

## МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ ПО ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ШУМОВЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

*В.С. Александров*

Казанский национальный исследовательский технический университет  
имени А.Н. Туполева-КАИ  
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

**Аннотация.** Данная работа посвящена применению метода сравнительного анализа технического состояния сенсорных систем к обработке модельных данных (смеси амплитудного-модулированного сигнала и шума) и реальных данных экспериментальных температурных датчиков. Показано, что обработка модельных данных в рамках ключевых параметров подчиняется общеизвестному закону – формуле Найквиста, при этом результаты обработки экспериментальных данных в рамках распределения ключевых параметров с ней не коррелируют. Это, на взгляд автора, связано с высокой чувствительностью метода к универсальной природе отдельно взятого измерительного устройства. Ошибка подгоночной функции при модельных и экспериментальных вычислениях не превышает 0,8%, что говорит о высокой точности получаемых результатов. Таким образом, обработка данных не вносит неконтролируемую ошибку в получаемые результаты, а предлагаемый подход может быть применен к данным без ярко выраженного тренда любой природы – как природной, так и техногенной.

**Ключевые слова:** обработка данных, корреляционный анализ, флуктуации, ключевые параметры, подгоночная функция, эталонный образец.

### 1. Введение и постановка задачи

На сегодняшний день контроль технического состояния измерительной системы, его диагностика, а также прогнозирование отказоустойчивой работы является ключевой задачей при разработке, отладке, функционировании и их техническом обслуживании. Обработка информационных данных с различных измерительных систем находит широкое применение. Оценка технического состояния измерительного устройства на основе сравнения внутренних параметров системы с некоторым эталоном позволяет оценивать работоспособность и надежность измерительной системы, вовремя обнаруживать и устранять возникшие неисправности. Это особенно актуально в режиме непрерывного производства, когда нет возможности, например, проводить техническую диагностику измерительной системы, поскольку это вмешательство может нарушить производственный цикл. Еще одна задача, которую необходимо разрешить – задача соответствия тестового оборудования эталонному на основе ключевых параметров.

Процесс становится особенно актуальным при обработке случайных флуктуаций на фоне зашумленного тренда или без него в случае, когда полезный/детерминированный сигнал практически отсутствует на фоне случайного фона или помехи. В перечисленных областях можно выделить работы отечественных ученых Ю.К. Евдокимова [1], Р.М. Юльметьева [2], С.Ф. Тимашева [3], Р.Р. Нигматуллина [4-5], и др. Кроме того, немалый вклад внесли такие зарубежные исследователи, как YangQuan Chen [6], Bernardo Spagnolo [7], Praveen Agarwal, Paolo Lino and Guido Maione, Mandelbrot и др.

К сожалению, отечественная промышленность по производству различных интегральных микросхем, датчиков и прочих измерительных устройств сильно отстает от зарубежных аналогов. Для этого зачастую приходится закупать и использовать импортные

комплектующие. Как известно, технические характеристики измерительных устройств, предлагаемые производителем, могут сильно отличаться от реально используемых в производстве. В случае производства собственных микросхем важно оценить соответствие реализуемых параметров закупаемых сенсоров заданным. Существующие подходы оказываются неприменимыми к обработке случайных данных, поскольку вносят неконтролируемые ошибки в результаты обработки.

Критическое рассмотрение существующих подходов на основании сравнительного анализа показало, что можно выделить два общих класса недостатков, присущих существующим методам:

1) Наличие неконтролируемых ошибок предлагаемой модели и ошибок обработки из-за приблизительной оценки случайной величины (регрессионный анализ, анализ временных рядов, методы интеллектуальных систем, метод Неймана-Пирсона, метод Монте-Карло, метод Вальда, метод Фурье, вейвлет-преобразование, феноменологический метод Тимашева, метод Юльметьева и т.д.);

2) Требование априорного знания закона распределения для набора выбранных случайных величин и приведения исследуемого массива данных (дисперсионный анализ, метод максимального правдоподобия, метод Байеса, цепи Маркова и т.д.) к нормальному закону распределения, руководствуясь центральной предельной теоремой.

Целью данной работы является проверка работоспособности метода сравнительного анализа положительных и отрицательных флуктуаций (САПОФ) на модельных данных смеси амплитудно-модулированного сигнала с шумом и экспериментальных данных температурных датчиков.

## 2. Описание подхода и обработка модельных данных

Математическое описание подхода с основными ключевыми параметрами подробно рассмотрено в работе [8] и в заявке на патент на изобретение [9]. Ниже приведены десять ключевых параметров, используемых при обработке данных.

$Pr_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j$  параметр, определяющий среднее значение последовательности без тренда,

которое соответствует определенному балансу между положительными и отрицательными колебаниями.

$Pr_2 = Rg(Dy) = \max(Dy) - \min(Dy)$  параметр, определяющий диапазон заданной последовательности. Это значение всегда положительное и соответствует максимальной интенсивности заданной последовательности без тренда, причем чем меньше эта величина, тем сравниваемая БТП будет более близка к эталонной.

$Pr_3 = Rg(|Dy|) = \max(Dy_+) - |\min(Dy_-)|$  параметр, определяющий относительный вклад амплитуд, находящихся на противоположных сторонах последовательности без тренда.

$Pr_4 = Rg(Sm(y)) = \max(Sm_+) - \min(Sm_-)$ ,  $Sm_{\pm} = \sum_{j=1}^{N_{\pm}} Dy_{j,\pm}$  параметр, определяющий диапазон сумм, оценивающих совокупный (или кумулятивный) эффект данных колебаний.

