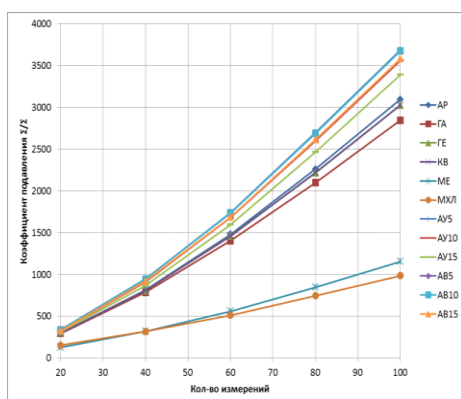
Рис. 5. Зависимости коэффициентов подавления  $K1$  от количества наблюденийРис. 6. Зависимости коэффициентов подавления  $K2$  от количества наблюдений

Таблица 3

**Средние абсолютные погрешности и СКО абсолютных погрешностей при разных  $N$**

Метод	$\Delta$				$\sigma$				
	Количество измерений ( $N$ )								
	20	60	80	100	20	40	60	80	100
AP	0,0016	0,0015	0,0010	0,0002	0,320	0,224	0,182	0,158	0,142
ГА	-0,0569	-0,0570	-0,0576	-0,0583	0,321	0,225	0,183	0,159	0,143
ГЕ	-0,0276	-0,0277	-0,0283	-0,0290	0,320	0,225	0,182	0,158	0,142
КВ	0,0308	0,0307	0,0302	0,0295	0,320	0,224	0,182	0,158	0,142
МЕ	0,0033	0,0060	-0,0011	0,0019	0,676	0,541	0,462	0,403	0,372
МХЛ	0,0058	0,0070	-0,0020	0,0011	0,604	0,568	0,515	0,466	0,440
AY5	0,0022	0,0008	0,0009	0,0002	0,261	0,184	0,150	0,129	0,117
AY10	0,0026	0,0009	0,0012	0,0002	0,269	0,191	0,155	0,134	0,121
AY15	0,0036	0,0010	0,0014	0,0004	0,283	0,201	0,163	0,141	0,127
AB5	0,0019	0,0009	0,0008	0,0002	0,260	0,182	0,148	0,127	0,115
AB10	0,0012	0,0004	0,0007	0,0000	0,260	0,184	0,150	0,129	0,117
AB15	0,0026	0,0009	0,0016	0,0001	0,267	0,189	0,154	0,132	0,120

Второй параметр – величина среднего квадратического отклонения  $\sigma$  – более информативна и также показывает нам преимущество алгоритмов AP, AY5 и AB5. Почти в три раза худшими по коэффициенту сглаживания  $\sigma$  оказались алгоритмы ME и МХЛ. На рис. 7 представлены зависимости значений СКО для восьми исследуемых алгоритмов от количества наблюдений  $N$ .

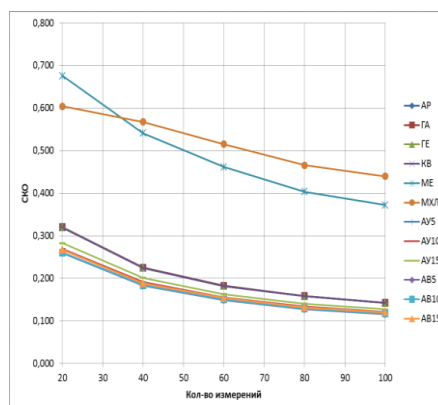


Рис. 7. Зависимости СКО от количества наблюдений

**Временные затраты на операцию усреднения.** Для оценки временных затрат на выполнение операции усреднения каждого из восьми исследуемых методов вычислялось количество элементарных тактов для каждого алгоритма. В табл. 4 [20] представлено время выполнения операции усреднения при тактовой частоте микропроцессора 16 МГц. Очевидно, что время выполнения операции усреднения не превышает 1500 мкс для  $N = 20$  и 7500 мкс для  $N = 100$  при выполнении операции усреднения после сбора всех данных. Однако это время может быть уменьшено в 5–10 раз при промежуточной обработке данных по сортировке через каждые 10–20 мс и таким образом не превысит 1000 мкс. Можно однозначно утверждать, что по времени вычислений лучшим оказался метод AP, который при  $N$ , кратном степени 2 (32, 64, 128...), с целью замены операции деления на операцию сдвига, выдаст результат через 1–2 мкс.



