

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621.317.08; 621.317.1; 621.317.6

### МЕТОД СИНТЕЗА МОДЕЛЕЙ СИГНАЛОВ В ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

<sup>1)</sup>Горшенков А. А., <sup>1)</sup>Кликушин Ю. Н., <sup>2)</sup>Кошеков К. Т., <sup>3)</sup>Тяпкин С. А.

<sup>1)</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, <sup>2)</sup>Северо-Казахстанский государственный университет, г. Петропавловск, <sup>3)</sup>НПО «Салют», г. Москва

*Описаны структура и принцип действия интеллектуальной системы, синтезирующей модели сигналов в физических экспериментах. Исследуемый временной ряд наблюдений представляется в виде лингвистического терма, по форме и составу аналогичного классической записи сигналов, принятой в технической физике. Система была использована для решения задачи технической диагностики авиационных двигателей путем анализа вибросигналов, с целью обнаружения в них скрытых закономерностей.*

**Ключевые слова:** алгоритм, диагностика, идентификационные измерения, интеллектуальная система, модель сигнала, качественное состояние, количественная оценка, синтезатор записей.

#### Введение

При проведении физических исследований экспериментаторами широко используются различные средства измерений, включая компьютерные. Подобные, виртуальные приборы и системы, позволяют не только повысить качество измерений физических величин в отношении точности и быстродействия, но и полностью автоматизировать измерительный эксперимент.

Однако, какими точными и быстродействующими не были бы современные виртуальные системы измерения, они не дают, даже приближенного, ответа на важнейшие познавательные вопросы, которые неизбежно возникают перед исследователями.

Если исходить из предположения, что полезная информация об объекте исследования заключена в тех сигналах, которые поступают с датчиков физических величин, то первый из этих вопросов будет таким: «Что это за сигнал?». У экспериментатора, как эксперта в некоторой предметной области, сразу возникает множество предположений о возможном характере сигнала, а именно: является ли данный сигнал периодическим или случайным; если ни тем, ни другим, то какое из этих свойств является преобладающим и в какой степени; что можно сказать о симметрии данного сигнала и его форме и, наконец, на какой, из известных, сигналов он больше всего похож.

Второй вопрос: «Какие физические параметры необходимо измерить, чтобы получить максимальное количество *полезной* информации?». Этот вопрос также порождает множество, но уже других, предположений, связанных с выбором измеряемых физических величин (амплитудных, временных, частотных,

фазовых) и форм отображения сигнала (спектральная, корреляционная, вейвлетная и др.).

Третий вопрос: «Связаны ли между собой измеренные параметры и, если связаны, то каким образом?» порождает задачу агрегирования множества экспериментально полученных оценок различных величин в некое компактное суждение, которое, с одной стороны, имеет для пользователя ясный физический смысл, а с другой стороны настолько вариабельно, что позволяет отследить возможную эволюцию сигнала в процессе эксперимента.

Четвертый вопрос: «Возможно ли создание некоторой, базовой модели, в максимальной степени объединяющей множество проявлений различных свойств сигналов?». В данном случае речь идет об унификации формальных записей моделей сигналов для решения задачи их распознавания, сравнения и классификации.

Для получения ответов на поставленные вопросы авторами разработан и апробирован метод синтеза моделей сигналов для физических исследований и реализована интеллектуальная измерительная система, названная синтезатором моделей, описание которой представлено в данной статье.

### **Теория, инструменты и методика эксперимента**

Основополагающая идея данной разработки лежит в области идентификационных измерений (ИИ) – нового научного направления, содержанием которого является измерение формы и вариабельности сигналов [1, 2]. Эта идея исходит из гипотезы, что полная информация о сигнале заключена в его форме. Если это так, то при наличии инструментов измерения формы сигналов, можно оперировать соответствующими числовыми оценками (идентификационными параметрами) и, таким образом, производить с формой сигнала различные преобразования для извлечения необходимой пользователю информации.

Подобные инструменты, на входе которых имеется множество значений, например, временной ряд наблюдений, а на выходе – некоторое число, получили название идентификационных тестеров. Установлено, что между идентификационными числами на выходе тестеров и именами форм распределений мгновенных значений (РМЗ) симметричных случайных сигналов существует логическая связь, которая называется идентификационной шкалой (ИШ). Идентификационные шкалы образуют только те числа, которые отвечают требованиям масштабной инвариантности, идентификационной эквивалентности и согласованной упорядоченности. Поэтому, не всякое отображение множества в число может образовывать ИШ и, соответственно, быть использовано для измерения формы сигналов.

В данном случае, в качестве идентификационного, предлагается использовать, так называемый К-тестер, измеряющий вариабельность [3] в форме:

$$K = \frac{|\overline{\Delta X(t)}|}{|X(t)|} \cong \omega = \bar{A} * F_0, \quad (1)$$

где:  $|\overline{\Delta X(t)}|$  - среднее значение модуля приращений сигнала  $X(t)$ ,  $|\overline{X(t)}|$  - среднее значение модуля сигнала. Физический смысл параметра (K) – угловая скорость вращения вектора сигнала в комплексной плоскости, которая зависит от параметра формы (A) и линейной частоты (F). Если известна аналитическая форма записи входного сигнала  $X(t)$ , то можно получить (точно или приближенно) формулу для расчета параметра (K). Так, например, для синусоидального сигнала параметр  $A = A_{\sin} = 2\pi$  определяет соответствующую форму сигнала. Следовательно, формула (1) агрегирует в себе все многообразие форм сигналов. При этом, если сигнал является случайным, то параметр формы (A) определяет имя плотности вероятности. Для периодического сигнала этот же параметр определяет имя его временной функции. Следует заметить, что параметр формы (A) относится к классу метрических величин, поскольку измеряется в единицах фазы (в радианах).

