

УДК 519.216

У.Э. САТТАРОВА

ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ЭКСПЛУАТИРУЕМОМ МОСТУ

Описывается процесс проведения реального натурного эксперимента для практического подтверждения эффективности предложенных технологий. Предлагается новое программное обеспечение для исследования реального стохастического процесса. Технология и программное обеспечение предназначены для оперативного вычисления, анализа адекватных оценок статистических характеристик с высокой точностью, подтверждающих эффективность разработанной технологии.

Ключевые слова: реальный сигнал, помеха, стохастические характеристики, среднеквадратическое отклонение, корреляционная функция, дисперсия помехи

1. Введение. Все наблюдаемые процессы, характеризующие физические явления, можно классифицировать в самом общем виде как детерминированные и недетерминированные. К детерминированным относятся процессы, физические явления, которые с высокой степенью приближения могут быть описаны точными математическими соотношениями. Однако встречается великое множество процессов, которые нельзя описать точными математическими соотношениями. Точное значение такого процесса в некоторый момент времени в будущем предсказать невозможно. Эти процессы случайны по своей природе и должны описываться не точными уравнениями, а с помощью осредненных статистических характеристик [1, с.9].

Практически решение о детерминированном или случайном характере процесса принимается обычно исходя из возможности или невозможности воспроизведения его при заданных условиях. Если многократное повторение опыта дает одинаковые результаты (с точностью до погрешности измерения), то можно считать процесс детерминированным. Если повторение опыта в идентичных условиях приводит к различным исходам, то природу процесса полагают случайной.

Процессы, описывающие детерминированные явления, могут быть периодическими и непериодическими. Периодические процессы можно разделить на гармонические и полигармонические.

Случайные процессы делят на стационарные и нестационарные. Стационарные случайные процессы могут быть эргодическими и неэргодическими.

При экспериментальных исследованиях различных объектов чрезвычайно важно учитывать классификационные признаки изучаемых процессов.

В данной работе натурный эксперимент отражал реальные условия, т.к. проводился на эксплуатируемом мосту в центре города Баку с довольно высокой напряженностью и плотностью потока.

Особенностью современных исследуемых объектов является также их большая сложность, которая проявляется в значительном числе и многообразии параметров, определяющих течение процессов, многочисленных внутренних связях между параметрами, их взаимном влиянии, причем таком, что изменение одного параметра вызывает изменение других [2, с.5-15].

Если все входные параметры изучаемой системы обозначить Y , а все выходные соответственно X , то процесс моделирования сводится к переработке входной информации в выходную и установлению вида математической зависимости между выходными и входными параметрами системы:

$$Y = \Phi(X, Z, U), \quad (1.1)$$

где Z – возмущающие воздействия; U – управляющие воздействия.

2. Постановка задачи. Средства измерений разных видов в процессе экспериментальных исследований выполняют различные функции, причем каждому из видов приписываются некоторые номинальные характеристики. Однако при любом измерении имеется погрешность, представляющая собой отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Погрешности средств измерений представляют в форме абсолютных, относительных или приведенных погрешностей [1, с.39].

Абсолютная погрешность средства измерений равна разности между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины.

Погрешность средства измерений определяют либо по входным, либо по выходному параметру. Абсолютная погрешность средства измерения по выходному параметру равна разности между истинным значением на выходе средства измерения, отображающим измеряемую величину, и значением на выходе, определяемым по истинному значению на входе с помощью номинальной функции преобразования, средства измерения. Указанную погрешность можно представить в виде

$$\Delta_{\text{вых}} = y - f_n(x), \quad (2.1)$$

где $\Delta_{\text{вых}}$ – абсолютная погрешность по выходному параметру; x – истинное значение параметра на входе; $f_n(x)$ – номинальная функция преобразования; y – истинное значение на выходе.

Абсолютная погрешность средства измерения по входному параметру определяется формулой

$$\Delta_{\text{вх}} = f_n^{-1}(y) - x, \quad (2.2)$$

где $f_n^{-1}(y)$ – функция, обратная номинальной функции.

Чтобы можно было сравнить по точности измерительные приборы с разными пределами измерений, введено понятие приведенной погрешности, под которой понимают отношение абсолютной погрешности прибора к номинальному значению:

$$\gamma = \Delta/x_n. \quad (2.3)$$

Приведенную погрешность обычно выражают в процентах.

Как отмечалось, погрешность средств измерений делят на основные (при нормальных условиях использования) и дополнительные (при отклонении условий от нормальных).