$Pr_5 = Sm = \langle y \rangle + 0.5 \cdot (\max(y) + \min(y))$  – параметр, который отражает возможную асимметрию между положительными и отрицательными флуктуациями по отношению к их среднему значению.

$Pr_6 = DN_{\pm} = Nx_+ - Nx_-$  параметр, который определяет количество амплитуд, расположенных на противоположных сторонах бестрендовой последовательности и определяет меру асимметрии вдоль горизонтальной оси.

$Pr_7 = \max(Bd)$ . Если все амплитуды заданной бестрендовой последовательности –  $y_j$  располагаются в порядке убывания ( $y_1 > y_2 > \dots > y_N$ ) и полученная последовательность этих

ранжированных амплитуд интегрируется, после чего получается колоколообразная кривая, определенная как  $Bd(x; \alpha, \beta, A) = A(x - x_0)^\alpha (x_N - x)^\beta$ , тогда максимум этой интегральной кривой четко указывает на границу между положительными и отрицательными упорядоченными флуктуациями.

$Pr_8 = Range(J(Dy)) = max(J(Dy)) - min(J(Dy))$  параметр, который отражает размах совокупных колебаний, полученных после суммирования положительных и отрицательных флуктуаций, где  $DJ_j = DJ_{j-1} + y_j$ ,  $DJ_0=0, j=1, 2, \dots, N$ .  $N$  соответствует количеству отсчетов в рассматриваемой последовательности.

$Pr_9 = \langle J(Dy) \rangle$ , параметр, который отражает среднее значение кривой  $J(Dy)$  для оценки вклада кумулятивных колебаний.

$Pr_{10} = \langle \omega \rangle$  параметр для определения средней частоты колебаний, пересекающих горизонтальную ось.

При рассмотрении модельных данных в качестве аналогии привязки к температуре рассматривается смесь нормального и равномерного шумов с амплитудно-модулированным сигналом, где изменение величины параметра амплитуды будет условно пропорционально изменению температуры окружающей среды реальных датчиков и проверяется соответствие формуле Найквиста для среднеквадратичного значения шума (1) и спектра (2).

$$U^2 = 4 \cdot R \cdot k \cdot T \cdot \Delta F, \tag{1}$$

где  $U$  – среднеквадратическое значение величины теплового шума ( $V^2$ )  $R$  – активное сопротивление проводника (Ом),  $k$  – постоянная Больцмана (Дж/°К),  $T$  – абсолютная температура (°К),  $\Delta F$  – полоса частот (Гц).

Ниже на рис. 1 показано распределение одного из параметров ( $Pr_9$ ), описанного ранее, и его проверка на соответствие формуле (1) относительно температуры в градусах Кельвина. В таблице 1 приведено условное соответствие амплитуды модулированного сигнала температуре. Основные вычисления проводятся в градусах Кельвина с целью исключения сложностей с вычислением отрицательных степеней.

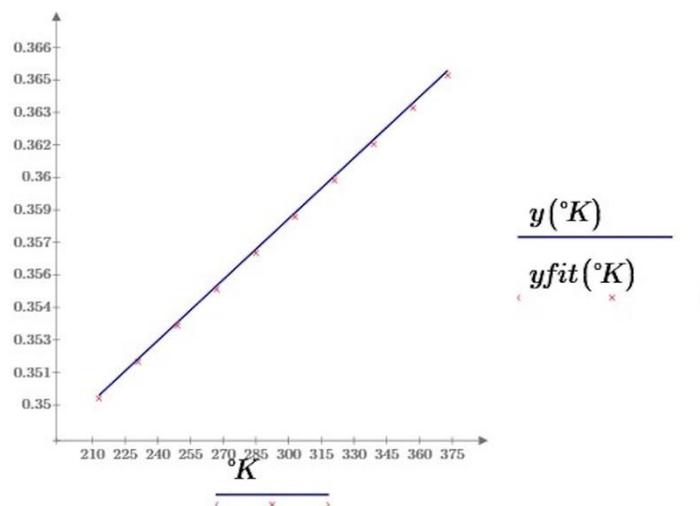


Рис. 1. График распределения параметра  $Pr_9$  на температурном диапазоне в координатах  $U^2 - T$ , где  $y(^{\circ}K)$  (выделен синим цветом) – смесь гауссовского шума,  $yfit(^{\circ}K)$  (выделен красными точками) – подгоночная функция. Графики представляют собой линии, близки по значениям друг к другу, при этом их распределение подчиняется формуле Найквиста (1). Здесь по оси абсцисс отложено значение температуры в °К, а по оси ординат – среднеквадратичное значение шума

Таблица 1. Условное соотношение долей амплитуды и температуры

Amp, В	°К	°С
0,1	213	-60
0,3	231	-42
0,5	249	-24
0,7	267	-6
0,9	285	+12
1,1	303	+30
1,3	321	+48
1,5	339	+66
1,7	357	+84
1,9	373	+100

Учет квантовомеханических эффектов приводит к следующей модификации формулы Найквиста (1) для спектра ЭДС теплового шума (2), при этом вид спектра теплового шума, полученный в рамках квантовой теории, приведен на рис. 2. Рассчитанные подгоночные параметры приведены в таблице 2, а результаты обработки экспериментальных данных – в таблице 3.

$$e_f^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \frac{\left(\frac{hf}{kT}\right)}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} \text{ [В}^2/\text{Гц]} \quad (2)$$