Дальнейшие рассуждения приводят к необходимости обобщения второго параметра (F) в (1) на класс случайных сигналов. Это обобщение, предложенное в монографии [4], состоит в том, что линейная частота характеризует частоту появления экстремальных значений случайных сигналов за время наблюдения и оценивается как среднее арифметическое по совокупности реализаций. В дальнейшем, величину  $F_0$  будем называть характеристической частотой сигнала. Для периодических сигналов характеристическая частота равна физической частоте, а для постоянных во времени сигналов равна нулю.

В уравнение (1) входит еще один важный параметр сигнала -  $|\overline{X(t)}|$  - его средневыпрямленное значение, которое в сочетании с параметром формы (A) позволяет вычислить амплитудное значение [5]:

$$X_m = 0,25 A_{frm} |\overline{X(t)}|. \quad (2)$$

Познавательное значение соотношения (2) заключается в том, что оно унифицирует измерение амплитуды как периодических, так и случайных сигналов, напрямую связывая их с РМЗ, объясняя тем самым, почему сигналы с «хвостатыми» распределениями имеют, при одинаковом средневыпрямленном значении, большие значения амплитуды, чем сигналы с ограниченными распределениями.

Таким образом, представленные соотношения позволяют определить основные физические параметры, которые можно использовать для формирования идентификационной модели сигналов.

На рис. 1 изображены алгоритм формирования и структура записи модели сигналов, основанные на классическом представлении сигнала, как временной функции проекции вектора, вращающегося в комплексной плоскости:

$$X(t) = X_m FRM(\omega t + \theta) = X_m FRM(A_{frm} F t + \theta), \quad (3)$$

где: лингвистический терм «FRM» обозначает некое, стандартизированное имя сигнала (как, например, SIN – для синусоидального сигнала),  $\theta$  – начальная фаза, принятая равной 0 в дальнейших рассуждениях. При этом, между именем

(FRM, сокращение от FORM) сигнала и численной оценкой ( $A_{frm}$ ) его формы существует логическая, а не аналитическая (т.е. задаваемая формулой) связь.

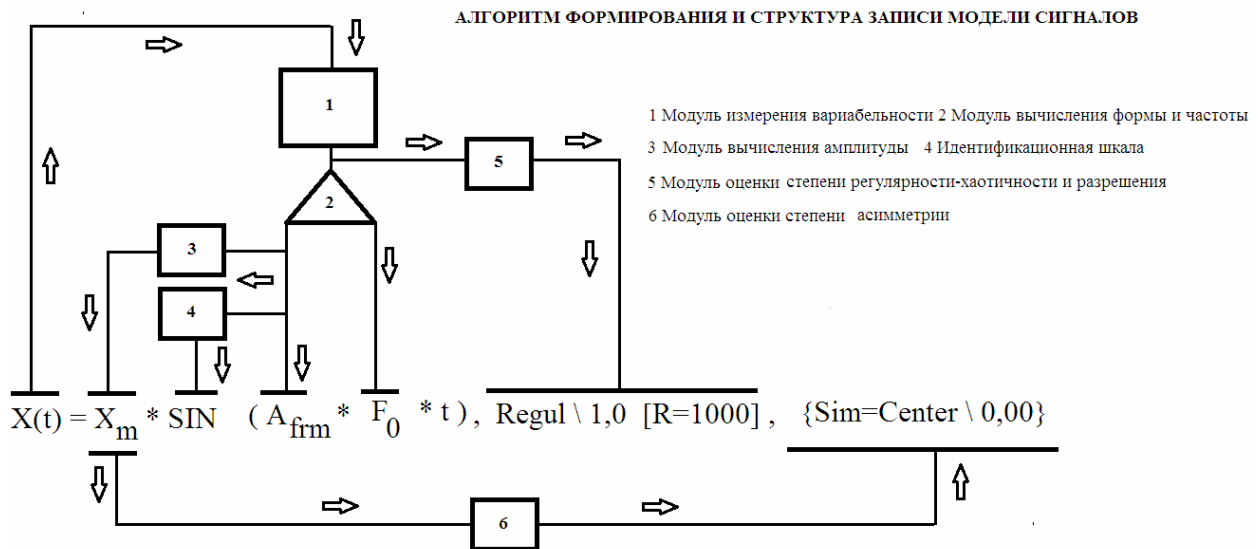


Рис. 1. Алгоритм формирования записи модели сигналов.

Алгоритм содержит 6 основных модулей, ответственных за формирование отдельных компонент записи модели. Первый модуль измеряет variability в форме (1). Второй модуль выделяет параметр формы ( $A_{frm}$ ) и характеристическую частоту  $F_0$ . Третий модуль вычисляет амплитудное значение ( $X_m$ ) сигнала по формуле (2). Четвертый модуль является идентификационной шкалой (табл. 1), с помощью которой оценка параметра формы преобразуется в имя РМЗ одного из случайных сигналов. Поскольку словарь имен периодических сигналов очень ограничен, для обозначения лингвистического термина (FRM) используются имена распределений симметричных случайных сигналов: двумодального (2mod), арксинусного (asin), равномерного (even), треугольного (simp), нормального (gaus), двустороннего экспоненциального (lapl) и Коши (kosh).