Таблица 4

**Сравнение алгоритмов обработки данных для 8 методов усреднений  
по 20 измерениям**

Метод	AP	ГА	ГЕ	КВ	МЕ	МХЛ	АУ5	АУ10	АУ15	АВ5	АВ10	АВ15
$N_T$	2986	12557	8431	6429	21490	13685	23556	23284	23014	23842	23834	23817

Представляет определённый интерес исследование влияния отдельных составляющих сложной комплексной помехи на коэффициенты подавления для восьми исследуемых методов усреднения. В табл. 5 [20] представлены результаты моделирования соответственно для  $N = 100$  – оценки коэффициентов подавления для гармонической помехи 50 Гц, шумовой помехи и импульсной помехи. В процессе моделирования менялся один из параметров, а два других поддерживались на постоянном уровне. Например, изменялась амплитуда гармонической помехи (2 мВ, 5 мВ, 10 мВ) при СКО шумовой помехи 1 мВ и СКО импульсной помехи 10 мВ. В последующих 6 этапах последовательно изменялись параметры шумовой помехи и импульсной помехи. Таким образом были получены 9 вариантов коэффициентов подавления, которые позволили оценить степень подавления каждой из составляющих сигнала помехи в отдельности.

Таблица 5

**Оценки коэффициентов подавления для гармонической помехи 50 Гц,  
шумовой помехи и импульсной помехи при  $N = 100$**

UГ, мВ		2	5	10	5			5		
СКО ш, мВ		1			0,5	1	2	1		
СКО имп п, мВ		10			10			5	10	20
Метод усреднения	AP	200	727	2625	1105	727	354	1102	727	350
	ГА	198	721	2592	1091	721	352	1100	721	334
	ГЕ	199	725	2614	1101	725	353	1101	725	345
	КВ	200	726	2625	1104	726	354	1101	726	348
	МЕ	124	106	179	170	106	101	106	106	124
	МХЛ	73	76	174	122	76	60	87	76	79
	АУ5	349	1075	3240	2646	1075	391	1148	1075	1216
	АУ10	334	1001	2892	2359	1001	370	1058	1001	1133
	АУ15	313	907	2493	2028	907	345	955	907	1023
	АВ5	350	1099	3428	2814	1099	395	1182	1099	1241
АВ10	344	1074	3313	2762	1074	384	1135	1074	1222	
АВ15	330	1016	3025	2585	1016	368	1063	1016	1166	

Анализ представленных результатов показывает, что все алгоритмы хорошо подавляют гармонические (сетевые) помехи 50 Гц и плохо сглаживают высокочастотные шумы и импульсные помехи большой амплитуды. Лучше всех показали себя алгоритмы а-усечённое среднее АУ5 и а-винзоризированное среднее АВ5, которые отбрасывают 5% аномальных результатов и не снижают коэффициенты подавления сложной импульсной помехи при увеличении СКО амплитуды помехи. На рис. 8 и 9 представлены полученные коэффициенты подавления для лучших алгоритмов усреднения АУ5, АУ10, АВ5, и АВ10. Очевидно, что с увеличением количества наблюдений (измерений) коэффициенты подавления линейно растут.

**Выводы.** Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. При увеличении числа наблюдений коэффициенты подавления растут прямо пропорционально количеству наблюдений, и это справедливо для всех исследованных методов усреднений. Методы медианы МЕ и медианы Ходжеса-Лемана МХЛ оказались худшими по всем коэффициентам подавления сложной шумовой помехи (на уровне 40 дБ).

2. Все алгоритмы усреднения прекрасно подавляют периодическую помеху 50 Гц. Но лучше всех с этой задачей справляются а-усеченное среднее АУ5 и а-винзоризированное среднее АВ5, которые хорошо подавляют и импульсные помехи большой амплитуды за счёт отбрасывания 5 % аномальных наблюдений.

3. Все алгоритмы усреднения плохо подавляют высокочастотные шумы и флуктуации, при увеличении амплитуды помехи коэффициенты подавления снижаются почти прямо пропорционально. В связи с этим в измерительном тракте необходимо предусмотреть аналоговую фильтрацию для снижения уровня шума.