Таблица 2. Значения подгоночных параметров a, b, граничной температуры, коэффициента корреляции Пирсона (PCC) и соответствующей ошибки подгона для различных значений ключевых параметров Pr<sub>1</sub>-Pr<sub>10</sub> в рамках подхода САПОФ

Ft <sub>n</sub>	Pr <sub>1</sub>	Pr <sub>2</sub>	Pr <sub>3</sub>	Pr <sub>4</sub>	Pr <sub>5</sub>	Pr <sub>6</sub>	Pr <sub>7</sub>	Pr <sub>8</sub>	Pr <sub>9</sub>	Pr <sub>10</sub>
a	2,4	2,89	3,12	2,56	4,08	3,46	2,34	3,89	3,44	4,13
b	344	271,8	259,6	331,3	209,2	234,9	341,5	222,2	241	206,6
T <sub>0</sub> , °К	304	289	298	312	314	299	294	318	305	314
PCC	0.994	0.995	0.997	0.992	0.992	0.996	0.993	0.995	0.998	0.996
Err, %	0,6	0,5	0,3	0,8	0,8	0,4	0,7	0,5	0,2	0,4

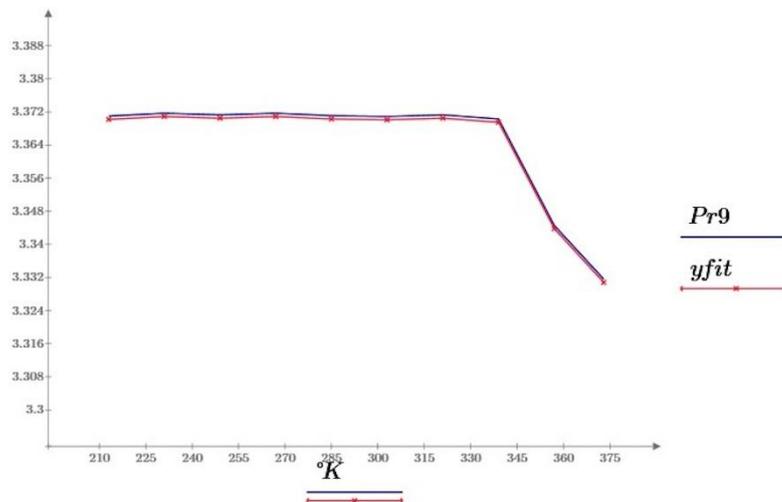


Рис. 2. График распределения параметра Pr<sub>9</sub> на температурном диапазоне в координатах e<sup>2</sup> – T, где Pr<sub>9</sub> (выделен синим цветом) – смесь гауссовского шума, yfit (выделен красными точками) – подгоночная функция. Графики представляют собой линии, которые близки по значениям друг к другу, при этом их распределение подчиняется формуле Найквиста (2). Здесь по оси абсцисс отложено значение температуры в °К, а по оси ординат – среднеквадратичное значение шума

Таблица 3. Значения параметров для различных величин амплитуды

Am /Pr	Pr1	Pr2	Pr3	Pr4	Pr5	Pr6	Pr7	Pr8	Pr9	Pr10
0,1	125	0.1275	2.7624	$1.29 \cdot 10^{-4}$	0.945	$8.39e-3$	2.584	0.111	0.297	0.516
0,3	127	0.1304	2.8259	$1.32 \cdot 10^{-4}$	0.968	$8.58 \cdot 10^{-3}$	2.643	0.113	0.304	0.528
0,5	129.8	0.1317	2.8538	$1.33 \cdot 10^{-4}$	0.977	$8.67 \cdot 10^{-3}$	2.669	0.114	0.307	0.533
0,7	129.1	0.1319	2.8577	$1.33 \cdot 10^{-4}$	0.978	$8.68 \cdot 10^{-3}$	2.673	0.114	0.307	0.534
0,9	129.3	0.132	2.8605	$1.34 \cdot 10^{-4}$	0.979	$8.69 \cdot 10^{-3}$	2.675	0.114	0.308	0.534
1,1	129.7	0.1323	2.8664	$1.34 \cdot 10^{-4}$	0.981	$8.71 \cdot 10^{-3}$	2.681	0.114	0.308	0.535
1,3	129.9	0.1325	2.8707	$1.34 \cdot 10^{-4}$	0.982	$8.72 \cdot 10^{-3}$	2.685	0.114	0.308	0.535
1,5	129.8	0.1324	2.8692	$1.34 \cdot 10^{-4}$	0.982	$8.72 \cdot 10^{-3}$	2.683	0.114	0.308	0.536
1,7	129.8	0.1324	2.8699	$1.34 \cdot 10^{-4}$	0.982	$8.72 \cdot 10^{-3}$	2.684	0.114	0.308	0.535
1,9	129.8	0.1324	2.8692	$1.34 \cdot 10^{-4}$	0.982	$8.72 \cdot 10^{-3}$	2.683	0.114	0.308	0.536

Подгоночная функция описывается линейной зависимостью  $y_{fit}=aT-b$ . Тогда с учетом подстановки в выражение (2) получается (3):

$$e^2 = a \cdot T \cdot \frac{\frac{b}{T}}{e^{\frac{b}{T}} - 1} \quad (3)$$

При рассмотрении случая, когда  $b/T \gg 1$  выражение подгоночной функции сводится к виду

$$y_{fit}=a \cdot b \cdot e^{-\frac{b}{T}}. \quad (4)$$

При рассмотрении случая, когда  $b/T \ll 1$  выражение подгоночной функции сводится к виду

$$y_{fit}=a \cdot T - \frac{1}{2} \cdot a \cdot b. \quad (5)$$

Тогда граничная величина температуры  $T_0$  в °К определяется как (6):

$$T_0 = \frac{a \cdot b}{e} \quad (6)$$

Корреляция сгенерированных модельных данных и подгоночной функции, найденной в рамках применения методов собственных координат и наименьших квадратов, показывает высокую точность получаемых результатов. Подтверждается соответствие распределения параметров формуле Найквиста. Подгоночная функция  $y_{fit}$ , представленная на рисунках 1-2, достаточно точно описывает модельные данные, расчетная величина относительной ошибки не превышает 0,6%, коэффициент корреляции Пирсона достигает значения 0,998, что говорит о высокой точности рассматриваемого подхода САПОФ.