Таблица 1. Идентификационная шкала распределений симметричных случайных сигналов

N=10000, L=100	Вид распределения случайного сигнала						
	2mod	asin	even	simp	gaus	lapl	kosh
Rank	1	2	3	4	5	6	7
$A_{frm}$	4	6,28	8	12	19	36	3000
$F_0$	2500	2027	1667	1180	736	416	6
Аналог	squ	sin, cos	tri, saw				

Пятый модуль предназначен для классификации сигналов по признакам регулярности-хаотичности на 5 классов (регулярные, полурегулярные, нуль-регулярные, полухаотические и хаотические) с индикацией степени принадлежности и разрешения (R). Понятие разрешения определяет среднее число от-

счетов дискретной выборочной реализации сигнала, приходящееся на один период характеристической частоты.

Шестой модуль оценивает свойства симметрии сигналов, классифицируя их на три группы: левоасимметричные (Left,  $-1 \leq \text{Sim} \leq -0,05$ ), симметричные (Center,  $-0,05 < \text{Sim} < 0,05$ ) и правоасимметричные (Right,  $0,05 \leq \text{Sim} \leq 1$ ).

Алгоритм (рис. 1) был реализован в среде LabVIEW в виде виртуального прибора, названного синтезатором моделей сигналов. На рис. 2 изображены: структурная схема синтезатора, структура его программного кода, дано описание формата записи модели и, в качестве примера, результат анализа синусоидального входного сигнала.

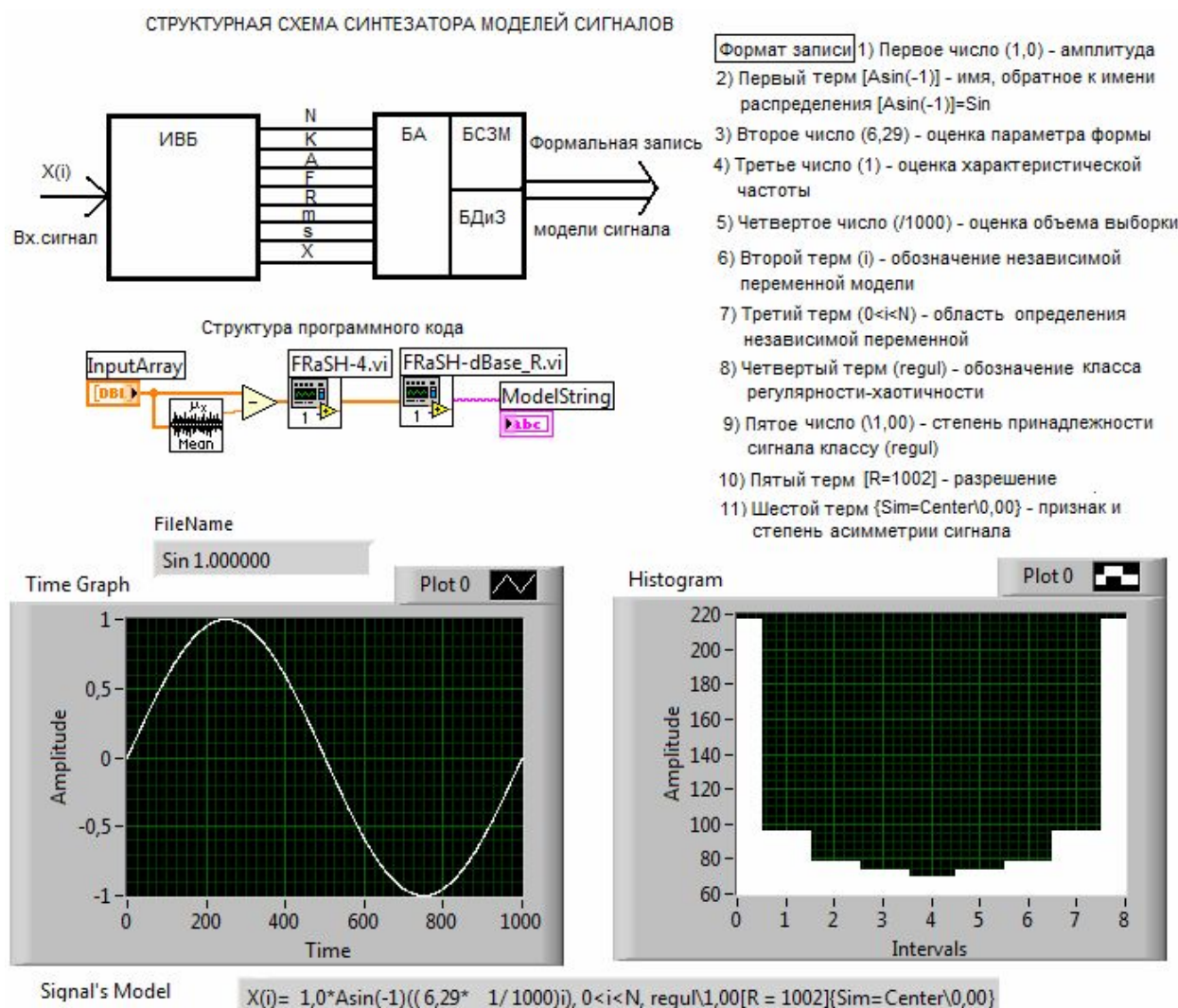


Рис. 2. Структурная схема виртуального синтезатора моделей сигналов.