При анализе погрешностей средств измерений и выборе способов их уменьшения весьма важным является деление погрешностей по их зависимости от значения измеряемой (преобразуемой) величины. По этому признаку погрешности классифицируют на аддитивные и мультипликативные.

Абсолютная аддитивная погрешность не зависит от значения измеряемой величины, а мультипликативная – ему пропорциональна. Относительная аддитивная погрешность обратно пропорциональна значению измеряемой величины, а относительная мультипликативная от нее не зависит. Аддитивную погрешность иногда называют погрешностью нуля, а мультипликативную – погрешностью чувствительности. Реально погрешность средства измерений включает обе указанные составляющие.

Наибольшая (полученная экспериментально) разность между повторными показаниями измерительного прибора при одном и том же действительном значении измеряемой

величины и неизменных внешних условиях называется вариацией [2, с.5-37]. У показывающих приборов вариацию можно обнаружить, если изменять действительное значение измеряемой величины от нижнего до верхнего пределов, а затем в обратном порядке, отмечая соответствующие этим значениям показания прибора. Для интегрирующих приборов, отсчет которых не может быть повторен, за вариацию принимают наибольшую разность между отдельными погрешностями, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины при прочих равных условиях. Погрешности, вызываемые вариацией, могут внести серьезные искажения в результате измерений, поэтому значение их регламентируется. Обычно значение допускаемой вариации регламентируется в пределах $W=(1 \dots 1,5) \Delta$, где Δ – предел допустимой основной погрешности.

В зависимости от характера изменения измеряемой величины при измерении могут возникнуть статическая и динамическая погрешности. Статической погрешностью средства измерений называется погрешность, возникающая при измерении постоянной величины. Динамической погрешностью средства измерений называется разность между погрешностью измерений в динамическом режиме и его статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени.

На погрешность средств измерений влияют недостатки их изготовления (неточности изготовления деталей, несоблюдение технологии изготовления, неточности сборки и т. П.). Эти причины приводят к систематической погрешности средств измерений, под которой понимают составляющую погрешности, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся.

На погрешность средств измерений влияют внешние условия, при которых они используются (температура, давление, магнитное поле и др.). Отличие этих условий от нормальных приводит к дополнительным погрешностям. Основной погрешностью средств измерений называют погрешность, которая возникает при работе в нормальных условиях. Случайной погрешностью называют погрешность, изменяющуюся случайным образом.

Близость значений результатов измерений, выполненных в одинаковых условиях, отражает сходимость измерений. Сходимость тем лучше, чем меньше случайные погрешности.

В любом случае результаты измерения представляют собой сумму систематической и случайной составляющих. Поэтому погрешность результата измерений в общем случае следует рассматривать как случайную величину, математическое ожидание которой есть систематическая погрешность. Тогда центрированная случайная величина (центрированной случайной величиной называется величина, от значения которой вычтено математическое ожидание. В случае сигнала, то он называется центрированным, если от значения в каждой точке вычтено математическое ожидание) будет равна случайной погрешности.

Тем не менее, следует отметить, что случайные погрешности измерения в большинстве случаев подчинены следующим условиям: равные по абсолютному значению и обратные по знаку погрешности равновероятны; малые по абсолютному значению погрешности более вероятны, чем большие; вероятность появления погрешностей, превосходящих по значению некоторое определенное число, практически равна нулю (это число обычно называют пределом возможных погрешностей и обозначают E). Если случайные погрешности в соответствии с принятыми условиями распределены по нормальному закону, то распределение погрешностей имеет вид:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.4)$$

где σ^2 – дисперсия измерений; $\bar{x}$ – центр рассеивания.

Одним из основных статистических характеристик является дисперсия сигнала. В

случае смоделированного сигнала, значения дисперсии, вычисленные по стандартным формулам [1, с.5] никаких сложностей не представляет, и погрешности могут быть исключительно погрешностями средств измерения, т.е. метрологического характера. Однако, в случае, когда измеряется дисперсия реального сигнала, промышленного характера, кроме погрешности измерений возникают и более ощутимые погрешности, связанные с аналитическими неточностями. В работах [3-7] предложены технологии адекватного нахождения статистических характеристик зашумленных сигналов. В данной статье будет рассмотрена исключительная прикладная сторона вопроса.

3. Трудности проведения натурального эксперимента. Подбор соответствующих комплектующих. Для проведения необходимых исследований и натурального эксперимента понадобились соответствующие разрешения ответственных структур, т.к. мосты являются стратегическими объектами.

После необходимых процедурных этапов было получено разрешение на установку, сконструированного в специальном конструкторском бюро Национальной Академии Наук Азербайджана (СКБ НАНА), специального оборудования.