### 3. Обработка шумов температурных датчиков

В данном разделе приведено описание эксперимента и обработка данных температурных датчиков типа LM335Z STMicroelectronics в количестве одиннадцати штук с применением ранее описанного подхода САПОФ. Выбор температурных датчиков данного производителя обусловлен их относительной доступностью, невысоким потребляемым током и широким диапазоном рабочих температур. Основная задача сводилась к проверке работоспособности измерительных устройств на всем диапазоне заявленных производителем температур (от -40 до +100 °С). Для достижения этой цели и проверки функционирования измерительных устройств за его пределами была

использована температурная камера типа Votsch VCL 7063 (рис. 3), установленная на кафедре КиТПЭС института ИРЭФ-ЦТ, КНИТУ-КАИ, которая полностью удовлетворяет поставленным задачам.

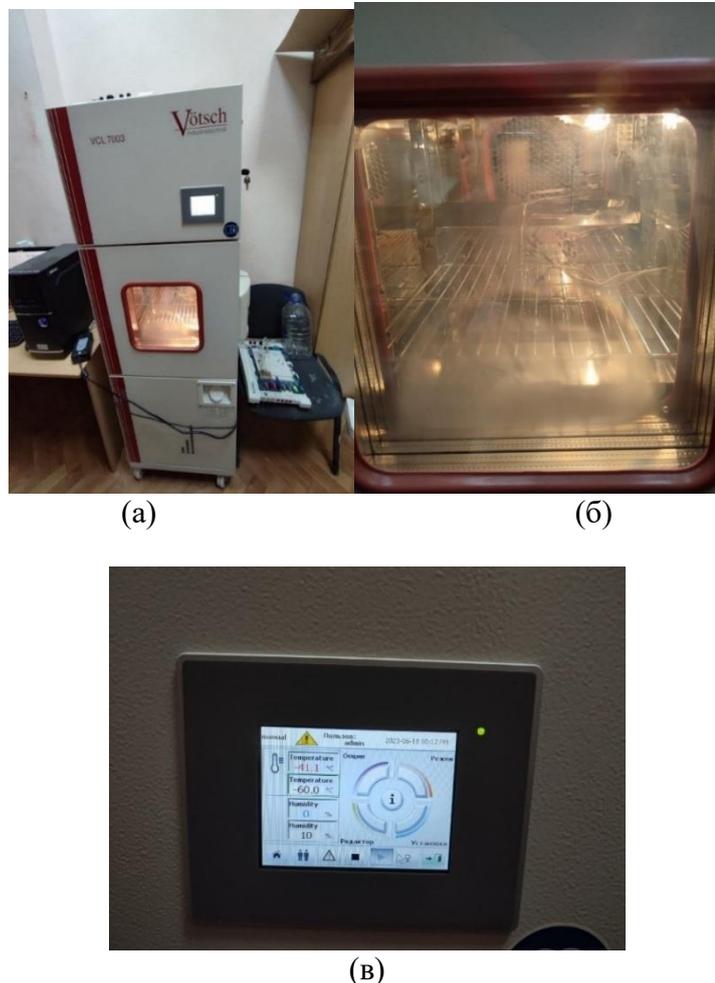


Рис. 3. Использование температурной камеры: а) Внешний вид температурной камеры марки Votsch; б) Фрагмент размещения измерительных устройств в рабочем пространстве; в) Окно настройки температуры и влажности

Ниже приведена обработка данных реальных экспериментальных датчиков в рамках подхода сравнительного анализа сенсорной системы, основные значения параметров сведены в таблице 4. Для удобства восприятия полученных данных на рисунках 4-8 приведены их соответствующие распределения в виде графиков.

Таблица 4. Распределение параметров для значения температуры  $t=60^{\circ}\text{C}$

Param0	Param1	Param2	Param3	Param4	Param5	Param6	Param7	Param8	Param9	Param10	Param11
1.639	1.65	1.646	1.636	1.633	1.64	1.631	1.647	1.635	1.641	1.635	1.63
0.001699	0.00306	0.00306	0.00306	0.002899	0.002899	0.003221	0.003544	0.00306	0.00306	0.00306	0.00306
1.52e-05	-1.899e-05	0.000136	4.527e-06	4.334e-05	1.477e-06	0.0003476	0.0002113	0.0001136	-0.0001621	-7.543e-05	4.919e-05
2.225	3.296	3.389	3.439	3.376	3.259	3.462	3.551	3.567	3.35	3.429	3.395
1.001	0.9877	0.9845	1.003	0.9259	0.9009	1.117	1.127	1.077	0.8177	0.9519	0.9329
-73	-147	-1181	-213	1069	1279	1021	-625	-977	-1493	627	-457
0.0001114	0.000165	0.0001696	0.0001721	0.000169	0.0001631	0.0001733	0.0001777	0.0001785	0.0001677	0.0001716	0.0001699
-0.5002	-0.4969	-0.4961	-0.5007	-0.4808	-0.4739	-0.5276	-0.5298	-0.5186	-0.4498	-0.4877	-0.4826
649.6	538.7	526.2	562.1	551.8	532.8	511.9	501.2	583	520.2	560.5	527.2
453.1	374.2	371.3	391.1	390.3	377.3	359.7	350	409	368.2	391.3	369.2