Синтезатор содержит измерительно-вычислительный блок (ИВБ), на выходе которого из анализируемого входного сигнала формируется 8 количественных параметров, необходимых для работы интеллектуального модуля. Интеллектуальный модуль состоит из блока анализа (БА), базы данных и знаний (БДЗ) и блока создания записи модели (БСЗМ). В структуре программного кода изме-

рительно-вычислительному блоку соответствует модуль FRaSH-4.vi, структура которого дана на рис. 3. Остальные блоки выполнены в виде модуля FRaSH-dBase\_R.vi.

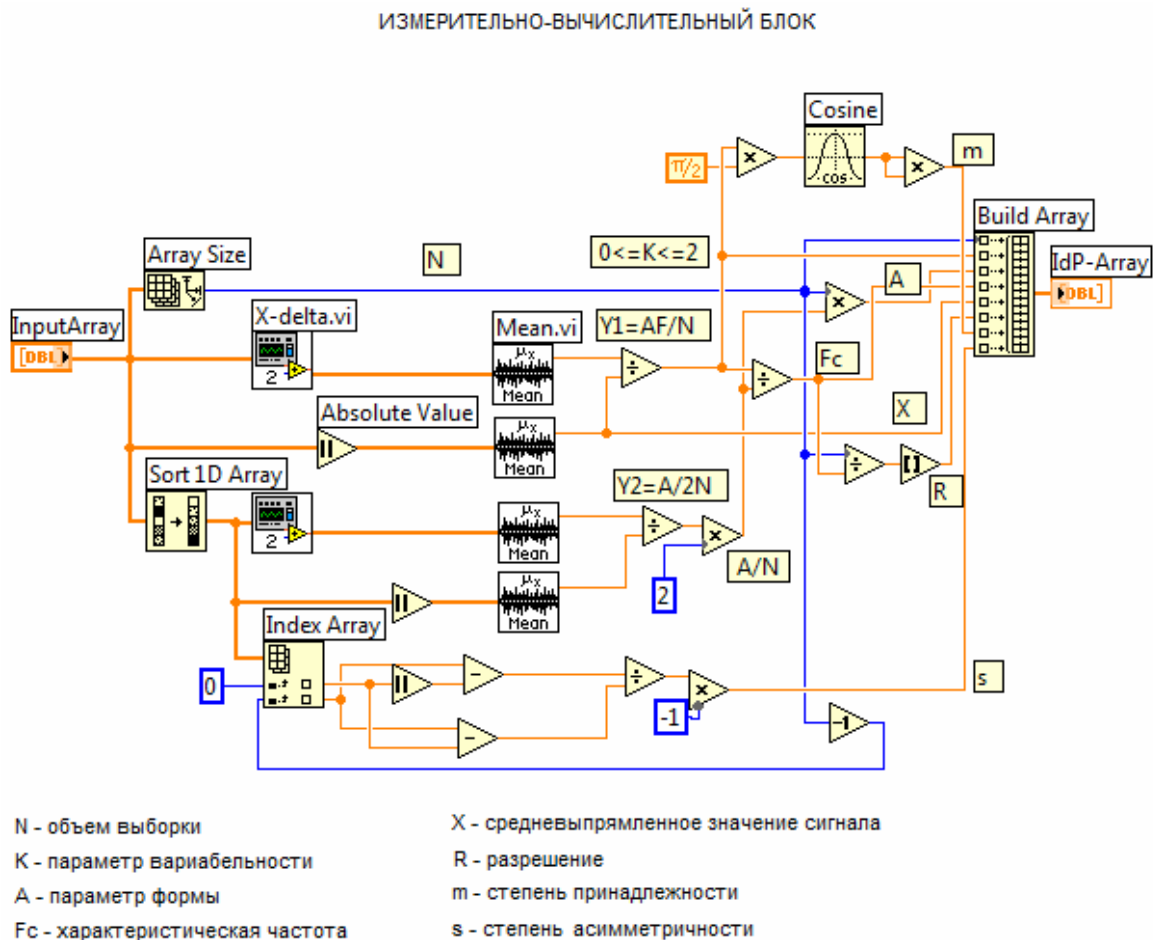


Рис. 3. Структурная схема измерительно-вычислительного блока.

Основная задача ИВБ – измерить систему идентификационных параметров сигнала, которые используются в качестве коэффициентов модели. К измеряемым величинам относятся следующие параметры: объем (N) выборки сигнала, параметр (K) вариабельности, параметр (A) формы и средневывпрямленное значение (X) сигнала. Вычисляемыми являются параметры: характеристическая частота (Fc), разрешение (R), степень принадлежности сигнала классам регулярности-хаотичности (m) и степень (s) асимметричности. Все модули, за исключением одного (X-delta.vi), структурной схемы ИВБ являются стандартными библиотечными приборами среды LabVIEW.