Оборудование было установлено на одном из первых мостов города, по адресу улице Аб. Бакиханова, город Баку (Рис.1).

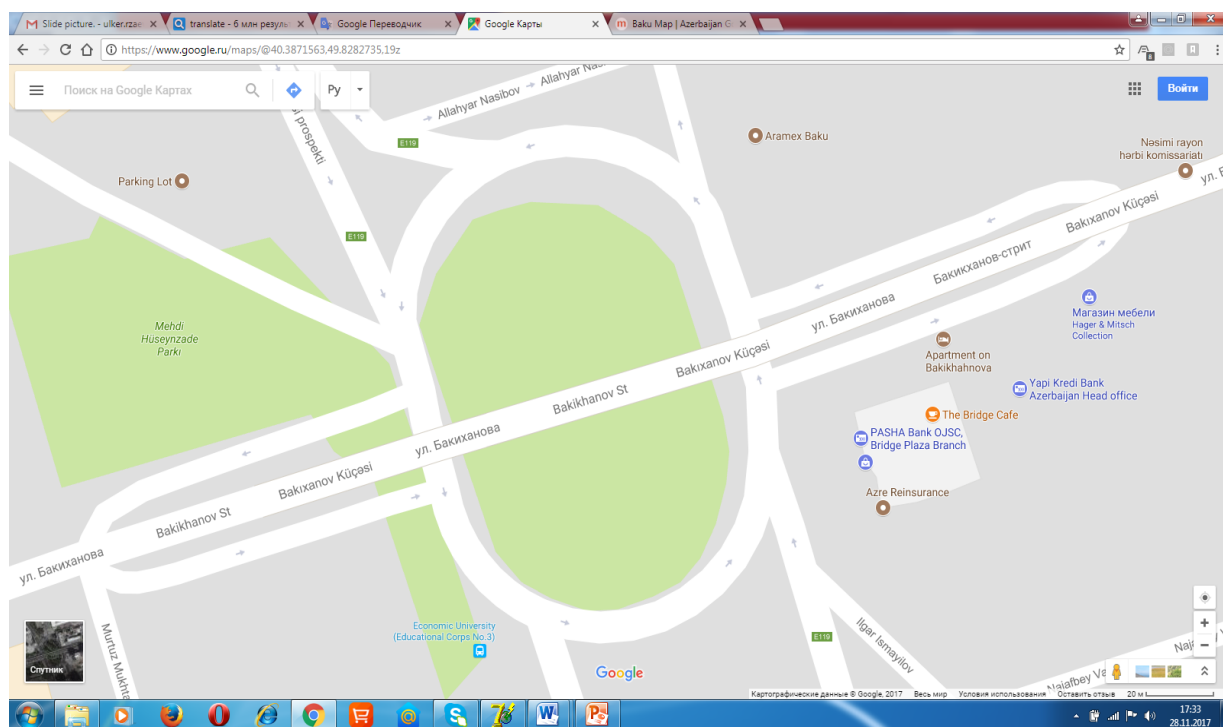


Рис.1. Карта с сайта Googlemap

В то же время для изготовления необходимой установки имелась необходимость покупки гидрофона. Были выбраны гидрофоны марок 8103/8104/8105 или 8106 известной датской фирмы Briel and Kjaer. Показатели и характеристики данных гидрофонов были достаточно высоки, однако высокая цена данного оборудования заставила искать иные варианты. Таким образом, был приобретён другой гидрофон российского производства ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы» марки Гидрофон ВС312 (Рис.3, № 5). Кроме того, к нему был подключен усилитель (Рис.3, №6), а тот в свою очередь, к российскому микроконтроллеру марки CPU188 фирмы «Fastwel» (Рис.3, № 4). Полученная информация поступала к выделенному компьютеру (Рис.3, № 1), подключенному к UPS

(Рис.3, № 2), на случай сбоя в электропитании, в следствие которого могло произойти потеря, набранных в течение дня данных. К UPS, кроме компьютера был также подключен и микроконтроллер. UPS в свою очередь был подключен к стабилизатору (Рис.3, № 3), обеспечивающему постоянный электрический ток в 220V. Постоянная подача электричества на пролетное строение (рядом с опорной частью) была обеспечена, посредством специального охранного помещения, построенного под мостом. Схематическое расположение оборудования и структурная схема опытного образца представлены соответственно на Рис.2 и Рис.3.

- 1 – пролетное строение;
- 2 – свая;
- 3 – сборный ригель;
- 4 – опорная часть;
- 5 – охранный помещение;
- 6 – установленное оборудование;
- 7 – кабель, доставляющий электричество.