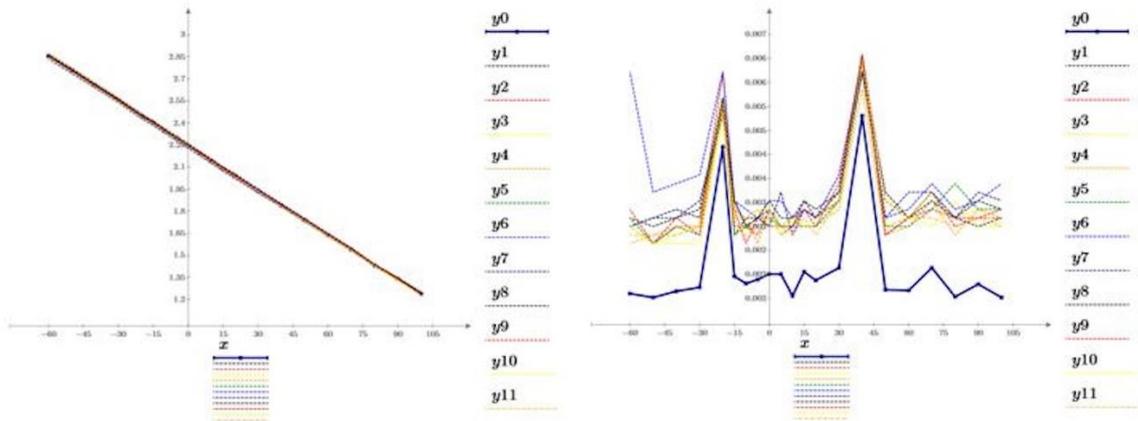


Рис. 4. Графики распределения параметра Pr1 (слева) и Pr2 (справа) на всем температурном диапазоне, где  $y_0$  – эталонный датчик,  $y_1$ - $y_{11}$  – экспериментальные

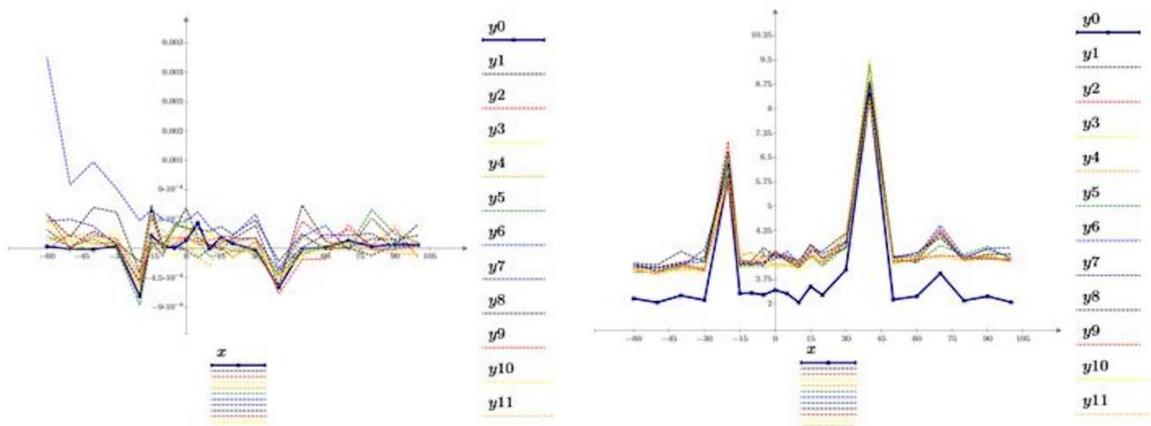


Рис. 5. Графики распределения параметра Pr3 (слева) и Pr4 (справа) на всем температурном диапазоне, где  $y_0$  – эталонный датчик,  $y_1$ - $y_{11}$  – экспериментальные

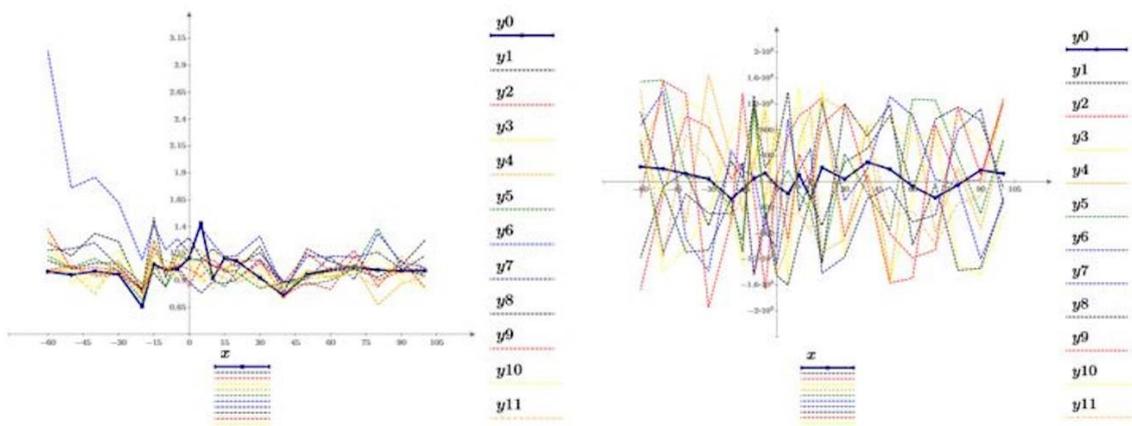


Рис. 6. Графики распределения параметра Pr5 (слева) и Pr6 (справа) на всем температурном диапазоне, где  $y_0$  – эталонный датчик,  $y_1$ - $y_{11}$  – экспериментальные