Методика эксперимента включала два этапа. На первом этапе проверялась правильность работы синтезатора, критерием которой служила адекватность записи модели физическому смыслу тестового сигнала. В качестве тестовых, использовались периодические сигналы прямоугольной (squ), синусоидальной (sin), треугольной (tri) и пилообразной (saw) формы разной амплитуды и частоты, а также случайные сигналы, служащие эталонами ИШ (табл. 1). Второй этап



имел исследовательский характер и состоял в том, чтобы проследить эволюцию сигналов, относящихся к полетным испытаниям авиационных двигателей.

Исследовательская ситуация заключалась в следующем. Новый или капитально отремонтированный двигатель устанавливался на самолет, который совершал несколько полетов разной продолжительности. В каждом из полетов варьировались нагрузки на двигатель и условия полета. Общая длительность испытаний определялась наработкой на отказ, когда испытуемый двигатель либо сам полностью выходил из строя, либо принудительно останавливался, поскольку его дальнейшая эксплуатация могла привести к катастрофическим последствиям. Состояние двигателя контролировалось экспертами по результатам измерения виброскорости. При этом, первые три (из 13) полета, по мнению экспертов, характеризовались нормальным функционированием двигателя, а последние 3 – явно дефектным состоянием, в результате чего пришлось принудительно отключить двигатель в последнем 13 полете.

Полная картина изменения состояния двигателя представлена (рис. 4) сигналом полного жизненного цикла (ПЖЦ), который представляет собой соединенные последовательно графики сигналов с отдельных полетов.

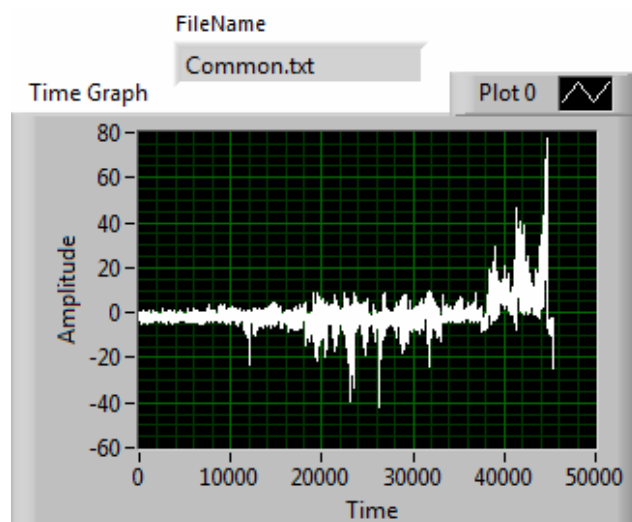


Рис. 4. Сигнал полного жизненного цикла исследуемого объекта.

Задача состояла в том, чтобы визуализировать процесс перехода объекта от нормального состояния к дефектному, разделить этот процесс на участки, соответствующие категориям НОРМ, НОРМ-ДЕФЕКТ и ДЕФЕКТ, и оценить длительности этих участков в единицах количества отсчетов сигнала ПЖЦ. В качестве основы решения указанной задачи предлагалось исследовать эволюцию модели сигнала ПЖЦ при сканировании его внутренней структуры.

### Результаты исследования

В табл. 2 помещены данные о длительности отдельных полетов, выраженной в единицах отсчетов. На рис. 5 представлены результаты идентификацион-

ных измерений основных параметров сигнала ПЖЦ при его сканировании по длине.

Таблица 2. Длительность полетов, в условных единицах (отсчетах)

	Номера полетов												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Длительность	2813	6488	2188	3243	3726	4267	3088	3721	3557	5042	2890	2788	1553
Накопленная длительность	2813	9301	11489	14732	18458	22725	25813	29534	33091	38133	41023	43811	45544
Длина сигнала ПЖЦ	45344												

Визуальное сравнение полученных графиков (рис. 5) показывает, что, во-первых, наиболее информативными являются 3 распределения из 6: параметра формы (A-Num), характеристической частоты (F-Num) и разрешающей способности (R-Num). Именно для этих зависимостей наблюдается наилучшая корреляция с номерами полетов.

Во-вторых, наличие скачков на графиках (A-Num, F-Num, R-Num) естественным образом формирует такие участки сигнала, которые характеризуют качественно различное состояние объекта. При этом число скачков определяет границы и количество участков, в пределах которых режим работы объекта можно считать стационарным.