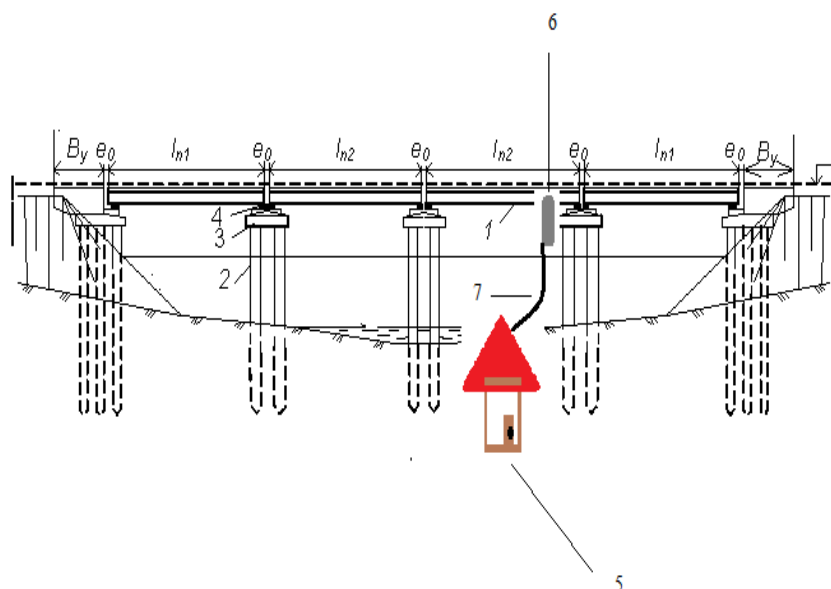


Рис. 2. Схематическое расположение оборудования.

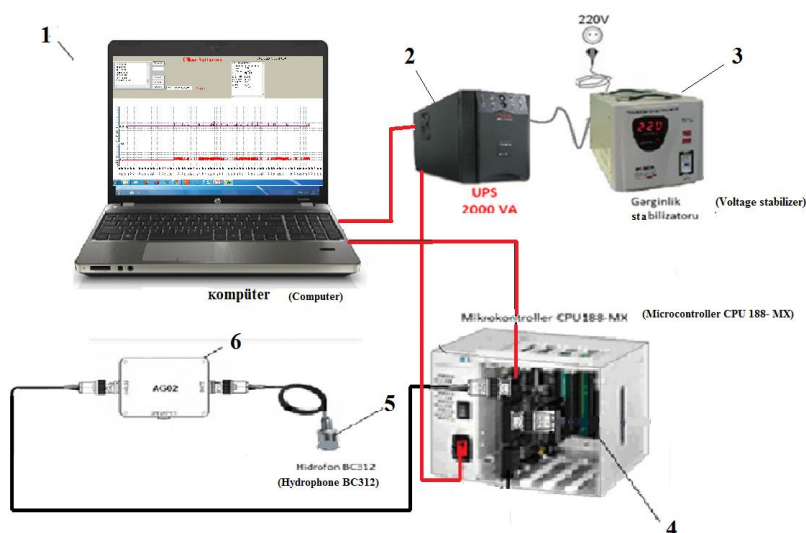


Рис. 3. Структурная схема опытного образца

- 1 – компьютер;
- 2 – UPS;
- 3 – стабилизатор электропитания;
- 4 – контроллер;
- 5 – гидрофон;
- 6 – усилитель.

4. Установка соответствующего оборудования и технология определения адекватных статистических характеристик моста. После завершения монтажа, заранее изготовленного в СКБ НАНА оборудования и подключения его к источнику питания, начался сбор данных и этап обучения системы. Место монтажа долго выбиралось, т.к. чувствительность и результативность зависели, как от чувствительности гидрофона, так и от удачного места расположения (Рис.4, Рис.5). Следует отметить, что оборудование не выключается и работает 24 часа в сутки в режиме реального времени.



Рис 4. Фото оборудования на эксплуатируемом мосту



Рис. 5. Фото оборудования на эксплуатируемом мосту

Также следует отметить, что сигнал и его характеристики соответственно, записываются каждые 1-2 минуты, таким образом, в день на компьютер записывается 12

Мбайт информации.