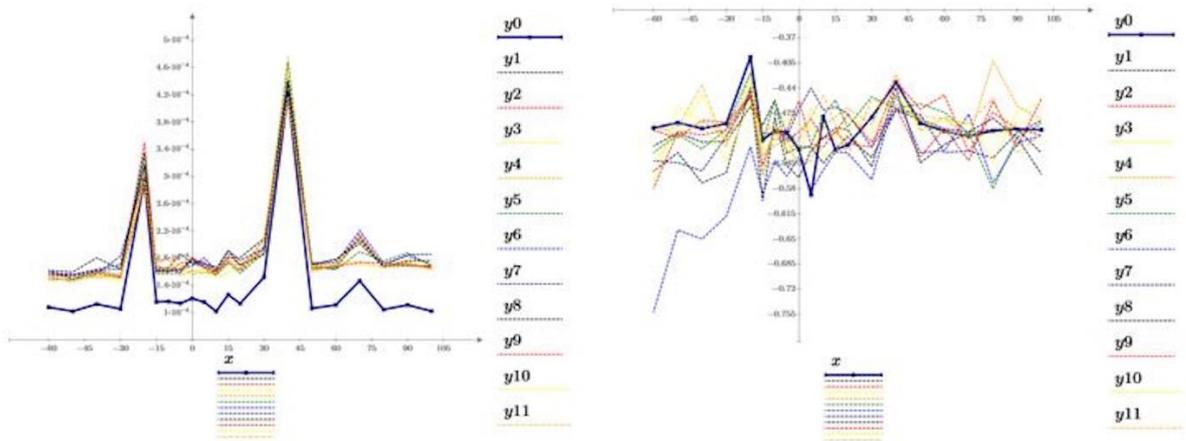


Рис. 7. Графики распределения параметра Pr7 (слева) и Pr8 (справа) на всем температурном диапазоне, где y0 – эталонный датчик, y1-y11 – экспериментальные

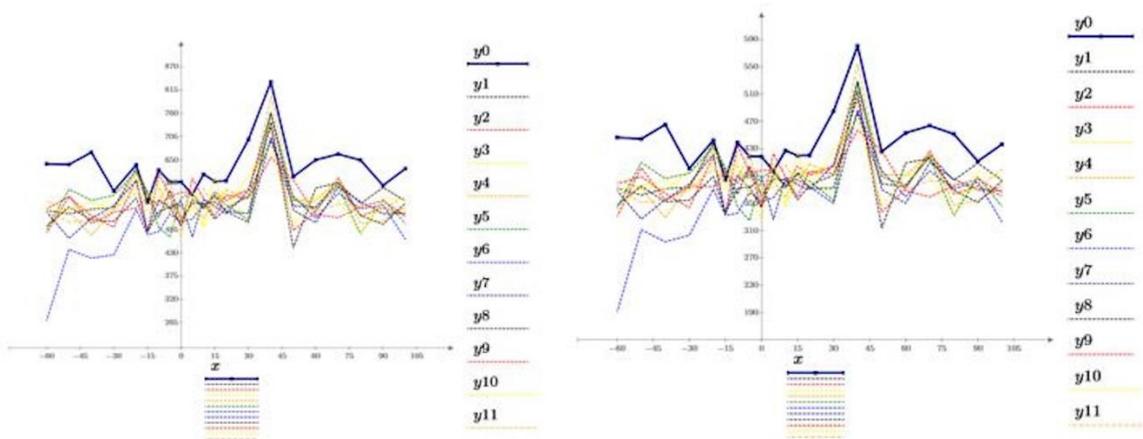


Рис. 8. Графики распределения параметра Pr9 (слева) и Pr10 (справа) на всем температурном диапазоне, где y0 – эталонный датчик, y1-y11 – экспериментальные

Анализ полученных на рисунках 4-8 результатов представлен в таблице 5.

Таблица 5. Описание полученных результатов

Param	mean(corr)	Основные результаты
1	2	3
Pr1	1	С увеличением температуры уменьшается значение выходного напряжения с температурного датчика
Pr2	0.936	Тестовые сигналы практически повторяют форму эталонного образца: наблюдается два пика на температурах порядка -20 и 40 градусах Цельсия
Pr3	0.622	Большинство сигналов коррелирует с эталоном, при этом сильно выделяется датчик под номером 6; имеется два ярко выраженных минимума на температурах порядка -20 и 40 градусов Цельсия так же, как для параметра №2
Pr4	0.99	Тестовые сигналы с высокой степенью точности по форме повторяют эталонный образец, при этом пики максимумов также образуются на тех же температурах, что и два предыдущих параметра -20 и 40 градусов Цельсия