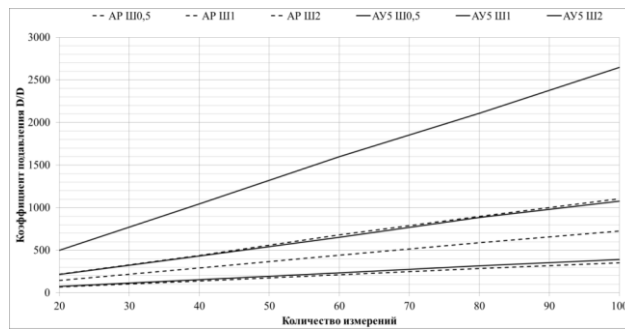


Рис. 8. Зависимости коэффициента подавления от количества измерений при разном уровне шума

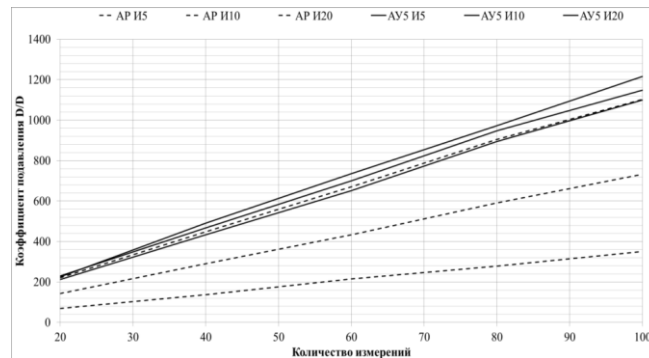


Рис. 9. Зависимости коэффициента подавления от количества измерений при разных уровнях импульсных помех

4. Можно выделить три метода усреднения: AP, АУ5 и АВ5, которые при выборке 100–128 наблюдений за один период сетевой помехи (20 мс) уверенно обеспечивают подавление любой сложной шумовой помехи до уровня 55–65 дБ. Алгоритмы АУ5 и АВ5 отлично подавляют импульсные помехи большой амплитуды.

5. Лучшими по времени выполнения операции усреднения оказался алгоритм AP, который обеспечивает выдачу результата усреднения через 1–2 мкс после окончания процесса измерения.

Авторам много раз приходилось применять методы усреднения для предварительного сглаживания сильно зашумленных сигналов. В частности, на одном предприятии измерительный кабель был расположен в одном канале рядом с силовыми кабелями 380 В, 50 Гц и 220 В, 400 Гц, что приводило к большим наводкам с частотой сети (более 3,5%). Проблему удалось решить на уровне ЭВМ за счёт усреднения 64 выборок АЦП за 40 мс, разброс результатов усреднения не превышал 0,1%. В другом случае для избавления от мощной импульсной помехи от радара был удачно применён метод а-усечённое среднее, который обеспечивал отброс 5% аномальных результатов [9].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фрайден Дж.* Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005.
2. *Галалу В.Г., Киракосян С.А.* Помехи по шинам заземления в системах промышленной автоматизации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 5. – С. 20-30.
3. *Галалу В.Г., Киракосян С.А.* Оценка уровня помех на входах аналого-цифровых преобразователей измерительных систем // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Матер. Междунар. науч.-техн. конф.: в 2-х т. Т. 2. – Саратов, 2016. – С. 208-215.
4. *Журавин Л.Г. и др.* Методы электрических измерений / под ред. Э.И. Цветкова. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
5. *Новицкий И.С., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
6. ГОСТ Р 8.736–2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013.
7. *Леман Э.* Теория точечного оценивания. – М.: Наука, 1991.
8. *Орлов А.И.* Прикладная статистика. – М.: Экзамен, 2004.
9. *Галалу В.Г., Киракосян С.А.* Применение а-усечённого среднего для подавления промышленных помех в системах промышленной автоматизации // Аспирант. – 2015. – № 5. – С. 43-47.
10. *Хьюбер П.* Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984.
11. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Наука, 2000.
12. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 2006.
13. *Галалу В.Г., Киракосян С.А., Турулин И.И.* Аналоговые и цифровые методы подавления помех в информационно-измерительных системах. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015.
14. *Cramer H.* Random variables and probability distributions // Cambridge Tracts in Mathematics and Mathematical Physics. No. 36. – Cambridge University Press, 2003. – PBK reprint of 1970. – 3rd ed.
15. *Cramer H.* Mathematical Methods of Statistics. – Princeton University Press, Princeton, 1946.
16. *Scheffe H.* Review of Mathematical methods of statistics by H. Cramer // Bulletin of the American Mathematical Society. – 1947. – 53 (7). – P. 733-735.
17. *Fisher R.A.* Statistical Methods for Research Workers. Oliver and Boyd. Edinburg: Tweedale Court. – London: Paternoster Row, E.C., 1928.
18. *Neyman J.* First course in probability and statistics. – N.Y.: Henry Holt & Co., 1957.
19. *Pearson K.* The Grammar of Science. Part I – Physical. London. Adam and Charles Black. 1911.
20. *Киракосян С.А.* Разработка и исследование методов повышения точности и помехоустойчивости быстродействующих устройств ввода аналоговой информации: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.05. – Новочеркасск, 2018.