5. Новое программное обеспечение для вычисления адекватных (корректированных) статистических характеристик моста и их наглядной иллюстрации. Для определения точных статистических характеристик зашумленного сигнала, была создана специальная программа. Программа была написана в среде объектно-ориентированного программирования Delphi. Язык Delphi был выбран не случайно, учитывая, что это язык программирования со строгой статической типизацией переменных, это был наилучший вариант для создания необходимого программного обеспечения. Основная область применения данного языка программирования это написание прикладного программного обеспечения. При первичном запуске программы, интерфейс выглядит так:

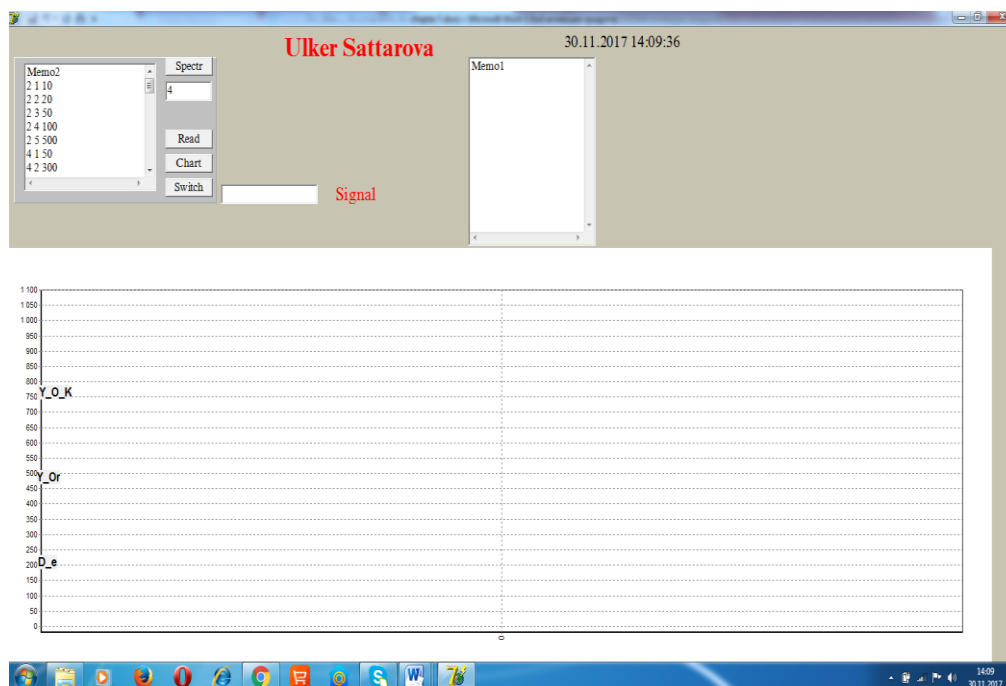


Рис 6. Вид программы при ее открытии

Далее нажимается кнопка Read, которая отвечает за вызов необходимого файла, в котором хранится информация, записанная с гидрофона. Тут же в небольшом окне фиксируется время и дата, в котором этот сигнал был записан. Также следует отметить, что на экране фиксируется, и текущее время и дата в режиме реального времени. После нажатия кнопки Spektr, отвечающей за подсчет характеристик в окошке spectral characteristics, подсчитываются такие статистические характеристики, как дисперсия зашумленного сигнала, дисперсия помехи, взаимно корреляционная функция между сигналом и помехой, среднее значение сигнала и среднеквадратическое отклонение т.д. После нажатия кнопки Chart, отвечающей за кривые основных характеристик, мы видим следующее изображение:

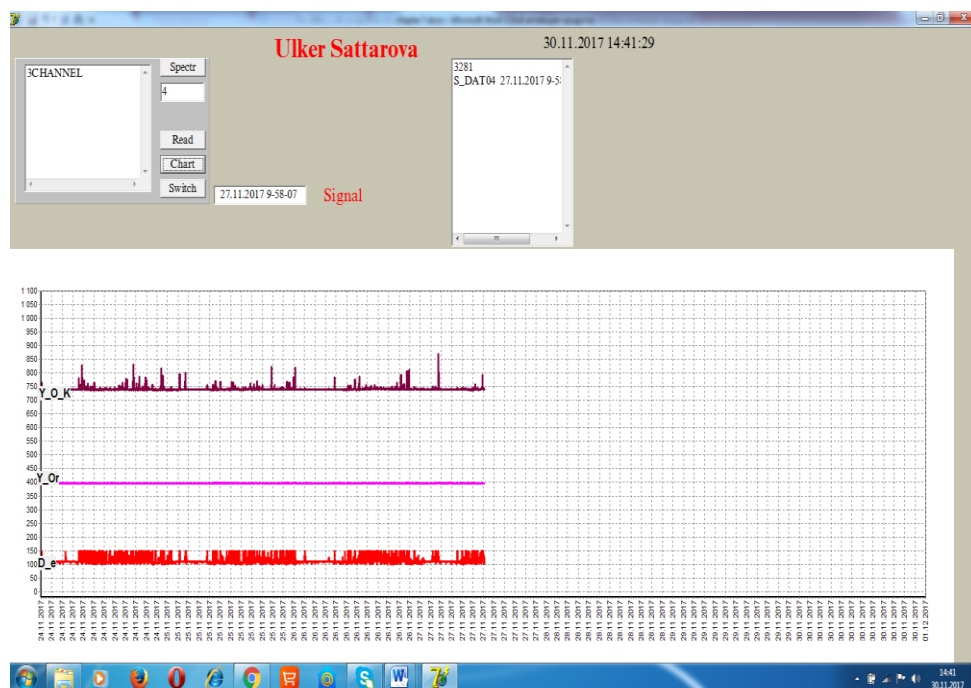


Рис. 7. Вид программы при ее работе

Эти кривые строятся на основе математических выкладок для определения дисперсии помехи зашумленного сигнала (5.1). Кроме того при микроизменениях в техническом состоянии объекта, дисперсия помехи D_ε меняется в первую очередь [3-7]. Следовательно, ее также можно использовать как один из надежных индикаторов. В работах [3-7] показано, что для этой цели дисперсию помехи зашумленного сигнала $g(i\Delta t)$ можно вычислить по выражению

$$D_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[g^2(i\Delta t) + g(i\Delta t)g((i+2)\Delta t) - 2g(i\Delta t)g((i+1)\Delta t) \right]. \quad (5.1)$$

Кроме того, для сравнения информативности и результативности построены кривые иных статистических характеристик, вычисленных по классическим выражениям [1, с.6], а именно таких как среднеквадратическое отклонение, среднее значение сигнала. Также следует отметить, что при необходимости любая из трех кривых может быть раскрыта (увеличена), т.е.

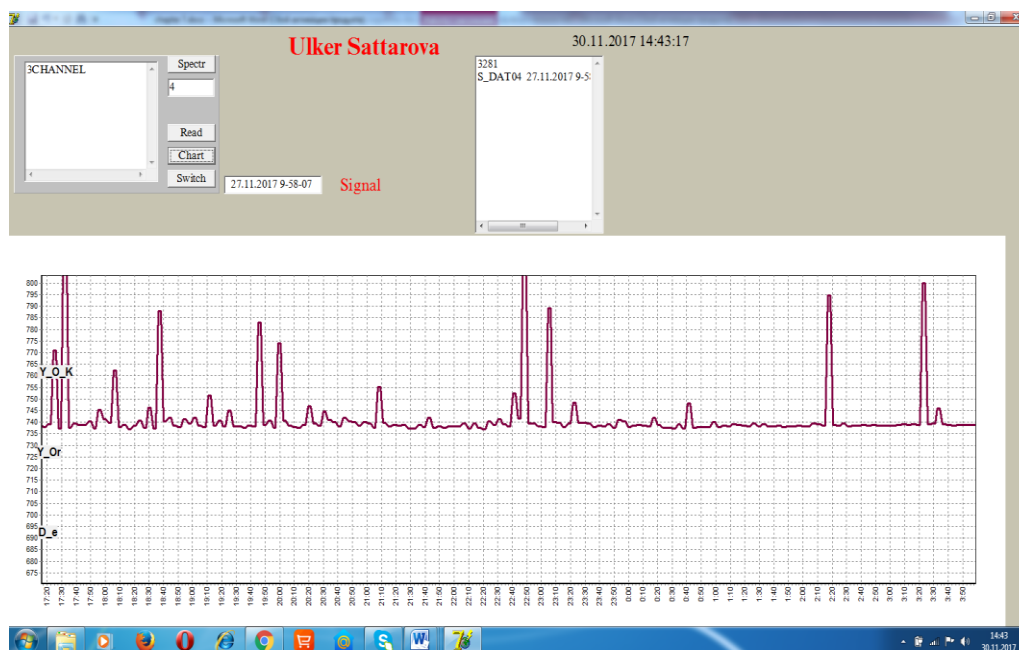


Рис. 8. Вид программы при увеличении кривой оценок среднеквадратического отклонения

Также есть кнопка Switch, отвечающая за переключение основного диалогового окна на другое. При двойном щелчке на эту кнопку мы видим второе окно, на котором изображен зашумленный сигнал и его спектр.