1	2	3
Pr5	0.286	Графики тестовых функций имеют значительные расхождения с эталонным образцом, при этом максимальный коэффициент корреляции Пирсона составляет 0.59 для датчика под номером 4. Минимум выражен на температуре -20 градусов, максимум на 5 градусах Цельсия
Pr6	0.028	Графики тестовых функций совсем не совпадают с эталонным образцом, медианное значение коэффициента корреляции Пирсона не превышает 0.1, при этом датчик под номером 11 показывает наибольшую близость к эталону со значением параметра ККП 0,47
Pr7	0.99	Графики тестовых образцов по форме практически повторяют эталонный образец, наблюдается высокий коэффициент корреляции Пирсона практически для всех образцов, максимумы функций наблюдаются на температурах порядка -20 и 40 градусов Цельсия, так же, как в предыдущих параметрах (№2, №3, №4)
Pr8	0.362	Форма тестовых образцов повторяет форму эталона, минимумы функций наблюдаются на тех же температурах, что и ранее; при этом стоит отметить что еще один ярко выраженный минимум появляется на температуре порядка 70 градусов Цельсия
Pr9	0.59	Главный лепесток эталонной функции практически полностью повторяется тестовыми образцами на температуре порядка 20 градусов Цельсия, при этом боковые лепестки достаточно сильно отличаются
Pr10	0.583	Форма тестовых сигналов практически полностью совпадает с формой эталонного образца, коэффициент корреляции Пирсона РСС имеет высокое значение (порядка 0,9) практически для каждого из рассмотренных тестовых образцов

Проведя дополнительные исследования датчиков такого типа во всем температурном диапазоне с использованием соответствующей температурной камеры, были оценены параметры, указанные производителем, что позволило убедиться в том, что эти датчики могут использоваться и сохранять свои эксплуатационные свойства в критических рабочих ситуациях. Это особенно важно в ряде опасных отраслей и в условиях неблагоприятного климата. Более того, предлагаемая методика позволяет анализировать только шумовые свойства измерительных устройств, выделяя два преимущества: во-первых, данные о "шуме" (в данном случае анализируются случайные флуктуации температуры) рассматриваются как "мусор" и не являются ни собственностью, ни конфиденциальными, поэтому ими можно свободно делиться в научных целях. Во-вторых, проводить анализ данных в рамках неразрушающего контроля, то есть, не вынимая измерительные приборы из блоков, что предполагает сокращение производственных расходов.

Оценка погрешности измерения проводится согласно ГОСТ Р 8.736-2011. Рассмотрим компоненты, вносящие погрешность в получаемые результаты согласно схеме преобразования (датчик-коммутатор-АЦП-вычислительное устройство). Погрешность этих блоков должна соотноситься как  $\gamma_d \geq \gamma_k \geq \gamma_{АЦП} \geq \gamma_{ВУ}$ . В этом случае среднеквадратическая погрешность будет определяться как (7). Показано, что полученные результаты удовлетворяют данной формуле, метод не вносит неконтролируемую ошибку в получаемые результаты.

$$\gamma_{\Sigma} = \sqrt{\gamma_d^2 + \gamma_k^2 + \gamma_{АЦП}^2 + \gamma_{ВУ}^2} \quad (7)$$

Проведение эксперимента на датчиках различной физической природы (датчики давления и температуры, фотодиоды, транзисторы, операционные усилители, а также данные по акустическим шумам морских позволило сформировать объемный массив

данных и сделать заключение об универсальности предлагаемого подхода для данных как природной, так и техногенной составляющей.

#### 4. Выводы и результаты

Проанализируем результаты, полученные в разделе 2, связанные с обработкой модельных данных смеси шума и амплитудно-модулированного сигнала. Заметим, что формула Найквиста (1) связанная с зависимостью температурных флуктуаций от величины температуры (в данном случае значения амплитуды модулированного сигнала), выполняется, что наблюдается на графиках (рис. 1-2). Модификации формулы Найквиста для спектра ЭДС теплового шума (2) также подчиняется общеизвестным законам. Небольшие отклонения от линейной функции связаны со случайным характером шумов, генерируемых встроенной программной функцией и ее конечной характеристикой, определяемой разрешением используемого персонального компьютера и программного обеспечения.

Анализ шумов температурных датчиков (раздел 3) как на широком диапазоне температур, определенных производителем (рис. 4-8), так и за его пределами дает неоднозначную картину. В данном случае имеет смысл выделить три группы параметров. С одной стороны, распределение параметра №1 по температурам не подчиняется формуле Найквиста (1) и, следовательно, по физическому смыслу их нельзя связать с температурными флуктуациями молекул. Однако они описываются линейной зависимостью и могут с достаточно высокой точностью быть подогнанными с помощью совместного использования метода собственных координат и метода наименьших квадратов. С другой стороны, распределение по температуре параметров под номерами 2, 4, 7 имеет два ярко выраженных пика, соответствующих температурам -20 и 40 градусов Цельсия. Это может быть обусловлено особенностями данной группы чипов, когда наибольшее влияние указанных параметров проявляется на конкретном значении температуры. И наконец, параметры под номерами 3, 5, 6, 8 имеют хаотичное распределение без какого-либо возможного известного закона распределения.