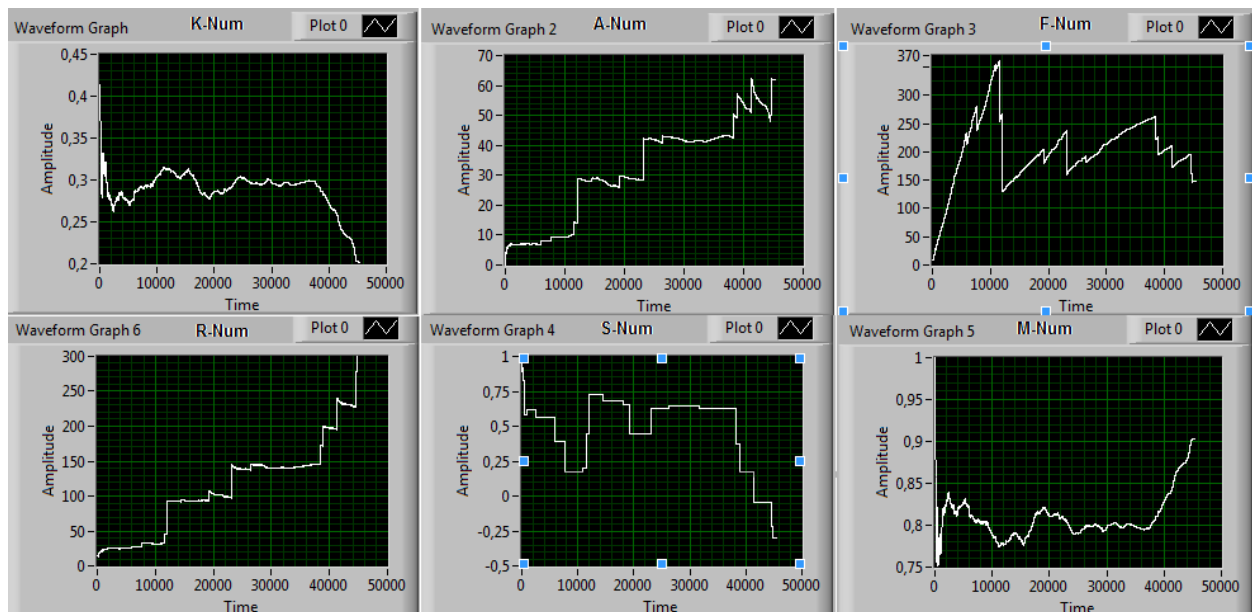


Рис. 5. Распределения оценок идентификационных параметров по длине сигнала ПЖЦ.

В-третьих, можно агрегировать несколько мелких соседних скачков и, таким образом, уменьшить количество участков стационарности. Так, например, на графике (A-Num) из 8-9, явно выделяются всего 4 участка длительностью: 1)  $T_1$  от 0 до 12000, 2)  $T_2$  от 12000 до 24000, 3)  $T_3$  от 24000 до 38000, 4)  $T_4$  от 38000 до



конца (45344) отсчетов. В частности, окончание первого участка стационарности совпадает с появлением на графике сигнала ПЖЦ первого (отрицательного) импульса. Положение этого импульса соответствует началу 4-го полета. Второй участок стационарности практически совпадает с окончанием 7-го полета. Третий участок продолжается до 10-го полета включительно. Четвертый участок характеризуется слабой стационарностью и заканчивается 13-ым полетом.

В-четвертых, анализ скорости изменения характеристической частоты по графику (F-Num) дает возможность оценить верхнюю временную границу допустимого функционирования объекта. Если на 1, 2 и 3 участках эта скорость ( $V1 = 0,03$ ;  $V2 = 0,01$ ;  $V3 = 0,008$ ) имела знак плюс, то на последнем участке ( $V4 = -0,21$ ) она стала отрицательной. Следовательно, верхняя временная граница допустимого функционирования объекта определяется окончанием 3-го участка стационарности (10 полет), что соответствует примерно 38000 отсчетов. Фактически, данная оценка задает временной ресурс безаварийного функционирования объекта.

При анализе процессов, показанных на рис. 5, возник вопрос: «Не является ли наличие характерных скачков на диаграммах (A-Num, F-Num, R-Num) просто следствием некорректной стыковки файлов сигналов с соседних полетов?» Ответ на этот вопрос получается отрицательным, если проанализировать отдельно, например, сигнал с 4-го полета (рис. 6), в пределах которого появляется первый скачок амплитуды сигнала ПЖЦ (рис. 4).

В частности, на диаграммах (A-Num, F-Num) видно, что скачок формы ( $\Delta A = 45,5 - 20 = 25,5$ ) сигнала расположен на удалении примерно в 600 отсчетов от начала процесса измерений, что составляет 12089 отсчетов. Более того, хорошо просматривается горизонтальный участок стационарности, не имеющий сколько-нибудь значительных флуктуаций формы сигнала. Следовательно, можно сделать однозначный вывод о том, что ступенчатый характер изменения идентификационных параметров (A-Num, F-Num, R-Num), обусловлен нестационарными свойствами сигнала ПЖЦ. В свою очередь, нестационарность сигнала, проявляющаяся в изменении формы во времени, является отражением действия дефектов, зарождающихся и развивающихся в объекте исследования.

Таким образом, эволюция свойств объекта исследований может быть выражена в виде классификационной таблицы (табл. 3).

### **Выводы и рекомендации**

1. Предлагаемый метод позволяет синтезировать модели сигналов в виде универсальных алгоритма (рис. 1) и записи (3), которые представляют как стационарные, так и нестационарные сигналы разных форм, степени регулярности-хаотичности и асимметричности.
2. Полное определение модели требует измерения 8 идентификационных параметров, источником которых является угловая скорость вращения вектора в комплексной плоскости.
3. Основным неформальным, лингвистическим компонентом модели (3) явля-

ється ИШ (табл. 1), связывающая идентификационные параметры между собой и определяющая имя сигнала.

4. Применение модели позволяет выявлять наличие в структуре сигналов стационарные и нестационарные участки и оценивать их параметры.