## REFERENCES

1. *Frayden Dzh.* Sovremennye datchiki. Spravochnik [Modern sensors. Handbook]. Moscow: Tekhnosfera, 2005.
2. *Galalu V.G., Kirakosyan S.A.* Pomekhi po shinam zazemleniya v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii [Interference in ground busbars in industrial automation systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 5, pp. 20-30.

3. Galalu V.G., Kirakosyan S.A. Otsenka urovnya pomekh na vkhodakh analogo-tsifrovyykh preobrazovateley izmeritel'nykh sistem [Evaluation of the noise level at the inputs of analog-to-digital converters of measuring systems], *Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya: Mater. Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Actual problems of electronic instrumentation: Materials of the International Scientific and Technical Conference]: in 2nd vol. Vol. 2. Saratov, 2016, pp. 208-215.
4. ZHuravin L.G. i dr. Metody elektricheskikh izmereniy / pod red. E.I. TSvetkova. – L.: Energoatomizdat, 1990.
5. Novitskiy I.S., Zograf I.A. Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy [Estimation of errors in measurement results]. Leningrad: Energoatomizdat, 1991.
6. GOST R 8.736–2011. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy (GSI). Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy. Osnovnye polozheniya [State System for Ensuring the Uniformity of Measurements (GSI). Multiple direct measurements. Methods for processing measurement results. Basic provisions]. Moscow: Standartinform, 2013.
7. Leman E. Teoriya tochechnogo otsenivaniya [Theory of point estimation]. Moscow: Nauka, 1991.
8. Orlov A.I. Prikladnaya statistika [Applied statistics]. Moscow: Ekzamen, 2004.
9. Galalu V.G., Kirakosyan S.A. Primenenie a-usechenogo srednego dlya podavleniya industrial'nykh pomekh v sistemakh promyshlennoy avtomatizatsii [Application of a-truncated mean for industrial interference suppression in industrial automation systems], *Aspirant* [Graduate student], 2015, No. 5, pp. 43-47.
10. Kh'yuber P. Robastnost' v statistike [Robustness in Statistics]. Moscow: Mir, 1984.
11. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya [Theory of random processes and its engineering applications]. Moscow: Nauka, 2000.
12. Venttsel' E.S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006.
13. Galalu V.G., Kirakosyan S.A., Turulin I.I. Analogovye i tsifrovye metody podavleniya pomekh v informatsionno-izmeritel'nykh sistemakh [Analogue and digital methods of interference suppression in information-measuring systems]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015.
14. Cramer H. Random variables and probability distributions, *Cambridge Tracts in Mathematics and Mathematical Physics*, No. 36. Cambridge University Press, 2003. PBK reprint of 1970, 3rd ed.
15. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton University Press, Princeton, 1946.
16. Scheffe H. Review of Mathematical methods of statistics by H. Cramer, *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1947, 53 (7), pp. 733-735.
17. Fisher R.A. Statistical Methods for Research Workers. Oliver and Boyd. Edinburg: Tweedale Court. London: Paternoster Row, E.C., 1928.
18. Neyman J. First course in probability and statistics. N.Y.: Henry Holt & Co., 1957.
19. Pearson K. The Grammar of Science. Part I, Physical. London. Adam and Charles Black. 1911.
20. Kirakosyan S.A. Razrabotka i issledovanie metodov povysheniya tochnosti i pomekhoustoychivosti bystrodeystvuyushchikh ustroystv vvoda analogovoy informatsii: diss. ... kand. tekhn. nauk [Development and research of methods for improving the accuracy and noise immunity of high-speed devices for inputting analog information: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.05. Novocherkassk, 2018.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Чернов.