Стоит отметить, что последние две группы параметров подлежат более детальной оценке. Их существенное различие в поведении с модельными данными связано с внутренней природой каждого чипа. Вторая группа параметров позволяет оценить соответствие элемента исходной выборке, тогда как температурный датчик другого производителя не показывает сходства на указанных температурных значениях. Этот эффект будет выражен тем выше, чем точнее будет подобран исходный эталонный образец, подлежащий оценке. В условиях рассматриваемой задачи в качестве эталона выбрано среднее арифметическое значение от всех рассматриваемых измерительных устройств. Этот вариант является допустимым в случае большого количества датчиков либо в случае отсутствия эталонного образца, представленных производителем (применительно к рассматриваемой задаче). Третья группа параметров раскрывает всю мощь предлагаемого подхода САПОФ, показывая уникальную природу отдельно взятого измерительного устройства. Это особенность наиболее интересна в сравнении с результатами обработки модельных данных, когда удается точно определить искусственно созданные шумовые флуктуации и сравнить их с шумовыми данными реально существующего измерительного прибора.

Этот эффект может найти широкое применение в различных системах безопасности, например, при идентификации отпечатков (как физических, так и цифровых) и уличить попытку ее обхода искусственно созданными средствами. Несомненно, этот вопрос подлежит более детальной проработке, в том числе на реальных данных более сложных устройств, и выходит за рамки данной исследовательской работы.

## Список литературы

1. Фрактальная радиоэлектроника: в 2 томах / Гильмутдинов А.Х., Никитов С.А., Шахтурин Д.В., Ушаков П.А.; под редакцией доктора технических наук А.Х. Гильмутдинова. Распределенные измерительные среды и системы. Фрактальная обработка сигналов = Фрактальная обработка сигналов / Евдокимов Ю. К., Нигматуллин Р. Р., Денисов Е. С. – Москва: ФИЗМАТЛИТ. - 2024. – 447 с. : ил., табл.; ISBN 978-5-9221-1988-7.
2. Yulmetyev R. Quantification of heart rate variability by discrete non- stationary non-Markov stochastic processes / R. Yulmetyev, P. Hanggi, F. Gafarov // Physical Review E. – 2002. – V. 65. -№ 4. - Art. 046107.
3. Timashev S.F. Science of complexity: Phenomenological basis and possibility of application to problems of chemical engineering /S.F. Timashev // Theoretical Foundation of Chem Engineering. - 2000. – V. 34. – P. 301–312.
4. Nigmatullin R.R. NOCFASS: Quantitative description of the seismic noise-like signals in the earthquake-prone areas /R.R. Nigmatullin, A.K. Rybin, K.S. Nepeina P.A. Kaznacheev// Measurement. – 2021. - V.185. - 110020. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110020>.
5. Raoul Rashid Nigmatullin. New Digital Signal Processing Methods: Applications to Measurement and Diagnostics /Raoul Rashid Nigmatullin, Paolo Lino, Guido Maione // 2020.- Springer Cham. - 443 p., DOI:10.1007/978-3-030-45359-6.
6. Yang Quan Chen. Dynamical features and complete synchronization of unified chaotic systems with Caputo-Hadamard fractional derivative / Yang Quan Chen, Yongjun Shen // Journal of Computational and Nonlinear Dynamics. – 2024. - 20(3). – P.1-29. DOI:10.1115/1.4067416.
7. Bernardo Spagnolo. Generalized Wiener Process and Kolmogorov's Equation for Diffusion Induced by Non-Gaussian Noise Source / Bernardo Spagnolo, Alexander A. Dubkov // Fluctuation and Noise Letters. - 05(02). - 2005. DOI: 10.1142/S0219477505002641.
8. Nigmatullin R.R. A novel method for examining temperature sensor noise: how can the optimal device be selected using the correlation of important parameters?/ R.R. Nigmatullin, V.S. Alexandrov // Электроника, фотоника и киберфизические системы (ISSN: 2782-5507). – 2023. – Т.3. - №3. – С.12-25.
9. Нигматуллин Р.Р., Александров В.С., Насыбуллин А.Р. Способ оценки технического состояния электронного компонента на основе сравнительного анализа положительных и отрицательных флуктуаций. Заявка на патент на изобретение № 2023105598 от 10.03.2023.
10. Nigmatullin R.R. Application of the complex moments for selection of an optimal sensor / R.R. Nigmatullin and V.S. Alexandrov // Sensor, MDPI. – 2021. - 21 (24). - 8242; doi:10.3390/s21248242.
11. Nigmatullin R.R. Description of multi-periodic signals generated by complex systems: NOCFASS – New possibilities of the Fourier analysis / R. R. Nigmatullin, V. S. Alexandrov, Praveen Agarwal, Shilpi Jain, Necati Ozdemir // Numerical Algebra. - January, 2022, DOI:10.3934/naco.2022008.

## METHOD OF ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF SENSOR SYSTEMS BY THEIR ELECTRICAL NOISE CHARACTERISTICS

*V.S. Aleksandrov*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI  
10, Karl Marx str., 420111, Kazan, Russian Federation

**Abstract.** This work is devoted to the application of the method of comparative analysis of the technical condition of sensor systems to the processing of model data (a mixture of amplitude-modulated signal and noise) and real data from experimental temperature sensors. It is shown that the processing of model data within the framework of key parameters obeys a well-known law - the Nyquist formula, while the results of processing experimental data within the framework of the distribution of key parameters do not correlate with it. This, in the author's opinion, is due to the high sensitivity of the method to the universal nature of a single measuring device. The error of the fitting function in model and experimental calculations does not exceed 0.8%, which indicates a high accuracy of the results obtained. Thus, data processing does not introduce uncontrolled error into the results obtained, and the proposed approach can be applied to data without a pronounced trend of any nature, both natural and man-made.

**Keywords:** data processing, correlation analysis, fluctuations, key parameters, fitting function, reference sample.

Статья представлена в редакцию 23.05.2025