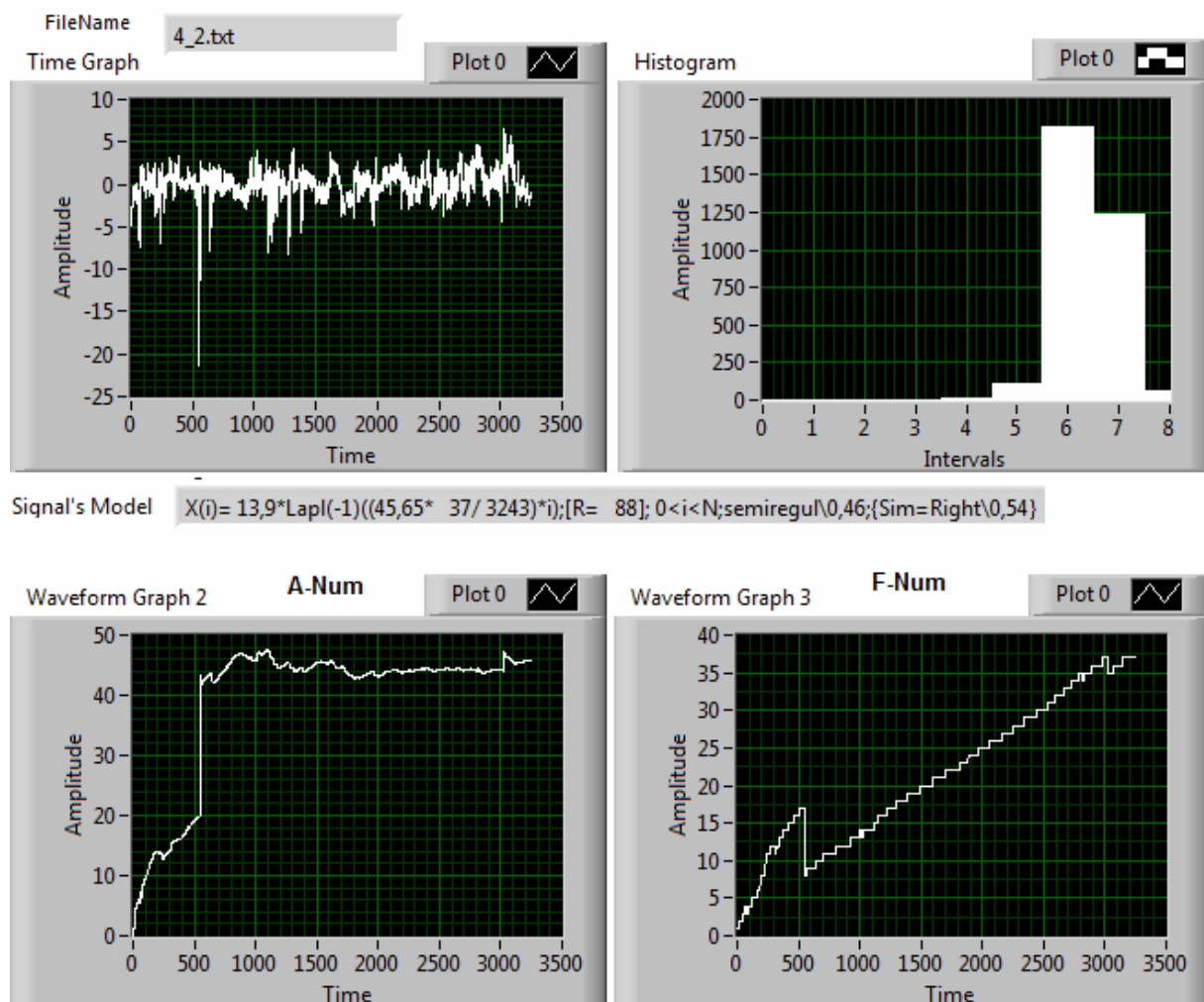


Рис. 6. Модел сигнала 4-го полета и графики изменения формы и характеристической частоты по длине сигнала.

Таблица 3. Классификация свойств нормальности-дефектности объекта

	Классы эволюции объекта			
	НОРМ	НОРМ-ДЕФЕКТ	ДЕФЕКТ-НОРМ	ДЕФЕКТ
Границы участков стационарности в № полетов	(3)-4	(6)-7	(9)-10	13
Границы в единицах отсчетов	12089	23125	35291	45344
Погрешность, %	7,3	30	7,7	0

В теоретическом плане перспективы применения идентификационной модели связаны с установлением единой методологии анализа произвольных сигналов во временной области. Прикладное значение метода состоит в унификации решений задач технической и медицинской диагностики, как задач количественного оценивания фундаментальных свойств (регулярности-хаотичности, стационарности-нестационарности, симметрии-асимметрии, формы и variability) сигналов.

### Литература

1. Кликушин Ю. Н. Технологии идентификационных шкал в задаче распознавания сигналов: (Монография) / Ю. Н. Кликушин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2006. – 96 с.
2. Кликушин Ю. Н., Кошеков К. Т. Методы и средства идентификационных измерений сигналов: (Монография) / Ю. Н. Кликушин, К. Т. Кошеков. – Петропавловск: Изд-во СКГУ им. М. Козыбаева, 2007. – 186 с.
3. Кликушин Ю. Н. Модель роста популяции в задаче автоматической классификации сигналов / Ю. Н. Кликушин, К. Т. Кошеков // Омский Научный Вестник. – 2005. – № 4 (33). – С.160–163.
4. Кликушин Ю. Н. Идентификационные инструменты анализа и синтеза формы сигналов: монография / Ю. Н. Кликушин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 216 с.
5. Измерения в электронике: [Справочник] / Под ред. В. А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 511 с.