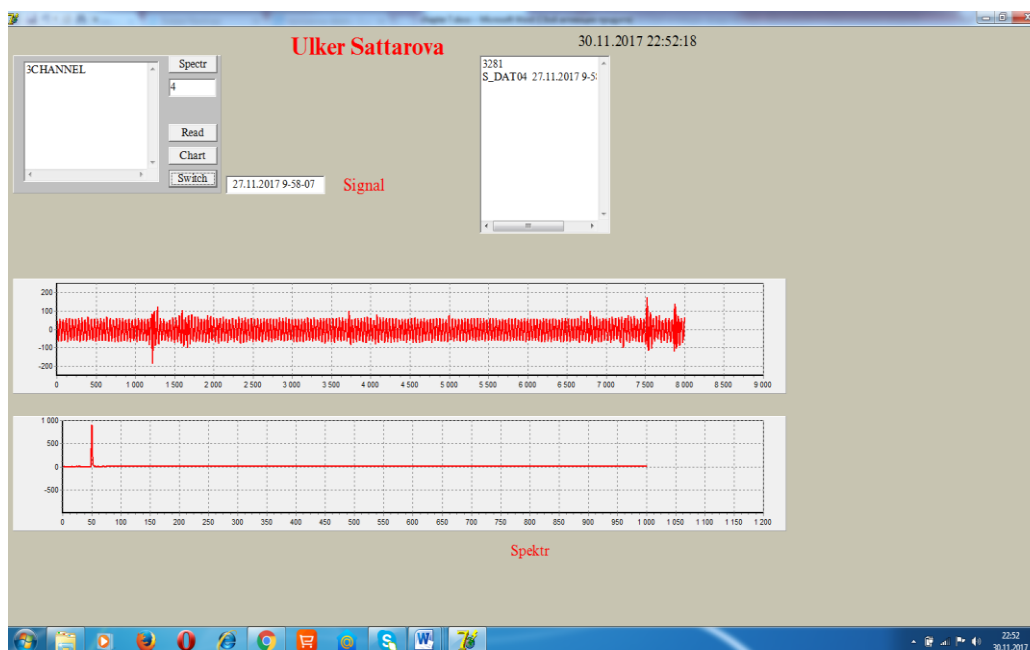


Рис. 9. Второе диалоговое окно программы

На первом изображении видны пики. По наблюдениям было замечено, что это грузовики или иные грузоперевозочные машины.

При необходимости и данные кривые могут быть раскрыты.

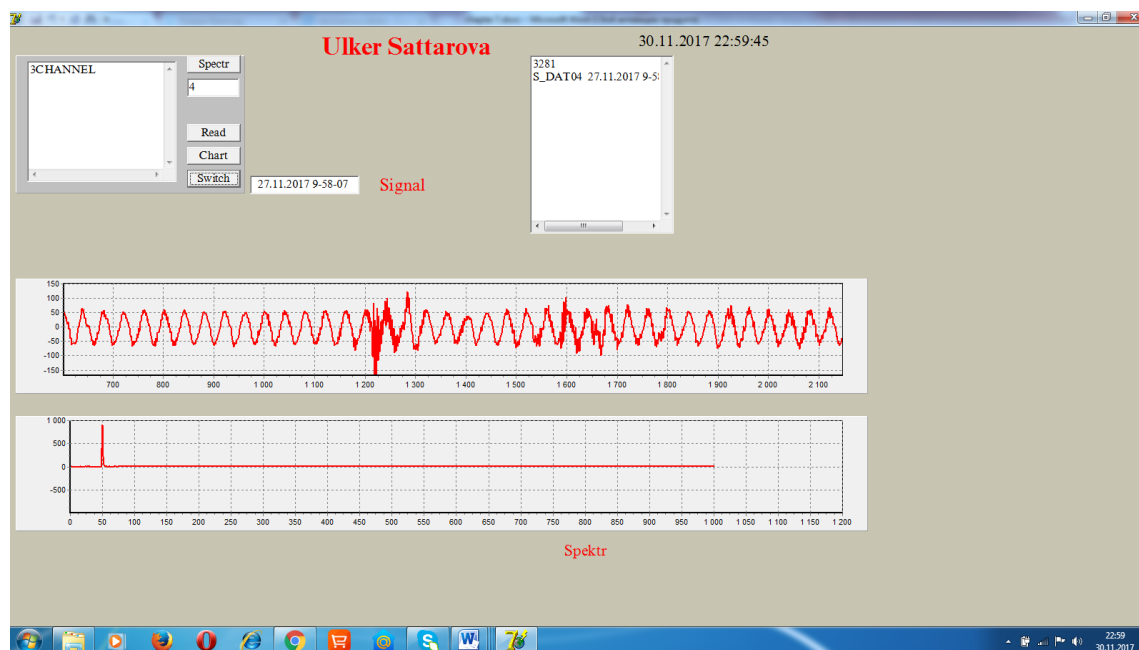


Рис. 10. Раскрытие кривой зашумленного сигнала

При повторном нажатии на эту же кнопку Switch экран обратно переходит на первое диалоговое окно.