**Галалу Валентин Гаврилович** – Южный федеральный университет; e-mail: v.galalu@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371638; кафедра информационных измерительных технологий и систем; к.т.н.; доцент.

**Аль-Карави Хуссейн Шукор Мукер** – e-mail: alkaravi@sfnu.ru; тел.: +79612936340; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Турулин Игорь Ильич** – e-mail: iiturulin@sfnu.ru; тел.: +78634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; д.т.н.; профессор.

**Киракосян Степан Айрапетович** – ООО "Радиоавтоматика"; e-mail: ksa\_say@mail.ru; г. Москва, Россия; к.т.н.; начальник отдела разработки технологической оснастки.

**Galaly Valentin Gavrilovich** – Southern Federal University; e-mail: v.galalu@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371638; the department of information technology and measuring systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Al-Karawi Hussein Sh. Mogheer** – Southern Federal University; e-mail: alkaravi@sfned.ru; Taganrog, Russia; phone: +79612936340; the department of fundamental of radioengineering; postgraduate student.

**Turulin Igor' P'ich** – e-mail: iiturulin@sfned.ru; phone: +78634371632; the department of fundamental of radioengineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Kirakosyan Stepan Ayrapetovich** – Radioavtomatika LLC; e-mail: ksa\_say@mail.ru; Moscow, Russia; cand. of eng. sc.; head of the department for the development of technological equipment.

УДК 004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-18-30

**Б.К. Лебедев, О.Б. Лебедев, М.А. Ганжур****ОПТИМИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ  
АДАПТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ РОЯ АГЕНТОВ**

*Разработана архитектура бионического поиска для решения задачи размещения элементов СБИС на основе гибридизации алгоритмов пчелиной колонии и роя хромосом, что позволяет выходить из «локальных ям» и увеличивает сходимость алгоритма размещения. Начальные итерации реализует пчелиный алгоритм, чтобы обеспечить широкий обзор области поиска, а завершающие – алгоритм роя хромосом, обеспечивающий точную локализацию экстремума, найденного пчелиным алгоритмом. Агенты представляются в виде популяции хромосом, являющихся генотипами решения задачи размещения. В работе описывается модифицированная парадигма роя хромосом, обеспечивающая, в отличие от канонического метода, возможность поиска решений в аффинном пространстве позиций с целочисленными значениями параметров. В поисковом популяционном методе оптимизации роем хромосом агентами популяция являются хромосомы. Хромосома является генотипом объекта оптимизации. Суть поисковой процедуры заключается в последовательной смене оператором направленной мутации состояний объекта оптимизации (хромосомы) и поиске оптимального состояния. Предложена аффинно-релаксационная модель (АРМ) роя хромосом – это граф вершины которого соответствуют хромосомам, а дуги соответствуют аффинным связям между ними. Переход хромосомы в новое состояние осуществляется с помощью релаксационной процедуры. В качестве средства изменения решения выступает оператор направленной мутации (ОНМ), суть которого заключается в изменении целочисленных значений генов в хромосоме. Целью перехода является сокращение веса аффинной связи между хромосомами. Описаны механизмы ОНМ. Предложена модифицированная структура алгоритма пчел. Для каждой базовой хромосомы реализуется вероятностный выбор набора хромосом, расположенных в окрестности базовой хромосомы. Улучшить качество работы разработанного алгоритма можно при помощи настройки значений управляющих параметров. Временная сложность алгоритма при фиксированных значениях размера популяции и количества генераций составляет  $O(n)$ . В общем зависимость времени работы гибридного алгоритма составляет  $O(n^2) - O(n^3)$ .*

*СБИС; размещение; роевой интеллект; пчелиный алгоритм; рой хромосом; гибридизация; аффинное пространство поиска; оператор направленной мутации; бионический поиск.*

**В.К. Lebedev, O.B. Lebedev, M.A. Ganzhur****OPTIMIZATION BASED ON COMBINING MODELS OF ADAPTIVE  
BEHAVIOR OF A SWARM OF AGENTS**

*A bionic search architecture has been developed to solve the problem of placing VLSI elements based on the hybridization of the algorithms of a bee colony and a swarm of chromosomes, which allows you to get out of "local holes" and increases the convergence of the placement algo-*