### References

1. Klikushyn J. N. Identification scales technologies in discrimination signals problem: (Monography) / J. N. Klikushyn. – Omsk: Izd-vo OmSTU, 2006. – 96 p. [rus]
2. Technique and measures of signals identification measurements: (Monography) / J. N. Klikushyn, K. T. Koshekov. – Petropavlovsk: Izd-vo SKGU im. M. Kozybaeva, 2007. – 186 p. [rus]
3. Klikushyn J. N. Population growth model in automatic classification problem / J. N. Klikushyn, K. T. Koshekov // Omsk Scientific Bulletin. – 2005. – № 4 (33). – P.160 – 163. [rus]
4. Klikushyn J. N. Identification analysis and synthesis of signal form instruments: (Monography) / J. N. Klikushyn. – Omsk: Izd-vo OmSTU, 2010. – 216 p. [rus]
5. Measurements in electronics: [Reference book] / underred. V. A. Kuznetsov. – M.: Energoatomizdat, 1987. – 511 p. [rus]

<sup>1)</sup>А. А. Горшенков, <sup>1)</sup>Ю. Н. Кликушин, <sup>2)</sup>К. Т. Кошеков, <sup>3)</sup>С. А. Тяпкин

<sup>1)</sup>Омський державний технічний університет, м. Омськ, <sup>2)</sup>Північно-Казахстанський державний університет, м. Петропавловськ, <sup>3)</sup>НПО «Салют», м. Москва

### МЕТОД СИНТЕЗУ МОДЕЛЕЙ СИГНАЛІВ У ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Описані структура та принцип дії інтелектуальної системи, що синтезує моделі сигналів у фізичних експериментах. Досліджуваний часовий ряд спостережень наводиться у вигляді лінгвістичного терму, за формою та складом аналогічного класичному запису сигналів, прийнятому у технічній фізиці. Система була використана для розв'язку задачі технічної діагностики авіаційних двигунів аналізом вібросигналів, з метою виявлення в них прихованих закономірностей.

**Ключові слова:** алгоритм, діагностика, ідентифікаційні вимірювання, інтелектуальна система, модель сигналу, якісний стан, кількісна оцінка, синтезатор записів.

<sup>1)</sup>A. A. Gorshenkov, <sup>1)</sup>J. N. Klikushin, <sup>2)</sup>K. T. Koshekov, <sup>3)</sup>S. A. Tyapkin

<sup>1)</sup>Omsk State Technical University, Omsk, Russia; <sup>2)</sup>North Kazakhstan State University, Petropavlovsk, Kazakhstan; <sup>3)</sup>NGO "Salut", Moscow, Russia

### METHOD FOR SYNTHESIS OF MODELS OF SIGNALS IN PHYSICS RESEARCH

The structure and principle of the intelligent system, synthesizing a model of signals in the physical experiments. Analyzed the time series of observations can be represented as linguistic terms, form and composition, similar to the classic recordings of signals adopted in technical physics. System was used to solve the problem of technical diagnostics of aircraft engines by analyzing vibrosignals, in order to detect a hidden patterns.

**Keywords:** algorithm, diagnostics, identification of measurement, intelligent, model signal quality state, quantification, synthesizer records.

*Надійшла до редакції  
2 листопада 2011 року*

УДК 621.396

## РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИЙ КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ И ПРОГНОЗА ДОСТУПНОСТИ ГЛОБАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

*Успенский В. Б., Асютин А. Д.*

*Национальный Технический Университет «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков, Украина*

*Рассматриваются вопросы построения алгоритма контроля целостности и прогноза доступности глобальной спутниковой радионавигационной системы (СРНС) на примере ГЛОНАСС. Составлена математическая модель движения навигационных спутников, получен алгоритм расчета зон видимости спутников. Для полученного алгоритма контроля целостности СРНС была проведена оптимизация, в результате чего получены две его модификации. Данные модификации отличаются по вычислительной сложности и точности работы. Эффективность работы всех полученных алгоритмов и адекватность всех составленных математических моделей проверена путем компьютерного моделирования.*

**Ключевые слова:** *глобальная спутниковая навигационная система, контроль целостности, прогноз доступности.*

### **Введение. Постановка проблемы**

Понятие целостности навигационной системы (НС) подразумевает под собой способность системы генерировать своевременные предупреждения, когда система не может быть использована для навигации. Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) предоставляют пользователю данную информацию в своих навигационных сообщениях, однако этого может быть недостаточно для некоторых критичных областей использования НС, например, на гражданских самолетах. Таким образом, необходимо использовать дополнительные методы оценки целостности СРНС.

Полностью развернутая глобальная спутниковая радионавигационная система (СРНС) включает не менее 24 спутников. Благодаря такому расположению в любой точке земного шара в каждый момент времени теоретически доступны сигналы не менее, чем от 4-х спутников, что позволяет вычислять по сигналам спутников координаты и скорость объекта [1]. Однако на практике, в силу многих причин, возможны интервалы времени, в течение которых наблюдается менее 4 навигационных спутников. Так, по данным расчетов, при ограничении уг-