Таким образом, данное программное обеспечение раскрывает широкие возможности для точного и корректного определения статистических характеристик зашумленного сигнала. При натурном эксперименте показано, что с помощью вычисления дисперсии помехи по формуле (5.1) зашумленного сигнала улучшается вопрос адекватности и точности измерения статистических характеристик, в частности дисперсии помехи. В литературе [1; 2, с.8-17] зашумлённый сигнал либо подчиняется классическим условиям, либо считается, что вычисление дисперсии проводится после процесса фильтрации.

Кроме того, также открыты широкие возможности для визуализации нескольких кривых и их наглядного сравнения.

6. Заключение. Благодаря соответствующему программному обеспечению и установленному оборудованию удалось провести натурный эксперимент и анализировать реальные стохастические сигналы, их характеристики, как по предложенным, так и известным технологиям. Показано, что в случае применения предложенных технологий, удалось определить адекватные (скорректированные) статистические характеристики и тем самым осуществлять мониторинг текущего состояния моста в процессе его эксплуатации. Также следует отметить, что данные характеристики могут служить входными параметрами для корреляционных матриц матричных уравнений.

Литература

1. J. Honerkamp. Statistical physics: An advanced approach with application. Chapter 2, 2012, 554 p.
2. S.C. Gupta V.K, Kapoor, Fundamentals of mathematical statistics (a modern approach), reprint 2002, Deli, 1303 p.
3. H.T. Nguyen, G.S. Rogers, Probability for statistics. Volume 1, Springer, 1989, 432 p.
4. Sattarova U.E. Technology and software for calculating correct normalization of correlation functions, Advances in Intelligent Systems and Computing. Volume 681, 149-160, 2018, Poland, Springer.
5. Sattarova U.E. Technology and software to determine adequate normalized correlation matrices in the solution of identification problems, Eastern European Journal of Enterprise Technologies, pp. 69-76, #6, 2017.

6. T.A. Aliev, U.E. Sattarova, N.E. Rzayeva. Robust correlation technology for online monitoring of changes in the state of the heart by means of laptops and smartphones, , Biomedical Signal Processing and Control, Elsevier, pp.44-51, 2017.
7. U.E. Sattarova. Identification of seismic stability of high-rise buildings and construction objects by correlation matrices, BrandenburgTechnological University, Der fakultar maschinenbau, elektro-und energiesysteme gus-und osteuropatag, Nefess- Netzwerktreffen, GUS-und Osteuropatage, pp.87-97, Brandenburg, Germany 2016 (file:///C:/Users/User/Downloads/Ingtag%20Endfassung%20si%20231216_final.pdf).
8. T.A. Aliev, A.M. Abbasov, Q.A. Guluyev, F.H. Pashaev, U.E. Sattarova. System of robust noise monitoring of anomalous seismic processes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Volume 53, Issue 1, 2013, pp. 11–25.

UOT 519.216

Ü.E. Səttarova

**Stoxastik proseslərin eksperimental tətqiqat texnologiyası, onların xüsusiyyətlərinin müəyyənəşdirilməsi və
istismar olunan körpüdə real sınaqların aparılması**

Yeni texnologiyaların effektivliyinin praktiki təsdiqi üçün real sınaq prosesi təsvir edilmişdir. Real stoxastik prosesin üzərində tətqiqatın aparılması üçün yeni proqram təminatı təklif olunur. Texnologiya və proqram təminatı, operativ hesablanma, yüksək dəqiqliklə statistik göstəricilərin adekvat qiymətləndirilməsi və yaradılmış texnologiyanın effektivliyini təsdiqi üçün nəzərdə tutulmuşdur.

Açar sözlər: real siqnal, küy, stoxastik göstəricilər, ortakvadratik kənarçıxma, korrelyasiya funksiyası, küy dispersiyası

U.E. Sattarova

**Technology of experimental study of stochastic processes, determining their characteristics and conducting
actual experiments on the operated bridge**

The authors describe the process of real-life actual experiment for practical confirmation of the effectiveness of new technologies. A new software is proposed for investigating a real stochastic process. Technology and software are developed for rapid calculation, analysis of adequate estimates of statistical characteristics, confirming the effectiveness of the developed technology, with high accuracy.

Keywords: real signal, noise, stochastic characteristics, standard deviation, correlation function, noise variance